بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک سنگ

ارایه شاخص پایداری تونل حین بهره‌برداری مبتنی بر روش‌های آماری (مطالعه موردی: تونل خط ۷ متروی تهران)

استاد راهنما:

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

نگارنده:

مصطفی عربی

بهمن ۱۳۹۶

تقدیم به بهترین هایم

پدرم

که آسمان بی کرانگی اش را از قلب او به بدیعه گرفته

مادرم

که مهربانی در چشمان او معنا پیدا کرده

تقدیر و تشکر:

نخست شکر ایزد بی‌همتا، که جان را در انسان دمید و پرورید و بعد سپاس از آنان که یار و همیار این کوچک بوده‌اند تا این مرحله را پشت سر گذارد، که زندگی همه خود تعریفی و درکی از مجموعه این مراحل است و خدای را سپاس می‌گویم که به من توان داد تا این مراحل را پشت سر بگذارم و به آغازی دگر بیندیشم؛ بدین وسیله زحمات کلیه‌ی اساتیدی که مرا در نوشتن این پایان‌نامه یاری نمودند، گرامی می‌دارم.

در پیش‌برد این پایان نامه، از راهنمایی‌های ارزشمند استاد گرامی‌ام، جناب آقای دکتر سید محمد اسماعیل جلالی بهره‌ها برده‌ام بر خود لازم می‌دانم از ایشان، به‌خاطر زحمات بی‌دریغشان صمیمانه قدردانی کنم.

از استاد گرامی‌ام جناب آقای دکتر جواد برآبادی که از رهنمودهای ارزشمندشان همواره بهره‌مند بوده‌ام، کمال تشکر را دارم.

از آقای دکتر مسعود ناصری که فراتر از یک استاد مشاور، از مشاوره‌شان بهره‌مند شدم، نهایت قدردانی و سپاس را دارم.

افتخار دارم از داوران این تحقیق، جناب آقای دکتر مجید نیکخواه و جناب آقای مهدی نوروزی قدردانی نمایم.

در نهایت از دوستان گرامی‌ام آقای مهندس حمیدرضا سعیدی و آقای مهندس مصطفی نادری، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

لیست مقالات مستخرج:

۱-" ارایه شاخصی برای تحلیل تونل حین بهره‌برداری مبتنی بر روش‌های آماری: مطالعه موردی تونل خط ۷ متروی تهران" مصطفی عربی، سید محمد اسماعیل جلالی، جواد برآبادی، مسعود ناصری. سومین کنفرانس جامع مدیریت شهری ایران با رویکرد زیرساخت‌ها، خدمات و توسعه پایدار شهری، تهران، دی ۱۳۹۶.

تعهد نامه

اینجانب **مصطفی عربی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی معدن- مکانیک سنگ** دانشکده **معدن، نفت و ژیوفیزیک** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **ارایه شاخص پایداری تونل حین بهره‌برداری مبتنی بر روش‌های آماری(مطالعه موردی: تونل خط ۷ متروی تهران)** تحت راهنمایی **دکتر سید محمد اسماعیل جلالی** متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا « Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه‌ای ، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

آلودگی‌های ناشی از رشد روزافزون جمعیت شهری کلان‌شهرها و افزایش ترافیک شهری به یک معضل ملی تبدیل شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد در ایران بهترین راه برای مقابله با آلودگی هوا گسترش شبکه حمل‌ونقل عمومی به ویژه استفاده از سیستم حمل‌ونقل ریلی است. برای توسعه سیستم حمل‌ونقل ریلی نیاز به احداث تونل‌های شهری است. شناخت مخاطرات تونل‌ها و ارزیابی پایداری و ایمنی در هر سه مرحله طراحی، اجرا و بهره‌برداری با توجه به صرف هزینه‌های فراوان برای ساخت این نوع تونل‌ها امری اجتناب‌ناپذیر است. به این ترتیب دست‌یابی به توسعه پایدار در زمینه زیرساخت‌های حمل‌ونقل می‌تواند محقق شود. بنابراین شناخت، ارزیابی، مدیریت و کنترل عوامل خطرزا که در اغلب موارد، امکان وقوع و بزرگی آن‌ها با عدم قطعیت بالایی همراه است، باید مورد توجه قرار گیرد. در پایان‌نامه حاضر به منظور بررسی پایداری تونل‌های مترو در زمان بهره‌برداری از اطلاعات تونل مترو خط ۷ تهران استفاده شده است. بدین منظور ابتدا تمامی عوامل تاثیرگذار بر پایداری تونل مترو، شناسایی‌شده و سپس با استفاده از روش قضاوت توسط کارشناسان شاخصی با عنوان شاخص پایداری (SI) تدوین شده است. بدین صورت که ابتدا اهمیت هر کدام از عوامل موثر بر پایداری تونل در زمان بهره‌برداری برای تونل خط ۷ مترو تهران مشخص شده است که عوامل قابلیت تورم و لهیدگی، سطح آب زیرزمینی و زلزله از پر اهمیت‌ترین عوامل، و عوامل رودخانه، کیفیت مصالح مورد استفاده و پل‌های همجوار سازه از عوامل کم اهمیت در پایداری تونل خط ۷ متروی تهران در زمان بهره‌برداری هستند. سپس شاخص پایداری کل برای هر پهنه محاسبه شده و مشخص شده پهنه ۱۶ (کیلومتر ۹۰۰+۱۶ تا ۵۰۰+۱۷) و پهنه ۲۰ (کیلومتر ۱۳۰+۲۱ تا ۰۰۰+۲۲) دارای بالاترین شاخص پایداری هستند و می‌توانند به عنوان سازه پدافندی غیرعامل نقش خوبی ایفا کنند. همچنین پهنه ۱ (کیلومتر ۵۰۰+۷ تا ۸۶۰+۷)، پهنه ۵ (کیلومتر ۸۰۰+۸ تا ۱۶۰+۹) و پهنه ۱۷ (کیلومتر ۵۰۰+۱۷ تا ۱۷۰+۱۹) دارای پایین‌ترین شاخص پایداری هستند. همپنین نسبت کاهش عمر مفید تونل در مقایسه با تونل مبنا (تونلی که تمامی عوامل موثر بر پایداری تونل در زمان بهره‌برداری دارای حداکثر امتیاز هستند) به طور میانگین ۱۹/۶۲

درصد است.

کلمات کلیدی: شاخص پایداری، تونل مترو خط ۷ تهران، پدافند غیرعامل

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات پژوهش ۱

۱-۱- تعریف مساله و اهمیت آن ۲

۱-۲- هدف تحقیق ۳

۱-۳- روش انجام پژوهش ۴

۱-۴- سازماندهی پایان‌نامه ۵

فصل دوم: مبانی نظری و مروری بر تحقیقات گذشته ۷

۲-۱- خطرات و مخاطرات تونل‌سازی شهری ۸

۲-۱-۱- مقدمه ۸

۲-۱-۲- تعاریف ۸

۲-۱-۳- ضرورت شناسایی خطر ۹

۲-۱-۳-۱- گسیختگی و حالت‌های گسیختگی تونل‌ها ۱۰

۲-۱-۳-۲- مثال‌هایی از گسیختگی و آسیب‌های وارده به تونل‌های مترو ۱۱

۲-۲- قابلیت اطمینان ۱۴

۲-۲-۱- تاریخچه قابلیت اطمینان ۱۴

۲-۲-۲- تعریف قابلیت اطمینان ۱۶

۲-۲-۳- توابع کلی قابلیت اطمینان ۲۱

۲-۲-۳-۱- شکل توابع قابلیت اطمینان ۲۴

۲-۲-۳-۱-۱- توزیع نمایی منفی ۲۶

۲-۲-۳-۱-۲- توزیع ویبل ۲۶

۲-۲-۳-۱-۳- توزیع لاگ نرمال ۲۶

۲-۲-۳-۱-۴- توزیع نرمال ۲۷

۲-۲-۳-۱-۵- توزیع مثلثی ۲۷
۲-۳- روش قضاوت توسط کارشناسان ۲۷
۲-۳-۱- فرآیند جمع‌آوری نظرات کارشناسان ۲۸
۲-۳-۱-۱- انتخاب کارشناس ۲۹
۲-۳-۱-۲- جمع‌آوری نظرات کارشناسان ۲۹
۲-۳-۱-۳- ترکیب کردن نظرات کارشناسان ۳۰
۲-۴- عدم قطعیت ۳۲
۲-۴-۱- عدم قطعیت در پروژه‌ها ۳۳
۲-۴-۱-۱- عدم قطعیت در مبانی و برآوردهای پروژه ۳۴
۲-۴-۱-۲- عدم قطعیت در طراحی و تدارکات پروژه ۳۴
۲-۴-۱-۳- عدم قطعیت در اهداف پروژه و اولویت‌های آنها ۳۵
۲-۴-۱-۴- عدم قطعیت در روابط بین نهادهای حاضر در پروژه ۳۵
۲-۵- جمع‌بندی ۳۵

فصل سوم: عوامل موثر بر پایداری تونل در زمان بهره‌برداری ۳۷

۳-۱- معرفی تونل خط ۷ متروی تهران ۳۸
۳-۱-۱- موقعیت جغرافیایی تونل خط ۷ متروی تهران ۳۸
۳-۱-۲- مشخصات مسیر مورد مطالعه ۳۹
۳-۱-۳- زمین‌شناسی مسیر تونل ۴۰
۳-۱-۴- پهنه‌بندی مسیر تونل خط ۷ متروی تهران ۴۳
۳-۲- عوامل موثر بر پایداری تونل خط ۷ مترو تهران در زمان بهره‌برداری ۴۵
۳-۲-۱- پایداری تونل‌های مترو در زمان بهره‌برداری ۴۵
۳-۲-۲- عوامل مربوط به پایداری تونل‌ها در زمان بهره‌برداری ۴۵
۳-۲-۲-۱- عوامل ذاتی زمین ۴۷
۳-۲-۲-۲- عوامل محیطی ۵۰

۳-۲-۲-۳- عوامل مربوط به مشخصات تونل ۵۴
۳-۲-۲-۴- عوامل مربوط به سامانه نگهداری ۵۷
۳-۲-۲-۵- عوامل مربوط به بارهای زنده و دینامیکی ۶۴
۳-۲-۲-۶- عوامل غیر مترقبه ۶۸
۳-۲-۲-۷- عوامل مربوط به عوارض و موانع سطحی و زیرزمینی ۷۰
۳-۲-۲-۸- عوامل مربوط به نیروی انسانی ۷۷
۳-۳- جمع‌بندی ۷۹

فصل چهارم: شاخص پایداری تونل خط۷ متروی تهران در حین بهره‌برداری ۸۱

۴-۱- مقدمه ۸۲
۴-۲- تحلیل پایداری تونل خط ۷ مترو تهران ۸۲
۴-۲-۱- میزان اهمیت عوامل موثر بر پایداری تونل در زمان بهره‌برداری ۸۶
۴-۲-۲- تعریف و محاسبه شاخص پایداری کلی ۹۷
۴-۲-۳- بررسی درصد کاهش عمر مفید تونل ۱۰۱
۴-۳- جمع‌بندی ۱۰۴

فصل پنجم: نتایج و پیشنهادات ۱۰۵

۵-۱- نتایج ۱۰۶
۵-۲- پیشنهادات ۱۰۷

منابع ۱۰۹

فهرست اشکال

شکل ۱-۱: مراحل انجام پژوهش ۴

شکل ۲-۱: ستون‌های آسیب دیده ایستگاه مترو ۱۱

شکل ۲-۲: فرونشست سطح زمین در نتیجه گسیختگی در ایستگاه مترو دایکای ۱۲

شکل ۲-۳: ورود آب به تونل خط ۴ مترو تهران ۱۴

شکل ۲-۴: مقادیر قطعی بار و مقاومت ۱۹

شکل ۲-۵: مقدار احتمالی L_p همواره با مقدار قطعی L_c ۲۰

شکل ۲-۶: مقادیر احتمالی L_c و L_p ۲۰

شکل ۲-۷: نمونه‌ای از تغییرات آهنگ وقوع خطر بر حسب سن کارکرد قطعات ۲۵

شکل ۳-۱: مسیر احداث قطعه شرقی-غربی خط ۷ متروی تهران ۳۸

شکل ۳-۲: مسیر احداث قطعه شمالی-جنوبی مترو خط ۷ تهران ۳۹

شکل ۳-۳: امتیازدهی مقاومت خاک در پهنه‌های مختلف تونل خط ۷ متروی تهران ۴۸

شکل ۳-۴: امتیاز قابلیت تورم و لهیدگی برای پهنه‌های مختلف تونل خط ۷ متروی تهران ۴۹

شکل ۳-۵: امتیاز تنوع و تعداد لایه‌ها برای پهنه‌های مختلف تونل خط ۷ متروی تهران ۵۰

شکل ۳-۶: امتیاز سطح آب زیرزمینی برای پهنه‌های مختلف تونل خط ۷ متروی تهران ۵۱

شکل ۳-۷: گسل‌های تهران ۵۳

شکل ۳-۸: امتیاز گسل برای پهنه‌های مختلف تونل خط ۷ متروی تهران ۵۳

شکل ۳-۹: امتیازدهی پهنه‌های مختلف تونل خط ۷ متروی تهران بر اساس برخورد با رودخانه ۵۴

شکل ۳-۱۰: رده‌بندی امتداد تونل ۵۵

شکل ۳-۱۱: امتیازدهی امتداد تونل در پهنه‌های مختلف تونل خط ۷ متروی تهران ۵۶

شکل ۳-۱۲: امتیازدهی ضخامت روباره در پهنه‌های مختلف تونل خط ۷ متروی تهران ۵۷

شکل ۳-۱۳: امتیازدهی ظرفیت باربری سامانه نگهداری در پهنه‌های مختلف ۶۰

شکل ۳-۱۴: امتیازدهی صلبیت سامانه نگهداری در پهنه‌های مختلف ۶۱

شکل ۳-۱۵: رده‌بندی کیفیت اجرای تزریق بر اساس کیفیت دوغاب تزریقی ۶۲

شکل ۳-۱۶: امتیازدهی کیفیت تزریق در پهنه‌های مسیر تونل خط ۷ متروی تهران ۶۲
شکل ۳-۱۷: امتیازدهی کیفیت مصالح مورد استفاده در پهنه‌های مسیر تونل ۶۳
شکل ۳-۱۸: رده‌بندی ترافیک شهری بر اساس عرض خیابان و شلوغی مسیر ۶۴
شکل ۳-۱۹: امتیازدهی ترافیک شهری در پهنه‌های مسیر تونل خط ۷ متروی تهران ۶۵
شکل ۳-۲۰: نرخ خطر وقوع زلزله و خرابی منتج از آن بر اساس گسل‌های موجود ۶۶
شکل ۳-۲۱: امتیازدهی خطر خرابی ناشی از وقوع زلزله در پهنه‌های مسیر تونل خط ۷ ..... ۶۷
شکل ۳-۲۲: امتیازدهی لرزش‌های ناشی از انفجار در پهنه‌های مسیر تونل خط ۷ ..... ۶۸
شکل ۳-۲۳: رده‌بندی خطر وقوع سیل و آتش‌سوزی ۶۹
شکل ۳-۲۴: امتیازدهی سیل و آتش‌سوزی پهنه‌های مسیر تونل خط ۷ متروی تهران ۷۰
شکل ۳-۲۵: رده‌بندی فشار وارده بر تونل از طرف ساختمان‌ها بر اساس ارتفاع ساختمان ۷۱
شکل ۳-۲۶: امتیازدهی ساختمان‌های اطراف تونل مترو در پهنه‌های مسیر تونل خط ۷ ..... ۷۲
شکل ۳-۲۷: امتیازدهی قنات‌ها، چاه‌ها و لوله‌های فاضلاب در پهنه‌های مسیر تونل ۷۳
شکل ۳-۲۸: امتیازدهی تاثیر تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی در پهنه‌های مسیر تونل ۷۵
شکل ۳-۲۹: رده‌بندی اهمیت پل بر اساس بزرگی و فاصله تونل از شمع‌های پل ۷۶
شکل ۳-۳۰: امتیازدهی پل‌های موجود در پهنه‌های مسیر تونل خط ۷ متروی تهران ۷۶
شکل ۳-۳۱: امتیازدهی مهارت و تجربه کادر اجرایی در پهنه‌های مسیر تونل مترو خط ۷ ..... ۷۸
شکل ۳-۳۲: امتیازدهی بازدیدهای دوره‌ای و تعمیرات اساسی در پهنه‌های مسیر تونل مترو ۷۹
شکل ۴-۱: فرآیند شبیه‌ساز مونت کارلو برای تعیین توزیع‌های احتمال درجه اهمیت هر عامل ۹۰
شکل ۴-۲: توزیع تجمعی درجه اهمیت هر عامل که توسط تصمیم گیرنده مورد استفاده ۹۲
شکل ۴-۳: توزیع چگالی درجه اهمیت هر عامل که توسط تصمیم گیرنده مورد استفاده ۹۲
شکل ۴-۴: فرآیند شبیه‌ساز مونت کارلو برای تعیین توزیع‌های احتمال ۹۸
شکل ۴-۵: نمودار توزیع چگالی شاخص پایداری کل برای هر پهنه ۱۰۰
شکل ۴-۶: نمودار توزیع تجمعی شاخص پایداری کل برای هر پهنه ۱۰۱
شکل ۴-۷: نمودار توزیع چگالی نظرات کارشناس‌ها و برآیندها در رابطه با درصد کاهش طول عمر ۱۰۳
شکل ۴-۸: نمودار توزیع تجمعی نظرات کارشناس‌ها و برآیندها در رابطه با درصد کاهش طول عمر ۱۰۳

فهرست جداول

جدول۲- ۱: آتش‌سوزی در مترو باکو ۱۳

جدول۲- ۲: آتش‌سوزی در مترو دیگو ۱۳

جدول ۳- ۱: مشخصات تونل خط ۷ متروی تهران ۴۰

جدول ۳- ۲: مشخصات لایه‌های زمین‌شناسی تفکیک‌شده در لایه‌های خاکی مسیر تونل ۴۱

جدول ۳- ۳: علایم معرف نوع خاک ۴۱

جدول ۳- ۴: علایم معرف خواص خاک ۴۱

جدول ۳- ۵: عوامل ژیوتکنیکی واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل ۴۳

جدول ۳- ۶: پهنه‌های ۲۴ گانه تونل خط ۷ متروی تهران ۴۴

جدول ۳- ۷: عوامل موثر بر پایداری تونل‌های مترو در زمان بهره‌برداری ۴۶

جدول ۳- ۸: معیار طبقه‌بندی خاک (ET) بر اساس مقاومت خاک ۴۷

جدول ۳- ۹: معیار طبقه‌بندی خاک بر اساس قابلیت تورم و لهیدگی ۴۹

جدول ۳- ۱۰: معیار طبقه‌بندی خاک بر اساس تنوع و تعداد لایه‌ها ۵۰

جدول ۳- ۱۱: معیار طبقه‌بندی سطح آب زیرزمینی ۵۱

جدول ۳- ۱۲: معیار طبقه‌بندی خطر زمین‌لرزه برای نواحی مختلف شهر تهران ۵۲

جدول ۳- ۱۳: معیار طبقه‌بندی رودخانه‌ها بر اساس ناحیه تاثیر ۵۴

جدول ۳- ۱۴: معیار طبقه‌بندی امتداد تونل بر اساس میزان قوس و شیب تونل ۵۵

جدول ۳- ۱۵: معیار طبقه‌بندی ضخامت روباره ۵۷

جدول ۳- ۱۶: معیار طبقه‌بندی ظرفیت باربری سامانه نگهداری ۵۹

جدول ۳- ۱۷: مشخصات بتن مصرفی در سامانه نگهداری تونل خط ۷ مترو تهران ۶۰

جدول ۳- ۱۸: معیار طبقه‌بندی صلبیت سامانه نگهداری ۶۱

جدول ۳- ۱۹: معیار طبقه‌بندی کیفیت اجرای تزریق بر اساس کیفیت دوغاب تزریق ۶۲

جدول ۳- ۲۰: معیار طبقه‌بندی کیفیت مصالح مورد استفاده ۶۳

جدول ۳- ۲۱: معیار طبقه‌بندی ترافیک شهری بر اساس پهنای خیابان و شلوغی مسیر ۶۵

جدول ۳- ۲۲: معیار طبقه‌بندی خطر وقوع زلزله و خرابی منتج از آن ۶۷

جدول ۳- ۲۳: معیار طبقه‌بندی لرزش‌های ناشی از انفجار ۶۸
جدول ۳- ۲۴: معیار طبقه‌بندی خطر وقوع سیل و آتش‌سوزی ۶۹
جدول ۳- ۲۵: معیار طبقه‌بندی ساختمان‌های اطراف تونل بر اساس فشار اعمالی به تونل مترو ۷۱
جدول ۳- ۲۶: معیار طبقه‌بندی قنات‌ها، چاه‌ها و لوله‌های فاضلاب بر اساس فاصله ۷۳
جدول ۳- ۲۷: معیار طبقه‌بندی تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی بر اساس ناحیه تاثیر ۷۴
جدول ۳- ۲۸: معیار طبقه‌بندی تاثیر پل‌ها بر روی تونل مترو ۷۶
جدول ۳- ۲۹: معیار طبقه‌بندی مهارت و تجربه عوامل اجرایی ۷۷
جدول ۳- ۳۰: معیار طبقه‌بندی عامل بازدیدهای دوره‌ای و تعمیرات اساسی ۷۸
جدول۴- ۱: فرم خام نظرسنجی برای جمع‌آوری نظرات کارشناسان ۸۳
جدول۴- ۲: فرم خام نظرسنجی به همراه امتیاز کلی هر عامل در کل تونل برای جمع‌آوری ۸۴
جدول۴- ۳: پرسشنامه(۶) (کارشناس دارای ۱۰ سال سابقه، سرپرست کارگاه) ۸۵
جدول۴- ۴: داده‌های ارایه شده برای درجه اهمیت هر عامل موثر بر پایداری ۸۸
جدول۴- ۵: میزان تجربه کاری هر کارشناس و ضریب وزنی اختصاص داده شده به آنها ۸۹
جدول۴- ۶: میانگین، انحراف معیار، میانه، و صدک ۵ و ۹۵ درصد مربوط به هر عامل ۹۱
جدول۴- ۷: مشخصات آماری شاخص پایداری کل برای هر پهنه ۱۰۰
جدول۴- ۸: مشخصات آماری درصد کاهش طول عمر مفید تونل مورد مطالعه ۱۰۴

فصل اول

کلیات پژوهش

۱-۱- تعریف مساله و اهمیت آن

آلودگی‌های ناشی از رشد روزافزون جمعیت شهری کلان‌شهرها و افزایش ترافیک شهری به یک معضل ملی تبدیل شده است. اولین سابقه پیگیری این موضوع به سال ۱۳۵۰ که در آن سال سمپوزیومی با موضوع آلودگی هوا توسط شرکت ملی نفت برگزار شد، برمی‌گردد. بررسی‌ها نشان می‌دهد در ایران بهترین راه برای مقابله با آلودگی هوای کلان‌شهرها استفاده از سیستم حمل‌ونقل ریلی است. از طرفی این راهبرد در ایران چندان مورد توجه قرار نگرفته و در بسیاری از شهرهای ایران تنها از یک سیستم حمل‌ونقل متکی بر اتوبوس و تاکسی با سوخت‌های فسیلی استفاده می‌شود (متصدی زرندی، ۱۳۸۷). برای توسعه سیستم حمل‌ونقل ریلی نیاز به احداث تونل‌های شهری است. با توجه به صرف هزینه‌های فراوان برای ساخت این نوع تونل‌ها، شناخت مخاطرات تونل‌ها و ارزیابی پایداری و ایمنی در هر سه مرحله طراحی، اجرا و بهره‌برداری اجتناب‌ناپذیر است. به این ترتیب دست‌یابی به توسعه پایدار در زمینه زیرساخت‌های حمل‌ونقل می‌تواند محقق شود.

ساخت تونل‌های درون‌شهری مستلزم صرف هزینه‌های زیاد است. در این خصوص، با فرض رعایت موارد ایمنی در تونل‌ها، این امکان همچنان وجود خواهد داشت که در نتیجه وقوع خطرات و تهدیدهای احتمالی حین اجرا و بهره‌برداری، آسیب‌ها و خرابی‌هایی متوجه تونل شده و یا زندگی کارگران و افراد استفاده‌کننده از آن را به خطر 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 بروز از خطرات و یا به حداقل رساندن پیامدهای آن‌ها صورت پذیرد. بنابراین، شناخت، ارزیابی، مدیریت و کنترل عوامل خطرزا که در اغلب موارد امکان وقوع و بزرگی آن‌ها با عدم قطعیت بالایی همراه است، باید مورد توجه قرار گیرد(مصطفوی مقدم و آشتیانی، ۱۳۹۱). پس از اجرا و انجام فعالیت‌های تکمیلی مانند تزریق‌های تحکیمی در نواحی سست، تزریق آب بندی در نواحی با پتانسیل نشت آب و حصول اطمینان از ایمنی جابجایی تاسیسات شهری و قنوات، اقدام به بهره‌برداری از تونل به عنوان تونل مترو، تونل ترافیکی، تونل تاسیسات شهری

و غیره می‌شود. اما نکته مهم، بررسی آثار خطر عوامل مذکور بر روی تونل است. اگرچه در زمان طراحی از دست‌یابی به ضریب اطمینان از پیش تعیین‌شده یقین حاصل می‌شود اما خطر وقوع هر گونه ناپایداری تونل و یا اثر وجود آن بر سازه‌های اطراف با توجه به نوع مخاطرات موجود در نواحی مختلف تونل متفاوت خواهد بود.

به عنوان مثال در زمان وقوع زلزله، احتمال ناپایداری تونل در نواحی با پتانسیل روان‌گرایی و یا در جایی که تونل مورد نظر در مجاورت یک قنات حفاری شده است، متفاوت است. همچنین سایر مخاطرات بیان‌شده به خصوص معارضین سطحی و زیرسطحی نیز بر تونل مورد بهره‌برداری تاثیر زیادی می‌گذارد. بنابراین شناسایی و برآورد مخاطرات یک تونل در حال بهره‌برداری و یا تاثیر توام آن‌ها بر سازه‌های سطحی و زیرسطحی می‌تواند از اهمیت زیادی برخوردار باشد. این موضوع می‌تواند در زمان بروز بلایای طبیعی مانند سیل و زلزله تاثیر بیشتری داشته باشد.

برای این منظور ابتدا باید کلیه مخاطرات تونل‌سازی در یک محیط شهری شناسایی شود. در مرحله بعدی مخاطراتی که یک تونل در حال بهره‌برداری را تهدید می‌کند شناسایی‌شده و تاثیر آن و همچنین تاثیر توام مخاطرات مختلف بر این تونل مورد بررسی قرار گیرد و در نهایت، مخاطره وقوع آن‌ها در شرایط مختلف برآورد شود.

۱-۲- هدف تحقیق

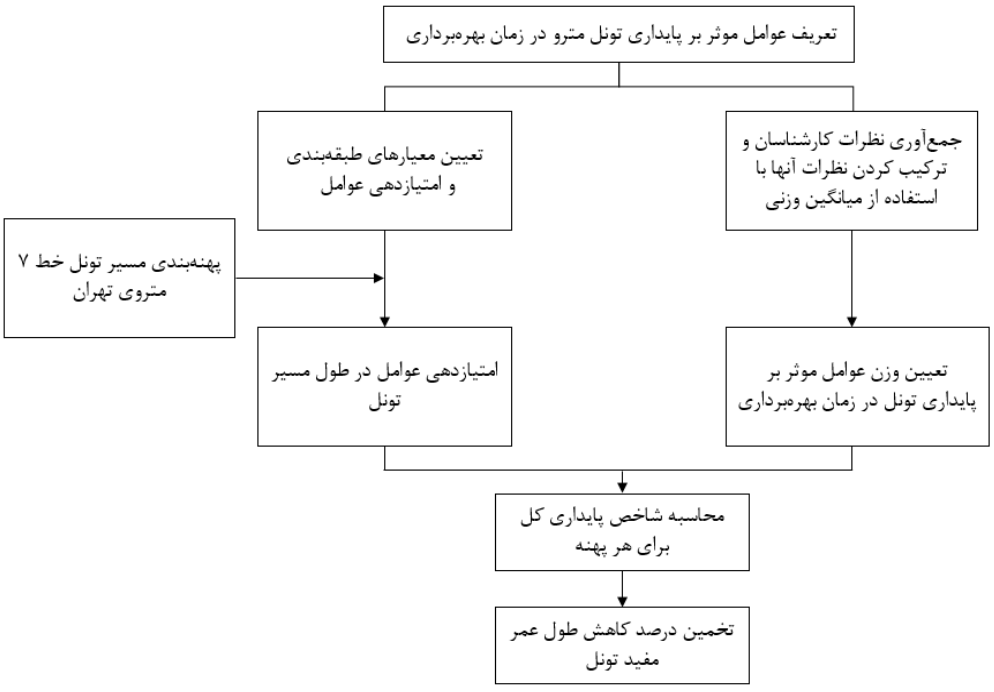
تاکنون پژوهش‌های فراوانی در مورد پایداری تونل‌ها مترو در زمان اجرا انجام شده است. با این حال کمتر به پایداری تونل‌های مترو در زمان بهره‌برداری پرداخته شده است. در زمان بهره‌برداری عوامل زیادی بر روی پایداری تونل تاثیرگذار هستند؛ مانند زلزله، حملات موشکی و تروریستی، بالا و پایین رفتن سطح آب زیرزمینی، معارضین سطحی و زیرزمینی و... .

در این پژوهش سعی می‌شود تمامی عوامل تاثیرگذار بر روی پایداری تونل‌های مترو در زمان بهره‌برداری شناسایی و در پایان شاخصی برای پایداری تونل‌های مترو در زمان بهره‌برداری ارایه شود.

مطالعه موردی در نظر گرفته شده برای انجام این پژوهش، تونل خط۷ متروی تهران است.

۱-۳- روش انجام پژوهش

در این تحقیق پایداری تونل خط ۷ متروی تهران با انجام دو مرحله پیاپی و با استفاده از روش قابلیت اطمینان و از طریق شیوه‌ی قضاوت توسط کارشناسان ارزیابی می‌شود. در مرحله اول تمامی عوامل موثر بر پایداری تونل خط ۷ مترو تهران در زمان بهره برداری، از جمله عوامل مربوط به خاک شامل: دانه‌بندی، آب محتوی و ...، عوامل مربوط به سامانه نگهداری شامل: صلبیت، زمان نصب و...، عوامل عملیاتی شامل: سرعت تونل‌زنی، روش تونل‌زنی و...، عوامل محیطی شامل: تنش زمین، تنش‌های القایی و... شناسایی و معرفی خواهند شد. سپس به بررسی اهمیت هر یک از این عوامل در ارتباط با سازه احداث شده پرداخته خواهد شد. در مرحله دوم تونل مترو خط ۷ تهران ابتدا پهنه‌بندی و سپس میزان اهمیت عوامل موثر بر پایداری بررسی می‌گردد و سپس شاخص پایداری کلی برای تمامی پهنه‌ها ارایه می‌گردد و در نهایت درصد کاهش عمر مفید تونل بررسی می‌گردد. مراحل انجام پژوهش در شکل ۱-۱ آمده است.



شکل ۱-۱: مراحل انجام پژوهش

۱-۴- سازماندهی پایان‌نامه

- **فصل اول- کلیات پژوهش**

در این فصل به ضرورت تحقیق در مورد پایداری تونل‌های مترو در زمان بهره‌برداری و نحوه‌ی انجام تحقیق پرداخته شده است.

- **فصل دوم- مبانی نظری و مروری بر تحقیقات گذشته**

در این فصل به بیان خطرات و مخاطرات تونل‌سازی شهری و همچنین به معرفی رویکرد قابلیت اطمینان و روش قضاوت توسط کارشناسان و عدم قطعیت‌های موجود در پروژه‌ها پرداخته می‌شود.

- **فصل سوم- عوامل موثر بر پایداری تونل در زمان بهره‌برداری**

در این فصل به معرفی تونل خط ۷ متروی تهران و عوامل موثر بر پایداری تونل متروی خط ۷ تهران در زمان بهره‌برداری پرداخته می‌شود.

- **فصل چهارم- تحلیل و بررسی نتایج**

در این فصل میزان اهیمت عوامل موثر بر پایداری تونل بررسی می‌گردد و سپس شاخص پایداری کلی برای تمامی پهنه‌ها ارایه می‌گردد و در نهایت درصد کاهش عمر مفید تونل بررسی می‌گردد.

- **فصل پنجم- جمع‌بندی و نتیجه گیری**

در فصل آخر، جمع‌بندی نهایی، نتیجه‌گیری و حوزه‌ی کاربرد نتایج حاصل از این پژوهش آمده است.

فصل دوم

مبانی نظری و مروری بر تحقیقات گذشته

۲-۱- خطرات و مخاطرات تونل‌سازی شهری

۲-۱-۱- مقدمه

امروزه متروها و تونل‌های شهری به عنوان یکی از کلیدی‌ترین و مهم‌ترین زیرساخت‌های شبکه حمل‌ونقل در شهرهای بزرگ به شمار می‌آیند. از طرفی هزینه‌های قابل توجهی برای اجرای چنین پروژه‌هایی صرف می‌شود، که همواره ممکن است با خطرات و تهدیدهایی در بخش طراحی، اجرا و بهره‌برداری مواجه باشد، بنابراین برای نیل به پیشرفت و توسعه پایدار در زمینه سازه‌های زیرزمینی به خصوص تونل‌های مترو باید خطرات، مخاطرات و تهدیدهای تونل‌سازی شهری مدنظر قرار گیرد.

۲-۱-۲- تعاریف

در این تحقیق از سه واژه خطر، مخاطره و تهدید به دفعات استفاده شده است بنابراین لازم است مفاهیم این واژه‌ها تشریح گردد.

خطر[1] به معنای عام عبارت است از وقوع هرگونه شرایط یا وضعیتی که ظرفیت عواقب ناخواسته و غیر عمدی (ناشی از حوادث طبیعی و یا ناشی از اشتباهات انسانی) ازجمله رخداد خسارت‌های جانی و مالی، زیست‌محیطی، اقتصادی و تاخیر در پروژه را به دنبال داشته باشد.

مخاطره[2] (R) نیز به عنوان حاصل‌ضرب احتمال یا تکرار وقوع خطرات مترقب بر تونل‌ها (P) در میزان پیامدهای وقوع آن‌ها (I)، تعریف می‌گردد.

$$R = P \times I \qquad (۱-۲$$

ماهیت خطر به گونه‌ای است که در اغلب موارد نمی‌توان از وقوع آن جلوگیری نمود و یا شدت وقوع آن را کنترل کرد. اما درعین‌حال می‌توان با کاهش عواقب و پیامدهای آن خطرات، مخاطره ناشی از وقوع آن‌ها را برای سازه مورد نظر کاهش داد (مصطفوی مقدم و آشتیانی، ۱۳۹۱).

1- Hazard
2- Risk

تهدید[1] به عنوان یک عامل عمدی تلقی شده 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 برنامه‌ریزی‌شده 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 حمل‌ونقل عمومی و پیامدهای مخرب دیگر باشد.

۲-۱-۳- ضرورت شناسایی خطر

واقعیت این است که تهران به عنوان بزرگ‌ترین کلان‌شهر و پایتخت کشور، در ابعاد مختلف سیاسی، اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی از اهمیت قابل توجهی برخوردار بوده و با توجه به حجم بالای سفرهای روزمره درون‌شهری آن، نیازمند توسعه شبکه ارتباطی بخش‌های مختلف شهر به یکدیگر است. همچنین، با توجه به قیمت بالای اراضی شهری در کلان‌شهری هم‌چون تهران، استفاده از فضای زیرزمینی خصوصاً تونل‌ها جهت نیل به توسعه شهری همواره مورد توجه مدیران شهری بوده است. ازاین‌رو، شناخت، ارزیابی و مدیریت مخاطرات و به دنبال آن تحلیل و نحوه برخورد با ریسک‌های موجود در پروژه‌های تونل‌های شهری، کمک شایانی به کاهش هزینه‌ها و مدیریت زمان در بحث مدیریت شهری خواهد نمود و جزء اقدامات اساسی و بنیادین در این زمینه است.

ازجمله مخاطراتی که ممکن است در حین مراحل طراحی، اجرا و بهره‌برداری متوجه تونل‌های شهری گردند، می‌توان به مواردی از قبیل خطرات ناشی از عدم شناخت وضعیت زیر سطح زمین و یکسان نبودن مشخصات لایه‌های خاک پیرامون تونل در طول مسیر (جنبه‌های زمین‌شناسی و ژیوتکنیکی)، روش اجرا (شامل روش حفاری، مقاومت پوشش، شاتکریت و ...)، خطاهای انسانی (در مرحله طراحی و حفاری)، شرایط ناشناخته وجود سفره‌های آب زیرزمینی و اطلاع از تراز دقیق آن‌ها، وجود گسل‌ها و

1- Threat

پتانسیل وقوع زلزله، احتمال نشت 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 تهران، وجود حفرات زیرزمینی مانند قنات‌ها، عدم اطمینان از موقعیت دقیق اجرای تاسیسات شهری در طول و عرض یک معبر، ازجمله آب، گاز، فاضلاب و تجهیزات الکتریکی (به دلیل عدم وجود نقشه‌های چون ساخت[1])، و احتمال وقوع مواردی از قبیل سیلاب، آتش‌سوزی، انفجار، خراب‌کاری که ایمنی و امنیت تونل را به مخاطره بیندازد، اشاره کرد. عدم شناخت، ارزیابی و مدیریت مخاطرات ذکرشده، ممکن است عواقب سنگین و گاهی جبران‌ناپذیری را در حین ساخت و بهره‌برداری تونل‌ها متوجه سطوح مختلف مدیریت شهری و شهروندان نماید (مصطفوی مقدم و آشتیانی، ۱۳۹۱).

۲-۱-۳-۱- گسیختگی و حالت‌های گسیختگی تونل‌ها

گسیختگی به منزله کاهش و یا از دست رفتن ظرفیت باربری یک جزء تونل و یا کل سازه تونل است. گسیختگی زمانی آغاز می‌شود که میزان تنش ایجادشده در مصالح و یا اعضا از مقاومت واقعی آن‌ها بیشتر شود که در این صورت موجب ایجاد تغییرشکل‌های بیش از حد مجاز در سازه، ترک‌خوردگی و یا شکست اعضا خواهد شد (مصطفوی مقدم و آشتیانی، ۱۳۹۱).

میزان گسیختگی اجزای یک تونل را می‌توان از قلوه‌کن شدگی موضعی[2] (یعنی، گسیختگی موضعی)، شکاف موضعی[3]، گسیختگی جزیی یا کلی تا گسیختگی پیش‌رونده[4] تقسیم‌بندی نمود (مصطفوی مقدم و آشتیانی، ۱۳۹۱).

زمانی که گسیختگی تونل و یا پوشش آن به صورت موضعی باشد، منجر به گسترش آسیب به محیط خاک اطراف تونل و یا ورود آب شده و در نهایت باعث ایجاد گسیختگی‌های کلی می‌گردد. اما در صورتی که ناپایداری، سازه‌های زیرزمینی مجاور را نیز در برگرفته و یا آسیب به سازه‌های سطحی نیز

1- As Built
2- Local Spalling
3- Local Breach
4- Progressive Failure

وارد شود، این نوع گسیختگی به عنوان گسیختگی پیش‌رونده محسوب می‌گردد. به عنوان مثال، وقوع سیلاب در زیرساخت‌های زیرزمینی شبکه حمل‌ونقل را نیز می‌توان به عنوان گسیختگی پیش‌رونده در نظر گرفت (مصطفوی مقدم و آشتیانی، ۱۳۹۱).

۲-۱-۳-۲- مثال‌هایی از گسیختگی و آسیب‌های وارده به تونل‌های مترو

تونل‌های حمل‌ونقل شهری در زمان بهره‌برداری همواره با خطرها و مخاطراتی همراه هستند که برخی از آنها در ادامه ذکر خواهد شد.

الف- زلزله کوبه ژاپن

وقوع زلزله سال ۱۹۹۵ هیوگوکن-نامبو[1] باعث انهدام ایستگاه مترو دایکای[2] در کوبه ژاپن شد. در طراحی ایستگاه در سال ۱۹۶۲ بحث‌های لرزه‌ای در نظر گرفته نشده بود. این سازه اولین سازه زیرزمینی مدرنی است که در حین وقوع زلزله دچار گسیختگی شد. شکل ۲-۱ 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 است.

شکل ۲-۱: ستون‌های آسیب دیده ایستگاه مترو(مصطفوی مقدم و آشتیانی، ۱۳۹۱)

1- Hyogoken-Nambu
2- Daikai

شکل ۲-۲ فرونشست سطح زمین در نتیجه ریزش سقف تونل متروی دایکا در شهر کوبه ژاپن را نشان می‌دهد.

شکل ۲-۲: فرونشست سطح زمین در نتیجه گسیختگی در ایستگاه مترو دایکای(مصطفوی مقدم و آشتیانی، ۱۳۹۱)

ب- ورود آب به تونل‌های متروی شهر نیویورک

در سال ۲۰۱۲ در پی وقوع سیل بر اثر طوفان سندی در نیویورک متروی این شهر دچار آب‌گرفتگی شد و هفت تونل از متروی این کلان‌شهر را در بر گرفت. مدیر حمل‌ونقل متروی این شهر گفت متروی این شهر صد و هشت سال قدمت دارد و تاکنون با چنین فاجعه ویرانگری مواجه نشده بود. متروی این شهر تا چند روز فعالیت خو را از دست داد و خسارت‌هایی به سازه آن وارد شد (عبدالله پور، ۱۳۹۲).

پ- آتش‌سوزی در تونل مترو باکو

در پی آتش‌سوزی در تونل مترو باکو، به دلیل بروز نقص الکتریکی در سیستم‌های راهبردی، ۳۱۱ نفر جان خود را از دست دادند و خسارت‌های فراوانی به سازه تونل و ایستگاه وارد شد و سبب تعطیلی چند روزه این خط شد. خلاصه‌ایی از این آتش‌سوزی در جدول۲- ۱ آورده شده است.

جدول۲- ۱: آتش‌سوزی در مترو باکو (حسین‌دخت، ۱۳۹۲)

موقعیت	باکو، آذربایجان
زمان وقوع	سال ۱۹۹۹
طبقه‌بندی حادثه	آتش‌سوزی به دلیل نقص الکتریکی سیستم راهبردی
طول تونل	به طور دقیق مشخص نیست
تعداد کشته‌ها	۳۱۱ نفر

ت- آتش‌سوزی در تونل مترو دیگو

در پی آتش‌سوزی عمدی شکل گرفته در تونل مترو دیگو، ۹۱ نفر جان خود را از دست دادند و خسارت‌های فراوانی به سازه تونل وارد شد و فعالیت این خط را برای چند روز متوقف کرد. خلاصه‌ایی از این آتش‌سوزی در جدول۲- ۲ آورده شده است.

جدول۲- ۲: آتش‌سوزی در مترو دیگو (حسین‌دخت، ۱۳۹۲)

موقعیت	دیگو، کره جنوبی
زمان وقوع	سال ۱۹۹۸
طبقه‌بندی حادثه	آتش‌سوزی عمدی
طول تونل	به طور دقیق مشخص نیست
تعداد کشته‌ها	۹۱ نفر

ث- ورود آب به تونل خط ۴ مترو تهران

ورود آب در سال ۱۳۹۱ به تونل خط ۴ مترو تهران به دلیل سیلاب ناشی از رودخانه جنب تونل مترو سبب تعطیلی چند روزه مترو و انجام عملیات آبکشی شد. در شکل ۲-۳ این آب گرفتگی مشاهده می‌شود.

شکل ۲-۳: ورود آب به تونل خط ۴ مترو تهران (zabanzad.mihanblog.com)

۲-۲- قابلیت اطمینان

مهندسان و مدیران فنی در هر جامعه مدرن مسوول برنامه‌ریزی، طراحی، ساخت و بهره‌برداری از ساده‌ترین محصول تا پیچیده‌ترین سیستم‌ها هستند. از کار افتادن و خرابی سیستم‌ها موجب وقوع اختلال در سطوح مختلف شده و به عنوان تهدیدی جدی برای جامعه و محیط زیست تلقی می‌شود. از این رو مصرف کنندگان و به طور کلی مردم جامعه انتظار دارند که محصولات و سیستم‌ها پایا، اطمینان بخش و ایمن باشند. بنابراین به عنوان یک پرسش اساسی همواره این مسأله مطرح است که قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم در طول مدت بهره‌برداری از آن چقدر است؟

قابلیت اطمینان یک شاخص مهندسی عمومی برای ارزیابی اطمینان از عملکرد مناسب سیستم‌های مختلف مهندسی است. این شاخص به طور بسیار گسترده‌ای در تمامی شاخه‌های علمی و فنی از جمله مهندسی هوافضا، مهندسی تسلیحات نظامی، مهندسی مخابرات، نیروگاه‌های اتمی و شبکه‌های جریان از جمله شبکه‌های حمل و نقل و شبکه‌های انتقال برق مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۲-۱- تاریخچه قابلیت اطمینان

مهندسی قابلیت اطمینان، به عنوان یک گرایش جداگانه از مهندسی نظامی در سال ۱۹۵۰ در

ایالات متحده آمریکا بنیان‌گذاری شد. پیچیده و گسترده شدن سیستم‌های الکترونیکی صنایع نظامی باعث افزایش نرخ شکست و در نتیجه کاهش دسترس‌پذیری و در نهایت باعث افزایش هزینه‌ها می‌شود. بر اساس مطالعات دراز مدت پایگاه تکنولوژی صلب با کوچک شدن قطعات در صنایع الکترونیکی و پیچیدگی سیستم‌ها قابلیت اطمینان کاهش می‌یابد. گسترش استفاده از قطعات کوچک الکترونیکی به منظور توسعه صنایع الکترونیکی نظامی، استفاده از قطعات جدید را اجتناب‌ناپذیر کرده و همین امر سبب کاهش قابلیت اطمینان می‌شود. لزوم استفاده از تجهیزات الکترونیکی و هزینه تعمیر و نگهداری به طور جدی بر قابلیت اطمینان تاثیر دارد. با این پیش‌زمینه وزارت دفاع آمریکا و صنایع الکترونیکی این کشور گروه مشورتی قابلیت اطمینان صنایع الکترونیکی آگری[1] را در سال ۱۹۵۲ تاسیس نمودند.

گزارش‌های آگری این‌گونه بیان شد که حرکت رو به جلو توسعه قطعات الکترونیکی همگام با افزایش هزینه‌ها بوده و هر دوی این موارد سبب کاهش قابلیت اطمینان می‌گردند، به طوری‌که در نتیجه این افزایش هزینه و کاهش قابلیت اطمینان صنایع نظامی بایستی فعالیت خود را از تجهیزات جدید برای هزاران ساعت تحت شرایط متغیر محیطی چون بالا و پائین شدن درجه حرارت، ارتعاشات و فعال و غیرفعال کردن مورد آزمایش واقع شوند تا نقاط ضعف اصلی شناسایی شده و در نتیجه تولید اصلی اصلاح شود، به گونه‌ای که ساعت‌ها آزمایش صورت می‌گرفت تا بهترین شرایط برای تولیدات بهتر شناسائی شود (رضایی، ۱۳۸۹).

گزارش‌های آگری از طرف وزارت دفاع مورد قبول واقع شد و در مدت زمان کوتاه این آزمایش‌ها تبدیل به یک دستورالعمل استاندارد شد. شرکت‌هایی که ملزم به انجام آزمایش‌های گران قیمتی به شیوه سنتی بودند به زودی دریافتند که با استفاده از این استاندارد می‌توانند قابلیت اطمینان بالاتری با هزینه کمتری به دست آورند.

به هر حال نتایج حاصله از کار افراد ژاپنی را می‌توان در نمایشگاه‌ها، مغازه‌ها، ادارات و کارخانه‌ها

1- Agree

به وضوح مشاهده کرد. امروزه از تمام وسایلی که استفاده می‌شود قابلیت اطمینان بسیار بالایی انتظار می‌رود. سیستم‌های پیشرفته از جمله تجهیزات خانگی، اتومبیل و فضاپیماها قابلیت اطمینان بسیار بالاتری نسبت به سیستم‌های مشابه نسبت به ۲۰ یا ۳۰ سال قبل دارند. این توسعه مدیون اصول مدیریت کیفیت جامع و بهبود پیوسته است به گونه‌ای که بسیاری از روش‌های قبلی استاندارد سازی در آمریکا کاملاً کاربرد خود را از دست داده‌اند (Conner, 2003).

بخش دیگری از قابلیت اطمینان که امروزه بسیار مورد توجه واقع شده است جنبه آماری دارد. زمانی می‌توان قابلیت اطمینان را به صورت احتمال بیان کرد که تاثیرپذیر از متغیرها باشد. از طرفی کلیه متغیرها در مهندسی جنبه غیر قطعی داشته و روش قطعی و کمی در این زمینه نامناسب و گمراه کننده خواهند بود.

۲-۲-۲- تعریف قابلیت اطمینان

تعریف قابل قبولی که از قابلیت اطمینان به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته، توانایی یک بخش (برای مثال یک سیستم تولید) برای انجام دادن عملیاتی که به آن بخش تخصیص داده شده در دوره زمانی از پیش تعیین شده و یا یک چرخه است. این توانایی را می‌توان هم به صورت احتمالاتی و هم به صورت قطعی معرفی کرد (Modarres et al.,1999).

در روش قطعی به این سوالات پاسخ داده می‌شود که چرا و چگونه شکست روی داده است و چگونه می‌توان بر اساس رویدادهای اتفاق افتاده، رویدادهای مجدد را طراحی و آزمایش کرد تا از شکست‌های بعدی جلوگیری شود. این روش شامل آنالیزهای قطعی و مرور گزارش‌های مربوط به شکست، شناخت شرایط فیزیکی شکست، نقش و درجه آزمایش، بازرسی و تشکیل طرح‌های مجدد و یا بازشناختی شرایط است.

قابلیت اطمینان از جنبه های احتمالاتی به صورت رابطه ۲-۲ تعریف شده است:

$$R(t) = P_r(T \geq t \mid C_1, C_2, \ldots) \qquad (۲-۲$$

که در آن:

t: دوره زمانی مشخص یا چرخه‌های در نظر گرفته شده به منظور انجام عملیات یک بخش

T: زمان شکست یا چرخه شکست بخش

R(t): قابلیت اطمینان بخش

$C_1, C_2,...$: عوامل وابسته،مثل شرایط محیطی

اغلب در عمل، C_1, C_2 و ... در تحلیل احتمال قابلیت اطمینان به صورت مجازی در نظر گرفته می‌شوند، با این فرض رابطه ۲-۲ به صورت رابطه ۲-۳ خلاصه می‌گردد.

$$R(t) = P_r(T \geq t) \qquad (۳-۲$$

قابلیت اطمینان نسبی (احتمالاتی) شاخصی خواهد بود تا با اطمینان معینی از نا اطمینانی‌های آینده برای حصول قابلیت اطمینان مطلق بحث شود. بدین وسیله با اعمال تغییراتی در مشخصات یک طرح یا سیستم، تغییرات قابلیت اطمینان نیز به طور نسبی سنجش‌پذیر می‌شود (Billinton & Allan, 1992).

نوع پیش‌بینی قابلیت اطمینان بستگی به شاخص‌های اطلاعاتی مورد نیاز دارد. روش‌های پیش‌بینی، اطلاعاتی در خصوص عملکردهای آینده سیستم در اختیار می‌گذارد. آینده نیز زمانی است وابسته به نوع سیستم و ممکن است کسری از ثانیه برای عملکرد یک موشک زمین به هوا و یا چند دهه مانند آنچه برای عملکرد نیروگاه‌های برق مطرح است، باشد. عملکرد یک سیستم در هیچ موردی به صورت قطعی قابل تعریف نیست و دارای طبیعت اتفاقی بوده و به صورت اتفاقی در تغییر است. ارزیابی فرآیندهای اتفاقی صرفا با شیوه‌های احتمالات میسر است.

تئوری احتمالات به تنهایی قادر به پیش‌بینی قابلیت اطمینان و یا ایمنی یک سیستم نیست و باید درک کاملی از سیستم، طرح آن، طریقه عمل و از کار افتادن آن، محیط عمل و تنش‌هایی که تحت

آن شرایط واقع می‌شود در اختیار داشت. بنابراین تئوری احتمالات فقط ابزاری است تا به وسیله آن اطلاعات یک سیستم را تبدیل به پیش‌بینی عملکرد احتمالی نمود.

تعیین معیار عملکرد رضایت بخش خود یک مساله مهندسی است. از کار افتادگی در یک سیستم ممکن است به شکل‌های مختلف اتفاق اُفتد و آن مشتمل است بر:

۱. از کار افتادگی فاجعه‌آمیز.
۲. از کار افتادگی عمده.
۳. تنزل مشخصات از یک حدود معین (به عنوان مثال خروجی یک پمپ مکانیکی ممکن است از یک حداقل مجاز کمتر شود در حالی که هنوز همچنان در حال کار باقی باشد).

شاخص کلاسیک قابلیت اطمینان، همان‌گونه که ذکر شد احتمال وقوع از کار افتادگی است، ولی شاخص‌های متعدد دیگری نیز امروزه برای این منظور به کار می‌رود که بستگی به نوع سیستم و الزامات عمل آنها دارد. بنابراین قابلیت اطمینان به عنوان نام عمومی[1] برای بسیاری از این شاخص‌هایی که به عنوان مثال مواردی از آن نام برده شده است.

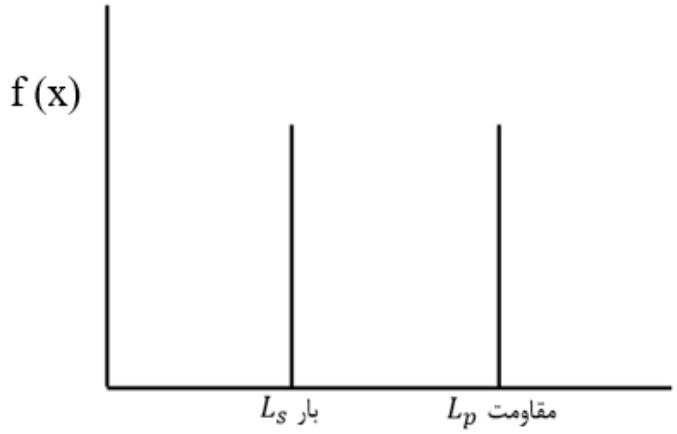
۱. تعداد انتظار از کار افتادگی در یک محدوده زمان معین.
۲. میانگین زمان بین از کار افتادگی‌ها[2].
۳. کاهش انتظاری در خروجی سیستم ناشی از انواع از کار افتادگی‌ها.

این شاخص‌ها هر یک با استفاده از تئوری مربوطه از بحث قابلیت اطمینان ارزیابی‌پذیر می‌باشند و انتخاب آنها بستگی به نوع مسأله خواهد داشت.

عوامل موثر بر مسایل چه از نوع قطعی باشد و یا از نوع غیر قطعی (احتمالی)، حدود مشخصی را برای کاربرد تعیین خواهند کرد. به عنوان مثال حد معینی برای یک مشخصه عملکرد معرفی می‌شود. مطابق شکل ۲-۴ گفته می‌شود مشخصه عملکرد "L_p" محدود به یک حد بالایی "L_s" است در صورتی

1-Generic Name
2- Mean Time Betwee Failure

که نامعادله $L_s < L_p$ برقرار باشد آنگاه سیستم دارای ایمنی خواهد بود.

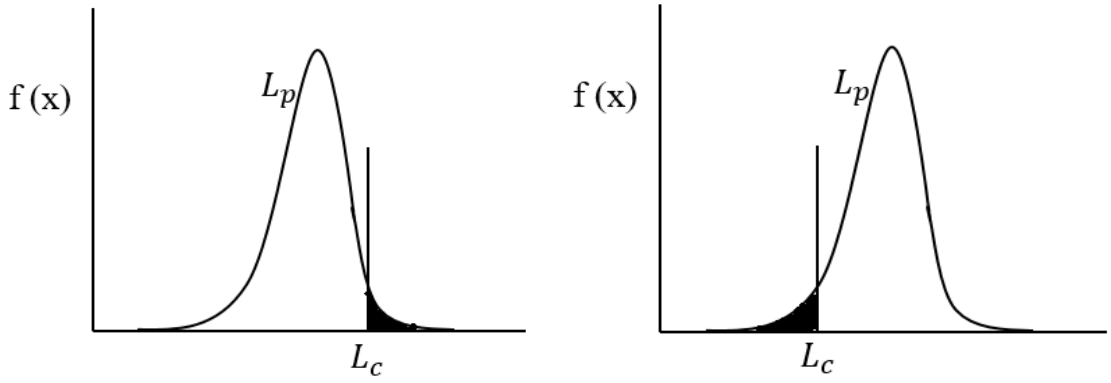


شکل ۲-۴: مقادیر قطعی بار و مقاومت (Billinton & Allan, 1992)

البته این روش بسیار ساده انگارانه است زیرا طبیعت بارگذاری و مقاومت هر دو همراه با تغییرات است و از این رو است که برای تحلیل مسایل از ضریب اطمینان استفاده می‌شود. بدین مفهوم که همواره مقاومت "x" برابر یا بزرگتر از بارگذاری در نظر گرفته می‌شود تا عملاً سیستم همواره کفایت مورد انتظار را داشته باشد. یعنی مطابق شکل ۲-۴، همواره مشخصه عملکرد و سطح قابل قبول آن با یک فاصله[1] معین جدا نگه داشته می‌شود. با این روش البته علی‌رغم ماهیت متغیر و تغییرپذیر، احتمال تغییرات ملحوظ نمی‌گردد و بنابراین با ضریب اطمینانی که به کار می‌رود ممکن است به علت تغییرپذیری و پراکندگی کم برای این دو مشخصه، ایمنی بیش از حد و غیر اقتصادی برای سیستم نتیجه شود و بالعکس ممکن است به علت تغییرپذیری زیاد ایمنی سیستم ناکافی باشد.

در شکل ۲-۵ ملاحظه می‌شود که مشخصه عملکرد با تابع احتمال L_p بیان شده و حد ثابت L_c نیز در آن نمایش داده شده است. محدوده مشکل آفرین مساحت زیر منحنی است و می‌تواند برحسب نوع مسأله در سمت چپ و یا سمت راست حد مقرر شده قرار داشته باشد.

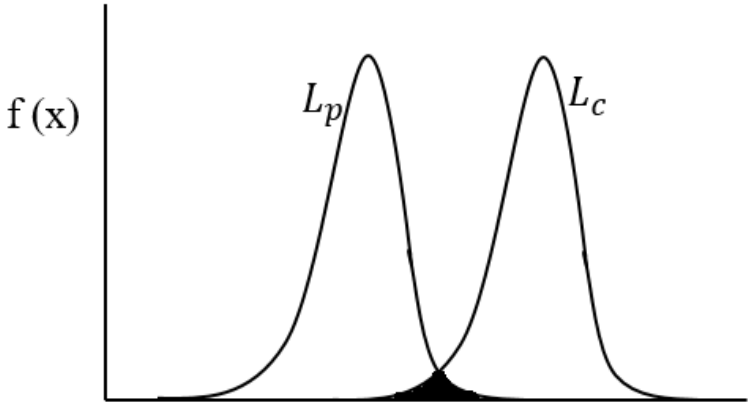
1- Margin



شکل ۲-۵: مقدار احتمالی L_p همواره با مقدار قطعی L_c (Billinton & Allan, 1992)

روش ارایه شده با شکل ۲-۵ زمانی مناسب است که یکی از دو عامل الزاماً با تابع احتمال بیان شوند. شکل ۲-۶ نشان می‌دهد که در مسأله‌ای که مقاومت مکانیکی یک قطعه تحت بارگذاری مطرح است چگونه باید بررسی انجام گیرد. بدیهی است که سیستم در ناحیه تلاقی منحنی‌ها ایمنی نداشته و عدم کفایت محرز است.

این محدوده با شیوه‌های علم احتمالات قابل ارزیابی و کمیت سنجی است. در هر یک از روش‌های فوق با ارزیابی احتمال، ناحیه عدم کفایت مورد کنترل قرار می‌گیرد تا از حدود معین و تجربه شده‌ای کمتر باشد. کاستن احتمال یا سوق دادن مساحت این ناحیه به مقدار صفر غیر ممکن است زیرا موجب هزینه‌های بسیار سرسام آور خواهد شد (Billinton & Allan, 1992).



شکل ۲-۶: مقادیر احتمالی L_c و L_p (Billinton & Allan, 1992)

۲-۲-۳- توابع کلی قابلیت اطمینان

روابط ارایه شده به منظور محاسبه قابلیت اطمینان شرایط خاصی را در بر نداشته بنابراین برای هر گونه توزیع احتمال مناسب، روابط زیر به منظور تحلیل قابلیت اطمینان قابل استفاده است. با تعریف N_o به عنوان تعداد عضوهای متناظری که مورد آزمون مشخص قرار می‌گیرد و همچنین:

$N_s(t)$: تعداد عضوهای سالم در مدت زمان t

$N_f(t)$: تعداد عضوهای معیوب شده در مدت زمان t

$$N_s(t) + N_f(t) = N_0 \qquad (۴-۲$$

رابطه ۲-۵ برای محاسبه قابلیت اطمینان تا هر زمان معین t ارایه شده است.

$$R(t) = \frac{N_s(t)}{N_o} = \frac{N_o - N_f(t)}{N_o} = 1 - \frac{N_f(t)}{N_o} \qquad (۵-۲$$

به طور مشابه برای احتمال از کار افتادن رابطه ۲-۶ ارایه شده است.

$$Q'(t) = \frac{N_f}{N_o}$$

$$\frac{dR(t)}{dT} = \frac{-dQ'(t)}{dt} = -\frac{1}{N_o}\frac{dN_f(t)}{dt} \qquad (۶-۲$$

در شرایطی که $dt \to 0$ آنگاه رابطه (۲-۷) برقرار خواهد بود.

$$f(t) = \frac{1}{N_o}\frac{dN_f(t)}{dt} \qquad (۷-۲$$

رابطه ۲-۷ مبین معادله آهنگ زمانی از کار افتادن $\lambda(t)$ است. بیشترین کاربرد را در ارزیابی قابلیت اطمینان تابع آهنگ وقوع خطر[1] ، تابع آهنگ زمانی از کار افتادن[2] ، تابع آهنگ زمانی تعمیر[3]، یا آهنگ

1- Hazard Rate Funtion
2- Failure Rate funtion
3- Repair Rate funtion

ویژه از کار افتادن[1] دارد. این تابع را با بیان ریاضی آهنگ گذرا[2]، با سهولت بیشتری برای مدلسازی در بررسی و توصیف از کار افتادن می‌توان به کار برد. از این رو نام‌گذاری آهنگ وقوع خطر[3] مناسبت بیشتری می‌یابد و با نماد λ(t) نمایش داده می‌شود. بنابراین آهنگ وقوع خطر مبین آهنگ وقوع از کار افتادن صرفا بر مبنای تعداد از کار افتادگی در واحد زمان به دست نمی‌آید زیرا بستگی به بزرگی نمونه از نظر تعداد نیز دارد. به عنوان مثال تعداد از کار افتادگی در طی زمان معین در یک نمونه حاوی ۱۰۰ عضو مشابه کمتر از نمونه‌ای با ۱۰۰۰ عدد از همان عضوها است. از طرف دیگر ممکن است تعداد از کار افتادگی در طی زمان معین برای نمونه‌های ۱۰۰تایی و ۱۰۰۰تایی به لحاظ تفاوت در شرایط کار این نمونه‌ها مقادیر یکسانی شود، که در این حالت آهنگ وقوع خطر برای نمونه کوچکتر بیشتر است. بنابراین آهنگ وقوع خطر به تعداد از کار افتادگی در یک دوره زمانی معین و همچنین به تعداد عضوهای در معرض از کار افتادن بستگی خواهد داشت و با بیان ریاضی خواهیم داشت (Billinton & Allan,1992).

$$\lambda(t) = \frac{\text{تعداد از کار افتادگی در واحد زمان}}{\text{تعداد عضوهای در معرض از کار افتادن}} \qquad (۸-۲$$

معادله ۲-۸ مبنای تعیین تابع‌های قابلیت اطمینان است.

بنابراین توابع چگالی احتمال از کار افتادن و آهنگ وقوع خطر در لحظه $t = 0$ و فقط در این لحظه متناظر یکدیگر هستند، بیان ریاضی تابع آهنگ وقوع خطر در زیر آورده شده است:

$$\lambda(t) = \frac{1}{N_S(t)} \cdot \frac{dN_f}{dt} \qquad (۹-۲$$

$$= \frac{N_o}{N_c}\frac{1}{N_S(t)} \cdot \frac{dN_f(t)}{dt} = \frac{N_o}{N_S(t)}\frac{1}{N_c}\frac{dN_f(t)}{dt} = \frac{1}{R(t)} \cdot f(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

بنابراین:

1- Age Specific Failure Rate
2- Transition Rate
3- Hazard Rate

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} \qquad (۱۰-۲$$

معادله آهنگ وقوع خطر در زمان $t = 0$ نشان می‌دهد، $\lambda(t) = f(0)$ چون در $R(t) = 1$ و همچنین این معادله نشان می‌دهد که آهنگ بروز خطر یک تابع شرطی بر حسب تابع چگالی احتمال از کار افتادن و شرط آن تابع بقا است. بیان فیزیکی رابطه فوق بدین مفهوم است که تابع چگالی احتمال از کار افتادن امکان تعیین احتمال از کار افتادن را در هر فاصله زمانی برای آینده فراهم می‌آورد در حالی که آهنگ وقوع خطر امکان این کار را برای فاصله زمانی بعدی مشروط بر عدم وقوع شکست تا زمان t فراهم می‌کند. بیان ریاضی تابع آهنگ وقوع خطر، معادل تابع چگالی احتمال از کار افتادن صرفا محدود به زمان مورد نظر t است. از آنجایی که مساحت زیر منحنی تابع چگالی احتمال از کار افتادن کمتر از واحد است، این قسمت از تابع به عدد واحد باز گردانده شده و به اصطلاح نرمالیزه می‌گردد. این کار با تقسیم کردن تابع چگالی احتمال از کار افتادن به مساحت زیر این منحنی برای دوره زمانی پس از مقطع زمان مورد بررسی انجام می‌گیرد. یعنی:

برای زمان محدود به t :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{\int_t^{\infty} f(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \qquad (۱۱-۲$$

بنابراین برای تعیین قابلیت اطمینان:

$$\int_1^{R(t)} \frac{1}{R(t)} dR(t) = \int_0^t \lambda(t)\, dt \qquad (۱۲-۲$$

$$\ln R(t) = \int_{\cdot}^{t} -\lambda(t)\, dt$$

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t)\, dt\right)$$

و در شرایط ویژه‌ای که λ مستقل از زمان و مقداری ثابت باشد:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \qquad (۱۳-۲$$

این شکل از تابع به نام توزیع نمایی منفی شناخته می‌شود.

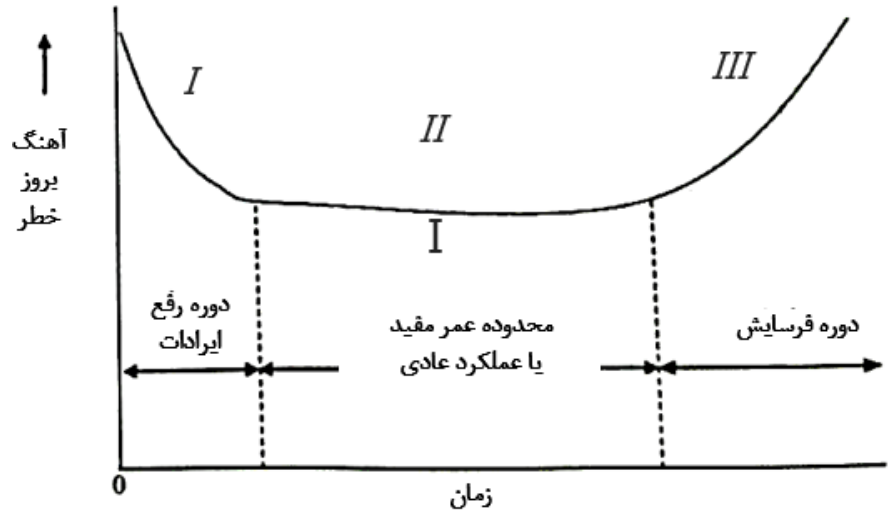
۲-۲-۳-۱- شکل توابع قابلیت اطمینان

برای بسیاری از عضوهای فیزیکی شکل منحنی آهنگ وقوع خطر تقریباً صادق است. این شکل در شباهت با وان حمام[1] با همین نام قابل تقسیم به سه ناحیه است. ناحیه I با نام‌های مختلفی چون، مرگ و میر نوزادی یا مرحله وقوع اشکالات اولیه[2] شناخته شده و علت آن می‌تواند خطاهای ساخت و یا طراحی نامناسب باشد. در این ناحیه آهنگ وقوع خطر به عنوان تابعی از زمان روند نزولی دارد.

ناحیه II با نام‌های دوره مفید[3] و یا مرحله عملکرد عادی[4] شناخته شده و ویژگی آن ثابت ماندن آهنگ وقوع خطر است. وقوع شکست در این ناحیه صرفا تصادفی است. این تنها ناحیه‌ای است که از توزیع نمایی برای ارزیابی قابلیت اطمینان می‌توان استفاده کرد.

ناحیه III با نام‌های مرحله فرسایش و یا خستگی[5] شناخته شده و مشخصه‌ی آن روند شدید افزایش آهنگ وقوع خطر بر حسب زمان می‌باشد. این سه مرحله در شکل ۲-۷ در ارایه تابع چگالی احتمال از کار افتادن به وضوح نمایان است. ناحیه II با تقریب خوبی از منحنی نمایی با توان منفی پیروی می‌کند که به صورت خط چین، نمایش داده شده است (رضایی، ۱۳۸۹).

1- Bathtub Curve
2- Debugging Phase
3- Useful Life Period
4- Normal Operating Phase
5- Wear Out Or Fatigue Phase



شکل ۲-۷: نمونه‌ای از تغییرات آهنگ وقوع خطر بر حسب سن کارکرد قطعات الکترونیکی (Billinton & Allan,1992)

در اوایل عمر سیستم (بازه شروع کار)، ابعاد فنی و مشخصات عملیاتی بخش‌های مختلف سیستم برای اپراتور به طور کامل مشخص نبوده و رفتار سیستم تا حدودی برای کاربر ناشناخته است. این امر در اوایل عمر سیستم باعث بروز خرابی‌ها و توقف‌هایی در تولید می‌شود. همچنین کنترل کیفیت ضعیف، مواد و لوازم یدکی غیر استاندارد، نقاط ضعف موجود در ساخت یک سیستم، رفع نقص و تعمیر نامناسب و خطاهای انسانی از جمله دلایل دیگر بالا بودن نرخ خرابی در اوایل عمر سیستم است (Dhillon, 2008).

مدتی پس از شروع و راه اندازی دستگاه، نرخ خرابی با گذشت زمان کمتر می‌شود. در اواسط عمر دستگاه با توجه به شناخت کافی کاربر از دستگاه و همچنین برنامه‌ریزی صحیح برای تعمیر و نگهداری، دستگاه از نظر خرابی به پایداری نسبی رسیده و نرخ خرابی در بازه زمانی کار مفید تقریباً ثابت می‌ماند. با نزدیک شدن به انتهای عمر دستگاه، کلیه بخش‌های دستگاه دچار فرسودگی و کاهش کیفیت می‌شوند. در نتیجه قطعات دستگاه دچار خرابی‌های غیر ملموس شده و قطعات تحت سرعت و تنش‌های بالاتر از توان قرار می‌گیرند و با گذشت زمان نرخ خرابی دستگاه افزایش می‌یابد.

۲-۲-۳-۱-۱- توزیع نمایی[1] منفی

متغیر تصادفی t دارای توزیع نمایی است اگر رابطه زیر برقرار باشد:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \qquad t \geq 0 \, , f(t) = 0 \text{ for } t < 0 \, ; \lambda > 0 \qquad (۱۴-۲$$

توزیع نمایی دارای نرخ ثابتی برابر با مقدار λ است. این عامل به عنوان یکی از مشخصه‌های اصلی توزیع نمایی است که سایر توابع توزیع فاقد نرخ خرابی ثابت هستند. توزیع نمایی به طور گسترده در مهندسی قابلیت اطمینان استفاده می‌شود.

۲-۲-۳-۱-۲- توزیع ویبل[2]

توزیع ویبل به عنوان حالت عمومیت یافته توزیع نمایی شناخته می‌شود. متغیر تصادفی t دارای توزیع ویبل است اگر رابطه زیر برقرار باشد:

$$f(t) = \lambda\beta(\lambda t)^{\beta-1} \, e^{-(\lambda t)^{\beta}} \qquad t \geq 0 \, , f(t) = 0 \text{ for } t < 0 \, ; \lambda, \beta > 0 \qquad (۱۵-۲$$

در این توزیع λ عامل مقیاس و β عامل شکل توزیع هستند. در حالت $\beta = ۱$ توزیع ویبل به توزیع نمایی تبدیل می‌شود. برای $\beta > ۱$، نرخ خرابی $\lambda(t)$ به طور یکنواخت[3] افزایش می‌یابد. برای $\beta < ۱$، نرخ خرابی $\lambda(t)$ به طور یکنواخت کاهش می‌یابد.

۲-۲-۳-۱-۳- توزیع لاگ نرمال

تابع توزیع لاگ نرمال یکی دیگر از توزیع‌های مهم و پرکاربرد در علم آمار و قابلیت اطمینان است. این توزیع دارای دو عامل عمده بوده و توسط تابع زیر تعریف می‌شود:

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} \, e^{-\frac{(\ln \lambda t)^2}{2\sigma^2}} \qquad t \geq 0 \, , f(t) = 0 \text{ for } t < 0 \, ; \lambda, \beta > 0 \qquad (۱۶-۲$$

1- Exponential
2- Weibull
3- Monotonically

۲-۲-۳-۱-۴- توزیع نرمال

توزیع احتمال نرمال به نام توزیع احتمال گوسی[1] نیز نامیده می‌شود و از مهم‌ترین و متداول‌ترین توزیع‌های مورد استفاده در آمار و احتمال است. اگر چه در ارزیابی قابلیت اطمینان نیز کاربردهای نسبتاً مهمی دارد ولی در مباحث دیگر از اهمیت بیشتری برخوردار است. تابع چگالی در توزیع نرمال حول مقدار میانگین کاملاً متقارن است. پراکندگی نتایج نسبت به این مقدار توسط انحراف استاندارد سنجیده می‌شود و بنابراین شکل دقیق و موقعیت تابع چگالی احتمال با این دو شاخص به طور کامل قابل تعیین است. همین دو شاخص در سایر توزیع‌های احتمال نیز تعیین‌کننده است و باید توجه داشت در جایی که صرفا این دو شاخص ذکر می‌شود تنها توزیع نرمال مفروض قرار نگیرد.

۲-۲-۳-۱-۵- توزیع مثلثی[2]

متغیر تصادفی توزیع مثلثی t مقادیر موجود در بازه $S = [a , b]$ را اختیار می‌کند. احتمال در زیر بازه $[a , c]$ به صورت خطی افزایش می‌یابد و احتمال در زیر بازه $[c , b]$ به صورت خطی کاهش می‌یابد. بنابراین تابع چگالی این متغیر دارای شکل مثلثی است. توزیع مثلثی را با نماد Tria(a,c,b) نشان می‌دهند و تابع چگالی آن به صورت زیر به دست می‌آید:

$$f(t) = \frac{2(t-a)}{(b-a)(c-a)} \quad c \geq t \geq a \;;\; f(t) = \frac{2(b-t)}{(b-a)(b-c)} \quad b \geq t \geq c \;;\; f(t) = 0 \quad for\ t > b \qquad (۲-۱۷)$$

۲-۳- روش قضاوت توسط کارشناسان[3]

به منظور بررسی میزان اهمیت هر یک از عوامل مورد بحث بر پایداری تونل در زمان بهره‌برداری، می‌توان از روش‌های آماری مختلف در آنالیز داده‌های مربوط به تونل‌های قبلی که دچار شکست شده‌اند استفاده کرد، در صورت عدم دسترسی به این نوع داده‌ها می‌توان از روش قضاوت کارشناسان استفاده کرد.

1- Gaussian distribution
2- Triangular distribution
3- Experts Judgement

این روش را می‌توان زمانی که در مورد موضوع تخصصی مورد نظر، دسترسی به هیچ داده‌ای نیست جایگزین روش‌های آماری کرد. نظرات کارشناسان در مورد یک پرسش تخصصی نشان دهنده دانش و تجربه کارشناس در زمان پاسخ گویی هستند. نظراتی که از جانب کارشناسان ارایه می‌شود به طور کلی براساس تجربه و دانش آنها در زمینه تخصصی مطرح شده است.

این روش فقط محدود به پاسخ‌های کارشناسان براساس حدس و گمان‌های اولیه نیست، بلکه شامل تمام نتایج به‌دست آمده از تجزیه و تحلیل‌های ذهنی کارشناسان براساس فرضیات، تعاریف و الگوریتم‌های موجودی است که کارشناس توسط آنها نظر خود را ارایه می‌دهد(Ortiz et all.,1991). این روش در زمینه‌های مختلف از جمله مهندسی هسته‌ایی، تحقیقات هواشناسی، هوافضا، محیط زیست، تحلیل ریسک و ایمنی عملیات نفت و گاز و ... کاربرد دارد (Purba 2014; Moon and Kang 1999; Clemen and Winkler 1999).

۲-۳-۱- فرآیند جمع‌آوری نظرات کارشناسان

نظر بیان شده توسط کارشناسان ممکن است، نشان دهنده‌ی جایگاه علمی کارشناسان در موضوع تخصصی مورد نظر در زمان نظرخواهی باشد (Meyer & Booker, 1991). ماهیت نظرات کارشناسان همواره با عدم قطعیت‌هایی همراه است به دلیل اینکه در مورد وقوع یک پدیده که ممکن است در آینده رُخ دهد بحث صورت می‌گیرد، بنابراین برای جمع‌آوری نظرات کارشناسان و استفاده از آنها برای مساله مورد بحث لازم است از یک روند قراردادی پیروی کرد، به دلیل اینکه نظرات کارشناسان برای بررسی کردن مساله تحقیق با عدم قطعیت همراه هستند.

روند قراردادی برای جمع‌آوری نظرات کارشناسان دارای سه مرحله است (Cooke 1991; Frecnch 1985; Bedford & Cooke 2001):

مرحله یک: انتخاب کارشناسان

مرحله دو: جمع‌آوری نظرات کارشناسان

مرحله سه: ترکیب کردن نظرات کارشناسان

۲-۳-۱-۱- انتخاب کارشناس

به منظور انتخاب کارشناس می‌توان به تعریف متخصص ارایه شده از دیدگاه مایر[1] و بوکر[2] به عنوان ((فردی که دارای سابقه و تجربه کار در صنعت مورد نظر است و توسط همکارانش به رسمیت شناخته شده است و یا افرادی که تجربه انجام پژوهش مشابه با موضوع مورد نظر را دارند.)) اشاره کرد (Meyer & Booker, 1991).

علاوه بر انتخاب کارشناسان با استفاده از تعریف ارایه شده توسط مایر و بوکر، برای انتخاب کارشناسان می‌توان از معیارهایی در ارتباط با سابقه کارشناسان در رابطه با موضوع مورد نظر استفاده کرد. این امر باعث جلوگیری از تاثیر بیش از حد یک فرد در نظرخواهی می‌شود (Meyer & Booker 1991; Mannan 2012).

۲-۳-۱-۲- جمع‌آوری نظرات کارشناسان

برای جمع‌آوری نظرات کارشناسان می‌توان از روش‌های ارتباطی (از طریق ایمیل، تماس تلفنی، حضوری و غیره) استفاده کرد (Meyer & Booker, 1991). نظرات کارشناسان ممکن است تحت تاثیر روش جمع‌آوری نظرات کارشناسان و اطلاعات و مفروضاتی که کارشناسان برای بیان نظرات خود در نظر می‌گیرند، قرار گیرند، بنابراین یک نظرسنجی خاص باید بر اساس اهداف مطالعه و روش جمع‌آوری نظرات کارشناسان انجام شود(Cooke 1991; Frecnch 1985; Bedford & Cooke, 2001; Mosleh 1987).

نظرات کارشناسان ممکن است در شکل‌های مختلف مانند، مقادیر احتمالی واحد یا مجموعه‌ای از مقادیر احتمالی یا توزیع احتمال و یا عوامل توزیع و ... بیان شود، بنابراین به جای ارزیابی تک نقطه (تک مرحله‌ای)، بعضی از کارشناسان ممکن است ترجیح دهند نظر خود را همراه با عدم قطعیت مرتبط با آن،

1- Meyer
2- Booker

به عنوان مثال میانگین، واریانس و به صورت توزیع و یا درصد بیان کنند. با در نظرگرفتن عدم قطعیت موجود در نظر هر کارشناس و با استفاده از روش میانگین وزنی می‌توان تاثیر عدم‌قطعیت در نظر هر کارشناس را در ضریب نهایی که به تصمیم گیرنده مربوط می‌شود را بررسی کرد (Meyer & Booker, 1991).

۲-۳-۱-۳- ترکیب کردن نظرات کارشناسان

ترکیب کردن نظرات جمع‌آوری شده کارشناسان توسط تحلیل‌گر یا تصمیم گیرنده[1]، به منظور به دست آوردن یک پاسخ کلی برای موضوع تخصصی مورد مطالعه، انجام می‌شود (Meyer & Booker, 1991).

هر کارشناس نظر خود را در به صورت یک تابع توزیع تجمعی[2] ارایه می‌کند. برای ترکیب کردن توابع توزیع ارایه شده توسط کارشناسان چندین روش وجود دارد که ساده ترین نوع آنها از نظر ریاضی خطوط اعتبار سنجی و لگاریتمی هستند که به ترتیب به معادلات وزنی و هندسی اشاره می‌کنند (Cooke,1991; Celemen & Winkler, 1999).

در این مطالعه از روش محاسبه میانگین وزنی برای ترکیب کردن نظرات کارشناسان استفاده شده است، به دلیل اینکه این روش در مقایسه با روش میانگین هندسی یک محدوده احتیاط نیز ارایه می‌دهد. محاسبه میانگین وزنی برای ترکیب کردن توابع توزیع تجمعی ارایه شده توسط کارشناسان از رابطه ۲-۱۸حاصل می‌شود.

$$F_{\Phi}^{DM}(\Psi) = \sum_{j=1}^{N_e} w_j F_{\Phi}^{j}(\Psi) \qquad (۲-۱۸$$

$F_{\Phi}^{j}(\boldsymbol{\Psi})$: تابع توزیع تجمعی ارایه شده توسط کارشناس j برای متغیر تصادفی و ناشناخته $\boldsymbol{\Phi}$

N_e: تعداد کارشناسان

1-Decision-Maker
2-Cumulative Distribution Function (CDF)

w_j : وزن غیرمنفی اختصاص داده شده برای هر عامل توسط کارشناس j

رابطه ۲-۱۸) برای نشان دادن کیفیت نسبی نظرات ارایه شده توسط کارشناسان مختلف استفاده می‌شود (Celemen & Winkler, 1999).

از رابطه ۲-۱۸) همچنین می‌توان برای ترکیب توابع احتمال چگالی[1] ارایه شده توسط کارشناسان استفاده کرد. با این وجود، استفاده از توابع توزیع تجمعی ارایه شده توسط کارشناسان در مقایسه با توابع احتمال چگالی ارایه شده توسط آنها، نتایج به دست آمده از تجزیه و تحلیل را تضعیف نمی‌کند.

اگرچه ترکیب کردن نظرات کارشناسان از لحاظ ریاضی مفهوم پیچیده‌ای ندارد، ولی تخمین زدن وزن نسبت داده شده به هر عامل توسط کارشناسان یک فرآیند چالش برانگیز است. فرنچ[2] لیستی از موانع موجود برای تخمین زدن یا تعیین کردن وزن نسبت داده شده به هر عامل توسط کارشناسان را به شرح زیر ارایه داده است (French, 1985):

رتبه بندی کارشناسان: کارشناسان به صورت یکسان رتبه بندی نمی‌شوند و بین کارشناسان تفاوت وجود دارد، در واقع باید مشخص شود که هر یک کارشناسان چگونه از دانش و مهارت خود در مورد موضوع تخصصی بیان شده یا احتمالات موجود استفاده می‌کنند و در زمان ارایه توزیع تجمعی با عدم قطعیت‌ها چگونه برخورد می‌کنند.

صداقت کارشناسان: صداقت از لحاظ تعصب‌های انگیزشی مورد مطالعه قرار می‌گیرد، زیرا ممکن است وضعیت نظرسنجی به گونه‌ای باشد که کارشناسان به طور عَمدی توزیع‌های تجمعی ارایه شده توسط خود را دستکاری کنند یا تغییر دهند (Meyer & Booker, 1991).

1-Probability Density Function (PDF)
2-French

ارتباط بین کارشناسان: در بین کارشناسان به دلیل اینکه آنها نسبت به موضوع تخصصی بیان شده دارای ادراک مشترکی هستند ارتباط خاصی وجود دارد. این ارتباط ممکن است بر روی پاسخ‌های ارایه شده از جانب آنها تاثیرگذار باشد.

تخصص نسبی کارشناسان: هر کدام از کارشناسان درای سطوح مختلفی از تخصص در موضوع بیان شده هستند، به خصوص زمانی که در زمینه‌های مختلف، تجربه و سوابق تحقیقاتی دارند. چنین کارشناسانی از دیدگاه‌های مختلفی نسبت به موضوع تخصصی مطرح شده برخوردار هستند.

۲-۴- عدم قطعیت[1]

دراکثر موارد و در مراودات مصطلح، دو واژه‌ی عدم‌قطعیت و ریسک به صورت معادل و هم‌معنی به‌کار می‌روند. ولی عدم قطعیت با وجود رابطه تنگاتنگی که با ریسک دارد، معادل ریسک نیست و در ادبیات مدیریت ریسک نیز این دو اصطلاح به صورت کاملاً مجزا به‌کار برده می‌شوند. ریاضی‌دانان و متخصصان علم آمار تعابیر کاملاً متفاوتی از این دو واژه بیان می‌کنند.

یک فیلسوف یونانی[2] می‌گوید: " تنها موضوع قطعی این است که هیچ قطعیتی وجود ندارد"، و اسکار وایلد[3] نیز می‌گوید: " تنها گذشته مطمئن است و آینده در بهترین حالت تنها محتمل است".

امروزه دامنه‌ی عدم قطعیت‌هایی که سازمان‌ها در فضای تجاری و کاری خود با آن مواجه می‌شوند، بسیار وسیع است. این عدم قطعیت‌ها از منشاهای متعدد داخلی و خارجی ناشی می‌شوند و محدوده‌ی گسترده‌ای از مسایل فنی، مدیریتی، اجرایی و تجاری را دربرمی‌گیرند.

برخی از عدم قطعیت‌ها به نوع کار و فعالیتی که صورت می‌گیرد، نظیر وقوع تغییرات در خواسته‌ها یا اهداف کار، تغییر در فرضیات، استفاده از فناوری‌های جدید یا روش‌های ابداعی و مواردی مانند آنها مربوط می‌شوند. برخی دیگر از عدم قطعیت‌ها از افراد درگیر در کار شامل سطوح مهارتی یا نرخ‌های

1- Uncertainty
2- Caius Plinus Secundus
3- Oscar Wilde

متغیر بازده نیروی کار ناشی می‌شوند. مجموعه دیگری از عدم قطعیت‌ها، شامل عوامل بیرونی خارج از محدوده‌ی قابل کنترل نظیر محیطی که فعالیت اجرا می‌شود، وضعیت بازار کار، رقابت، تغییر نرخ برابری ارز، نرخ تورم و یا حتی شرایط جوی هستند.

با وجود این دامنه وسیع از عدم‌قطعیت‌های بالقوه، هنوز ممکن است این سؤال پیش آید که چرا اصولاً سازمان‌ها باید به بررسی عدم قطعیت روی آورند. دلیل این امر این است که بین عدم قطعیت‌ها و سود (زیان) رابطه مستقیمی وجود دارد. سازمان‌هایی که فعالیت‌های خود را با هدف کسب سود انجام می‌دهند، به این موضوع آگاهی دارند که باید عدم قطعیت‌های اجتناب‌ناپذیری را مدیریت کنند تا بتوانند به سود دست یابند(Pritchard, 2001).

۲-۴-۱- عدم قطعیت در پروژه‌ها

گستره‌ی عدم قطعیت در پروژه‌ها قابل ملاحظه است و در بسیاری از فعالیت‌های مدیریت پروژه از همان مراحل اولیه دوره‌ی عمر پروژه، به تبیین و تصمیم‌گیری در مورد مجموعه اقدامات ممکن در برابر عدم قطعیت‌های پروژه می‌پردازد. بخشی از موارد عدم‌قطعیت در پروژه‌ها، به امکان تغییر در معیارهای عملکرد پروژه مانند هزینه، زمان یا کیفیت برمی‌گردد. همچنین می‌توان، عدم قطعیت را به مسایلی مانند ابهام در شناخت رفتار عوامل و نهادهای حاضر در پروژه، نبود اطلاعات، نبود ساختار مشخص برای در نظر گرفتن مسایل مربوط به پروژه، فرضیه‌های منظور شده، منابع شناخته شده و ناشناخته انحراف در پروژه و بسیاری موارد دیگر ارتباط داد. این موارد را می‌توان در چهار ناحیه زیر طبقه بندی کرد(Wideman, 1992):

۱. عدم قطعیت در مبانی و برآورد[1]های پروژه.
۲. عدم قطعیت در طراحی و تدارکات پروژه.
۳. عدم قطعیت در اهداف پروژه و اولویت‌های آنها.

1- estimation

۴. عدم قطعیت در روابط بین نهادهای حاضر در پروژه.

۲-۴-۱-۱- عدم قطعیت در مبانی و برآوردهای پروژه

کیفیت و دقت برآوردها به مواردی چون تجربه و مهارت کسانی که آنها را تهیه کرده‌اند، چگونگی و زمان انجام این برآوردها و منابع و فرضیاتی که این برآوردها بر آن استوارند وابسته است. برآوردهایی مانند زمان، هزینـه و کیفیـت حوزه‌ی مشهودی از عدم قطعیت در پروژه‌ها هستند. به عنوان مثال، ممکن است در مورد زمان و منابع لازم برای اتمام فعالیت خاصی اطمینان وجود نداشته باشد. دلایل این نوع عدم‌قطعیت می‌تواند شامل عوامل متعددی از جمله موارد زیر باشد(Wideman, 1992):

- نبود مشخصات صریح از آنچه مورد نیاز است.
- نبود تجربه در خصوص برخی از فعالیت‌ها
- پیچیدگی از دید تعداد عوامل موثر و تعداد وابستگی بین فعالیت‌ها.
- امکان وقوع رویداد یا شرایطی که فعالیت مورد نظر را متأثر سازد.

۲-۴-۱-۲- عدم قطعیت در طراحی و تدارکات پروژه

طبیعت و مشخصات اقلام تحویلی[1](محصولات) پروژه و فرایند تعریف وتولید آنها، در مراحل اولیه دوره‌ی عمر پروژه، زمینه ساز عدم قطعیت‌هایی بنیادی هستند. به طور اصولی، بیشتر این عدم قطعیت‌ها ریشه در مراحل پیش از اجرای پروژه دارد که از تعجیل در مشخص کردن کاری که باید انجام شود، ناشی می‌شود. از این رو، زمان لازم، منابع ضروری و هزینه‌ی انجام کار و سایر موارد ضروری، مورد کم‌توجهی واقع می‌گردد و به این ترتیب، در عمل بخش قابل ملاحظه‌ای از این عدم قطعیت‌ها حل نشده باقی می‌ماند. طبیعت موضوعات و عدم قطعیت‌های مربوط به طراحی و تدارکات پروژه به‌گونه‌ای است که می‌تواند منجر به عدم قطعیت‌هایی در رابطه با مبانی برآوردها گردد(Wideman, 1992).

1- Deliverable

۲-۴-۱-۳- عدم قطعیت در اهداف پروژه و اولویت‌های آنها

هرگاه در تعریف پروژه در مورد اهداف و اولویت‌دهی بین آن‌ها عدم قطعیت وجود داشته و موازنه قابل قبولی وجود نداشته باشد، مشکلات عمده‌ای به وجود می‌آید. مسأله اصلی این است که تمام نهادهای حاضر در پروژه، مسئولیت‌های خود (که منجر به برآورده شدن اهداف پروژه می‌گردد) و انتظارات سایر نهادها را به روشنی درک کنند.

۲-۴-۱-۴- عدم قطعیت در روابط بین نهادهای حاضر در پروژه

روابط بین نهادهای مختلف حاضر در پروژه، حتی اگر به نظر خیلی ساده برسند، می‌تواند بسیار پیچیده و حائز اهمیت باشند. تضاد و عدم هماهنگی بین نهادهای مختلف پروژه می‌تواند منجر به ایجاد عدم‌قطعیت با منشأهای زیر گردد (Wideman, 1992):

- محدوده و ویژگی‌های مسوولیت‌ها.
- نوع درک و استنباط از نقش‌ها و مسوولیت‌ها.
- ارتباط در پروژه.
- ظرفیت و توانایی نهادها در پروژه.
- توقع و انتظارهای غیر رسمی به‌جای قراردادهای رسمی.
- روش‌های ایجاد هماهنگی و کنترل.

۲-۵- جمع‌بندی

در این فصل ابتدا به بررسی خطرات و مخاطرات تونل‌سازی شهری پرداخته شد. سپس به تعریف مفهوم قابلیت اطمینان و توابع کلی قابلیت اطمینان و همچنین به بیان روش قضاوت توسط کارشناس به عنوان کاربردی از روش قابلیت اطمینان پرداخته شد، و در انتهای فصل به بیان انواع عدم قطعیت‌های موجود پرداخته شد.در فصل آینده به معرفی عوامل موثر بر پایداری تونل خط ۷ مترو تهران در زمان بهره‌برداری پرداخته می‌شود.

فصل سوم

عوامل موثر بر پایداری تونل در زمان بهره‌برداری

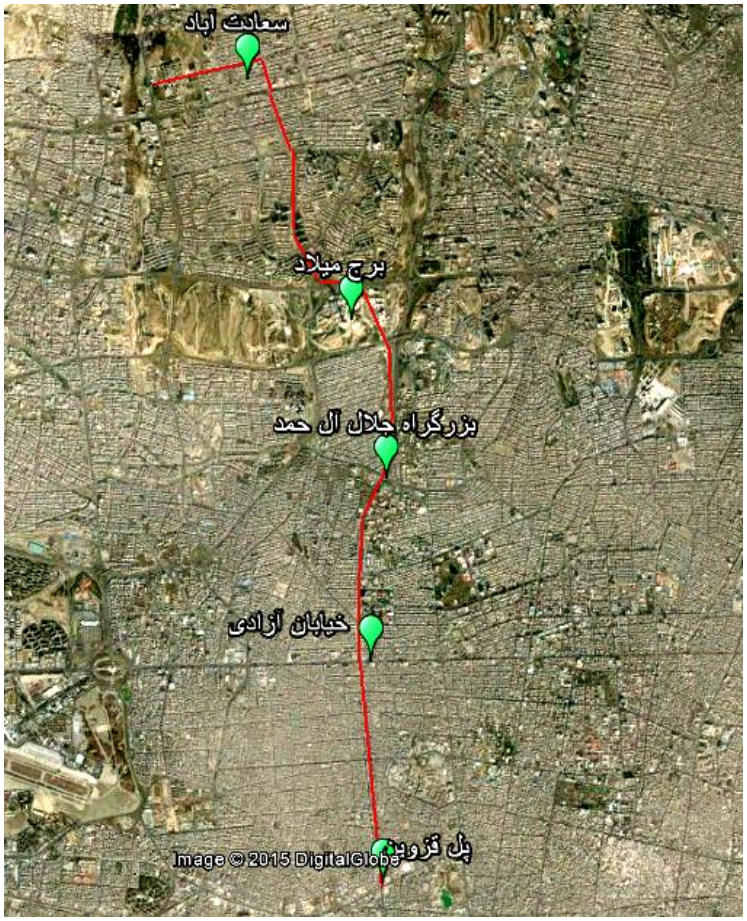
۳-۱- معرفی تونل خط ۷ متروی تهران

مطالعه موردی که برای پژوهش حاضر در نظر گرفته‌شده، تونل خط۷ متروی تهران به استثنای ۷/۵ کیلومتر ابتدایی مسیر (از کیلومتر ۷+۵۰۰ تا ۲۶+۰۰۰) است. در ابتدای فصل به معرفی پروژه خط۷ متروی تهران پرداخته می‌شود.

۳-۱-۱- موقعیت جغرافیایی تونل خط ۷ متروی تهران

تونل خط۷ متروی تهران از شهرک امیرالمومنین در شرق تهران شروع شده و پس از عبور از بزرگراه بسیج در طول بزرگراه شهید محلاتی ادامه یافته و پس از اتصال به میدان قیام، در امتداد خیابان‌های مولوی و هلال‌احمر ادامه می‌یابد. پس از رسیدن به بزرگراه نواب صفوی مسیر آن در امتداد شمالی-جنوبی و در طول بزرگراه نواب تغییر می‌کند (مشاور ساحل، ۱۳۸۸). در ادامه‌ی مسیر شمالی-جنوبی به بزرگراه چمران می‌رسد و بعد از رسیدن به بزرگراه همت با پیچشی به سمت غرب از کنار برج میلاد عبور می‌کند و سپس در خیابان پاک نژاد، به سمت شمال تا رسیدن به خیابان کوهستان(سرو)، به سمت غرب ادامه می‌یابد. این تونل در مجموع ۲۶ کیلومتر است و دارای ۲۵ ایستگاه است (مشاور ساحل، ۱۳۹۰). این مسیر در سه مرحله اجرا می‌شود. در شکل ۳-۱ و شکل ۳-۲ قسمتی از مسیر تونل خط ۷ مترو مشاهده می‌گردد.

شکل ۳-۱: مسیر احداث قطعه شرقی-غربی خط ۷ متروی تهران



شکل ۳-۲: مسیر احداث قطعه شمالی-جنوبی مترو خط ۷ تهران

۳-۱-۲- مشخصات مسیر مورد مطالعه

مسیر مورد مطالعه دارای طولی حدود ۲۶ کیلومتر و شامل ۲۵ ایستگاه است. مقطع تونل به صورت دایره‌ای و به قطر حفاری ۹/۱۶ متر و قطر تمام‌شده ۸/۱۵ متر است. مشخصات تونل در جدول ۳- ۱ ارایه شده است.

جدول ۳- ۱: مشخصات تونل خط ۷ متروی تهران (مشاور ساحل، ۱۳۸۸)

مشخصات عمومی تونل	نام تونل	متروی تهران، خط ۷
	کاربری تونل	مترو
	طول مسیر	حدود ۲۶۰۰۰ متر
	تعداد ایستگاه‌ها	۲۵
	بیش‌ترین روباره تونل	حدود ۵۰ متر از تاج
	کمترین روباره تونل	حدود ۴/۵ متر از تاج
مشخصات هندسی تونل	مقطع تونل	دایره‌ای
	قطر حفاری تونل	۹/۱۶۴ متر
	حداقل شعاع قوس افقی مسیر تونل	۳۵۰ متر
مشخصات پوشش نهایی تونل	نوع پوشش	سگمنت بتنی تتراگونال
	ضخامت سگمنت‌ها	۳۵ سانتی‌متر
	عرض سگمنت	۱/۵ متر
	تعداد قطعات سگمنت در هر رینگ	۶+۱ قطعه کلید+۱ قطعه سگمنت کف

۳-۱-۳- زمین‌شناسی مسیر تونل

تونل خط ۷ متروی تهران در رسوبات آبرفتی دوره کواترنری حفر شده است. این رسوبات به طور عمده شامل خاک‌های شنی و ماسه‌ای رس و سیلت‌دار و در بخش‌هایی نیز خاک‌های رسی و سیلتی شن و ماسه‌دار است. طبق مطالعات زمین‌شناسی تکمیلی مسیر و بر اساس نتایج مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی، لایه‌های خاکی در مسیر تونل به شش واحد (گونه) زمین‌شناسی مهندسی (ET1 تا ET6) مطابق جدول ۳- ۲ تفکیک‌شده‌اند (مشاور ساحل، ۱۳۸۸).

جدول ۳- ۲: مشخصات لایه‌های زمین‌شناسی تفکیک‌شده در لایه‌های خاکی مسیر تونل (مشاور ساحل، ۱۳۸۸)

واحد زمین‌شناسی مهندسی	ET6	ET5	ET4	ET3	ET2	ET1
توصیف خاک	very soft clayey sandy silt	clayey SILT & silty CLAY with sand very sandy CLAY (or SILT)	clayey silty SAND with Gravel	very silty clayey SAND with gravel very sandy CLAY (or SILT) with gravel	very gravely SAND with silt & Clay	sandy GRAVEL & gravely SAND
درصد ردشده از الک ۲۰۰	>60 %	>60 %	22-34 %	30-60 %	12-30 %	3-12 %
نوع خاک (USCS)	ML	CL, ML & CL-ML (rarely CH)	SC, SM	SC, SM & CL	SC, SC-SM & GC	GW, GW-GM, GP-GC, SW & SP

جدول ۳- ۳: علایم معرف نوع خاک

علامت	نوع خاک
G	شن
S	ماسه
M	سیلت
C	رس

جدول ۳- ۴: علایم معرف خواص خاک

علامت	نوع خاک
W	خوب دانه‌بندی شده
P	بد دانه‌بندی شده
L	دارای خاصیت خمیری کم تا متوسط
H	دارای خاصیت خمیری زیاد

واحد خاکی ET1 از شن ماسه‌ای و در بعضی از محدوده‌ها از ماسه شنی تشکیل شده است و مقدار درصد رد شده از الک ۲۰۰ (سیلت و رس) برای واحد ET1 بین ۳ تا ۱۲ درصد است. واحد خاکی ET2 در رده خاک‌های درشت‌دانه محسوب می‌شود و جنس آن عمدتاً از ماسه شنی زیاد به همراه سیلت و رس تشکیل شده است و مقدار درصد رد شده از الک ۲۰۰ (سیلت و رس) بین ۱۲ تا ۳۰ درصد است. ذرات تشکیل‌دهنده واحد خاکی ET3 عمدتاً از ماسه رسی به همراه شن و به ندرت از رس ماسه‌ای تشکیل شده است و مقدار درصد رد شده از الک ۲۰۰ (سیلت و رس) آن بین ۳۰ تا ۶۰ درصد است که مقدار قابل توجهی است. واحد خاکی ET4 نیز در رده خاک‌های درشت‌دانه محسوب می‌شود و جنس آن از عمدتاً از ماسه رسی به همراه شن تشکیل شده است و مقدار درصد رد شده از الک ۲۰۰ (سیلت و رس) بین ۲۲ تا ۳۴ درصد است. ذرات تشکیل‌دهنده واحد خاکی ET5 عمدتاً از سیلت رسی و رس سیلتی به همراه مقدار اندکی ماسه تشکیل شده است. مقدار درصد رد شده از الک ۲۰۰ (سیلت و رس) این واحد بیشتر از ۶۰ درصد است.ذرات تشکیل‌دهنده واحد ET6 عمدتاً از سیلت ماسه‌ای تشکیل شده است و از لحاظ دانه‌بندی به واحد ET5 و ET3 شبیه است ولی با توجه به ضعیف بودن عوامل مکانیکی به عنوان یک واحد جداگانه معرفی گردیده است. البته این واحد در مسیر تونل گسترش کمی داشته و تنها در کیلومتر ۷+۱۰۰ تا ۷+۶۰۰ در محدوده بالای سقف تونل شناسایی شده است (مشاور ساحل، ۱۳۸۸). عوامل ژیوتکنیکی واحدهای زمین‌شناسی مهندسی بر اساس تحلیل آماری نتایج حاصل از مطالعات صحرایی (نگاره‌ی گمانه‌ها و آزمایش‌های صحرایی) و آزمون‌های آزمایشگاهی، در جدول ۳- ۵ درج شده است.

جدول ۳- ۵: عوامل ژیوتکنیکی واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل (مشاور ساحل، ۱۳۸۸)

واحد زمین شناسی مهندسی	چسبندگی C' (kg/cm^2)			زاویه اصطکاک Φ' (degree)			چسبندگی Ccu (kg/cm^2)			زاویه اصطکاک داخلی Φ cu (degree)			مدول (kg/cm^2) یانگ			نسبت پواسون υ	وزن واحد خشک (g/cm^3)
	محدوده‌ی تغییرات		مقدار پیشنهادی	محدوده‌ی تغییرات		مقدار پیشنهادی	محدوده تغییرات		مقدار پیشنهادی	محدوده‌ی تغییرات		مقدار پیشنهادی	محدوده‌ی تغییرات		مقدار پیشنهادی		
ET-1	0.09	0.20	0.14	33	35	34	0.11	0.24	0.16	29	30	29	700	850	800	0.3	1.86
ET-2	0.11	0.19	0.15	32	34	33	0.13	0.22	0.18	28	30	29	700	850	750	0.3	1.84
ET-3	0.24	0.36	0.30	28	38	33	0.32	0.48	0.40	22	27	23	450	550	500	0.32	1.90
ET-4	0.21	0.25	0.22	31	36	32	0.26	0.31	0.28	25	29	26	480	520	500	0.3	1.82
ET-5	0.27	0.34	0.31	26	31	28	0.38	0.48	0.43	17	20	19	300	400	350	0.35	1.70
ET-6	0.00	0.00	0.00	25	29	27	0.00	0.00	0.00	24	28	25	-	-	100	0.35	1.70

۳-۱-۴- پهنه بندی مسیر تونل خط ۷ متروی تهران

به منظور پهنه بندی تونل خط ۷ متروی تهران از اطلاعات زمین‌شناسی مسیر تونل مترو (شامل مقاومت خاک، گسل‌ها) معارضین سطحی و زیرسطحی (شامل ساختمان‌ها بلند اطراف تونل مترو، قنات‌ها چاه‌های فاضلاب تونل‌های مترو مجاور تونل‌های شهری و...) و مشخصات تونل (شامل امتداد تونل و ضخامت روباره تونل) استفاده شده است که این پهنه‌بندی در جدول ۳- ۶ آمده است. قابل‌ذکر است که اطلاعات تونل از فاصله ۷۵۰۰متری در دسترس بوده و به طبع از این نقطه به بعد، تونل پهنه‌بندی شده است.

جدول ۳- ۶: پهنه‌های ۲۴ گانه تونل خط ۷ متروی تهران

پهنه	فاصله از ابتدای تونل خط۷	رده زمین شناسی	طول پهنه	توضیحات
۱	۷+۵۰۰ تا ۷+۸۶۰	ET1, ET2, ET3, ET4, ET5	۳۶۰	محدود به قنات‌های حاج محمدحسن و اقدسیه
۲	۷+۸۶۰ تا ۸+۰۰۰	ET2, ET3, ET4, ET5	۱۴۰	فاقد معارض تاثیرگذار
۳	۸+۰۰۰ تا ۸+۳۶۰	ET2, ET3, ET5	۳۶۰	تغییر در ساختار زمین‌شناسی نسبت به مقطع قبلی
۴	۸+۳۶۰ تا ۸+۸۰۰	ET2, ET3, ET5	۴۴۰	محدود به قنات‌های شهاب‌الملک و نجف‌آباد
۵	۸+۸۰۰ تا ۹+۱۶۰	ET2, ET3, ET4, ET5	۳۶۰	محدود به قنات مجدالدوله جدید و قدیم ایستگاه F1 و تونل انتقال آب رباط‌کریم و تغییر در ساختار زمین‌شناسی نسبت به مقطع قبلی
۶	۹+۱۶۰ تا ۹+۴۳۰	ET3, ET4, ET5	۲۷۰	محدود به قنات امین‌الملک کرجی، تونل انتقال آب رباط
۷	۹+۴۳۰ تا ۹+۹۰۰	ET2, ET3, ET4, ET5	۴۷۰	محدود به قنات‌های امین‌الملک کرجی، شوش، تونل انتقال آب رباط‌کریم، تونل خیام و تغییر در ساختار زمین‌شناسی نسبت به مقطع قبلی
۸	۹+۹۰۰ تا ۱۰+۳۰۰	ET2, ET3, ET5	۴۰۰	محدود به تونل انتقال آب رباط‌کریم و تغییر در ساختار زمین‌شناسی نسبت به مقطع قبلی
۹	۱۰+۳۰۰ تا ۱۰+۴۱۰	ET2, ET3, ET5	۱۱۰	محدود به تونل انتقال آب رباط‌کریم، تونل و ایستگاه خط ۳ و قنات غنی‌آباد
۱۰	۱۰+۴۱۰ تا ۱۱+۲۰۰	ET2, ET3, ET5	۷۹۰	محدود به تونل انتقال آب رباط‌کریم
۱۱	۱۱+۲۰۰ تا ۱۱+۷۰۰	ET2, ET3, ET5	۵۰۰	محدود به تونل انتقال آب رباط‌کریم و تغییر در ساختار زمین‌شناسی نسبت به مقطع قبلی
۱۲	۱۱+۷۰۰ تا ۱۲+۴۰۰	ET1, ET2, ET3, ET4, ET5	۷۰۰	محدود به ساختمان‌های محدوده نواب و پل قزوین و تغییر در ساختار زمین‌شناسی نسبت به مقطع قبلی
۱۳	۱۲+۴۰۰ تا ۱۳+۴۰۰	ET2, ET3, ET5	۱۰۰۰	تغییر در ساختار زمین‌شناسی نسبت به مقطع قبلی
۱۴	۱۳+۴۰۰ تا ۱۴+۱۰۰	ET1, ET2	۸۰۰	محدود به ۳ پل در نواب و تغییر در ساختار زمین‌شناسی نسبت به مقطع قبلی
۱۵	۱۴+۱۰۰ تا ۱۶+۹۰۰	ET2, ET3, ET4	۲۸۰۰	محدود به تونل‌های مترو خط ۲ و ۴ و توحید و تغییر در ساختار زمین-شناسی نسبت به مقطع قبلی
۱۶	۱۶+۹۰۰ تا ۱۷+۵۰۰	ET2	۶۰۰	فاقد معارض تاثیرگذار
۱۷	۱۷+۵۰۰ تا ۱۹+۱۷۰	ET1, ET2, ET4	۱۶۷۰	محدود به گسل‌های طرشت، داوودیه و پل نصر و تغییر در ساختار زمین-شناسی نسبت به مقطع قبلی
۱۸	۱۹+۱۷۰ تا ۲۰+۰۰۰	ET2, ET3	۸۳۰	فاقد معارض تاثیرگذار
۱۹	۲۰+۰۰۰ تا ۲۱+۱۳۰	ET3, ET4, ET5	۱۱۳۰	محدود به پل چمران، گسل ایوبی، برج میلاد و تغییر در ساختار زمین-شناسی نسبت به مقطع قبلی
۲۰	۲۱+۱۳۰ تا ۲۲+۰۰۰	ET5	۸۷۰	فاقد معارض تاثیرگذار
۲۱	۲۲+۰۰۰ تا ۲۲+۸۴۰	, ET4, ET5	۸۴۰	ساختمان‌های محدوده برج میلاد
۲۲	۲۲+۸۴۰ تا ۲۴+۲۲۰	ET2, ET3, ET5	۱۳۸۰	تغییر در ساختار زمین-شناسی نسبت به مقطع قبلی
۲۳	۲۴+۲۲۰ تا ۲۵+۰۰۰	ET3,	۷۸۰	محدود به ساختمان‌های سعادت‌آباد و پل نیایش
۲۴	۲۵+۰۰۰ تا ۲۶+۰۰۰	ET2, ET3, ET5	۱۰۰۰	تغییر در ساختار زمین-شناسی نسبت به مقطع قبلی

۳-۲- عوامل موثر بر پایداری تونل خط ۷ مترو تهران در زمان بهره‌برداری

با توجه به هزینه‌های زیاد طراحی، ساخت و نگهداری تونل‌های مترو آگاهی از عوامل تاثیرگذار و میزان تاثیر این عوامل بر ایمنی و پایداری سازه‌های زیرزمینی شهری بسیار ضروری است. آگاهی بهره‌برداران این سازه‌ها، در زمان وقوع خطر می‌تواند در کنترل و پیشگیری از خسارات بیشتر جلوگیری نماید. همچنین از دیدگاه پدافند غیرعامل در یافتن مکانی امن به عنوان پناهگاه کمک می‌کند.

۳-۲-۱- پایداری تونل‌های مترو در زمان بهره‌برداری

به دلیل هزینه‌های بالای ساخت سازه‌های زیرزمینی به خصوص مترو و عواقب سنگین ناشی از وقوع خطرات و تهدیدهای طبیعی و غیرطبیعی اعم از زلزله، سیل، آتش‌سوزی، انفجارهای تروریستی و یا ناشی از بروز جنگ لازم است یک شاخص پایداری (SI)[1] در طول عمر سازه‌ی زیرزمینی در نظر گرفته شود به طوری‌که مکان‌های با پایداری و امنیت کمتر از مکان‌های با پایداری و امنیت بیشتر شناسایی شوند. این کار ممکن است موجب فراهم شدن زمینه تصمیم‌گیری و کمک‌رسانی در مواقع ضروری شود.

شاخص پایداری بر اساس شرایط زمین‌شناسی، مشخصات تونل، مشخصات سامانه نگهداری، بارهای دینامیکی، عوامل غیرمترقبه، سازه‌های معارض زیرزمینی و سطحی و عوامل انسانی برآورد می‌شود.

۳-۲-۲- عوامل مربوط به پایداری تونل‌ها در زمان بهره‌برداری

عوامل موثر بر پایداری تونل‌های مترو در زمان بهره‌برداری در هشت گروه، شامل؛ عوامل ذاتی زمین، عوامل محیطی، مشخصات تونل، مشخصات سامانه نگهداری، مشخصات بارهای زنده و دینامیکی، عوامل غیرمترقبه، عوامل معارضین سطحی و زیرسطحی و عوامل انسانی تقسیم‌بندی شده است. در جدول ۳- ۷ عوامل هشت‌گانه مذکور و هر یک از زیر عوامل آن درج شده است.

1- Stability Index

جدول ۳- ۷: عوامل موثر بر پایداری تونل‌های مترو در زمان بهره‌برداری

ردیف	دسته	عامل
۱	عوامل ذاتی زمین	مقاومت خاک (P1)
۲		قابلیت تورم و لهیدگی (P2)
۳		تنوع و تعدد لایه‌ها (P3)
۴	عوامل محیطی	سطح آب زیرزمینی (P4)
۵		گسل (P5)
۶		رودخانه (P6)
۷	مشخصات تونل	امتداد تونل (P7)
۸		ضخامت روباره (P8)
۹	عوامل مربوط به سامانه نگهداری	ظرفیت باربری سامانه نگهداری (P9)
۱۰		صلبیت سامانه نگهداری (P10)
۱۱		کیفیت اجرای تزریق (P11)
۱۲		کیفیت مصالح مورد استفاده (P12)
۱۳	عوامل مربوط به بارهای زنده و دینامیکی	ترافیک شهری (P13)
۱۴		زلزله (P14)
۱۵		لرزش‌های ناشی از انفجار (P15)
۱۶	عوامل غیرمترقبه	سیل و آتش‌سوزی (P16)
۱۷	عوامل مربوط به عوارض و موانع سطحی و زیرزمینی	وضعیت ساختمان‌های اطراف (P17)
۱۸		قنات‌ها،چاه‌ها و لوله‌های فاضلاب (P18)
۱۹		همجواری با سایر تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی (P19)
۲۰		پل‌ها (P20)
۲۱	عوامل انسانی	مهارت و تجربه کادر اجرایی (P21)
۲۲		بازدیدهای دوره‌ای و تعمیرات اساسی تونل (P22)

در ادامه به معرفی اجمالی ۲۲ عامل مذکور پرداخته می‌شود. پس از معرفی هر عامل، معیاری برای طبقه‌بندی آن ارایه گردیده است. هر معیار طبقه‌بندی شامل پنج دسته بوده و با توجه به شرایط پایداری به هر یک از دسته‌ها امتیازی از صفر تا چهار اختصاص داده می‌شود. امتیازهای معیارهای طبقه‌بندی، بر اساس نظر کارشناسان تونل‌سازی تعیین شده است. در نهایت نیز اطلاعات تونل خط ۷ متروی تهران بر اساس معیارهای ارایه شده، طبقه‌بندی می‌گردد.

۳-۲-۲-۱- عوامل ذاتی زمین

منظور از عوامل ذاتی زمین، عوامل مربوط به طبیعت زمین است. این عوامل عبارتند از:

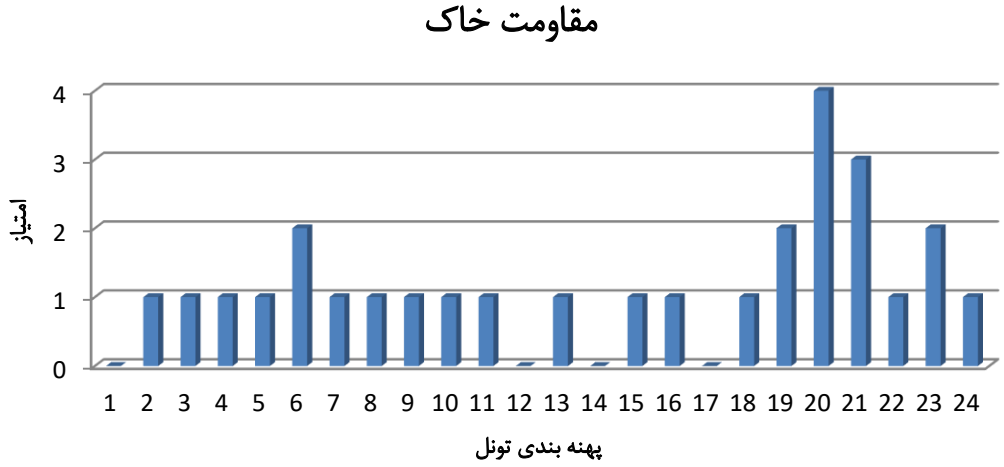
الف- مقاومت خاک

به طور کلی هرچه مقاومت خاک (ضریب اصطکاک داخلی و چسبندگی) بیشتر باشد خاک خود نگهدارتر محسوب می‌شود و بار کمتری به سامانه نگهداری وارد می‌کند. برای تقسیم‌بندی پهنه‌های زمین‌شناسی از سیستم واحد زمین‌شناسی مهندسی[1] استفاده شده است. با قرار دادن مقادیر جدول ۳-۵ در فرمول موهر-کلمب نتایج جدول ۳- ۸ حاصل می‌شود. امتیازدهی عامل مقاومت خاک برای پهنه‌های ۲۴ گانه تونل خط ۷ متروی تهران در شکل ۳-۳ آمده است.

جدول ۳- ۸: معیار طبقه‌بندی خاک (ET) بر اساس مقاومت خاک (Tarigh Azali, et al., 2013)

ردیف	واحد زمین‌شناسی	نوع خاک	توضیحات	امتیاز
۱	ET1	GW, GW-GM,GP-GC, SW & SP	گراول ماسه‌ای و در بعضی از محدوده‌ها از ماسه گراولی	۰
۲	ET2	SC, SC-SM & GC	ماسه گراولی زیاد به همراه سیلت و رس	۱
۳	ET3	SC, SM & CL	ماسه رسی به همراه گراول و به ندرت از رس ماسه‌ای	۲
۴	ET4	SC, SM	ماسه رسی به همراه گراول	۳
۵	ET5	CL, ML & CL-ML (rarely CH)	سیلت و رس ماسه‌ای و رس به همراه ماسه	۴

1- Engineering Geological type



شکل ۳-۳: امتیازدهی مقاومت خاک در پهنه‌های مختلف تونل خط ۷ متروی تهران بر اساس سیستم ET

غیر از پهنه‌های ۲۰ و ۲۱ که از مقاومت نسبتاً خوبی برخوردار هستند بقیه‌ی مسیر تونل از مقاومت پایینی برخوردار است.

ب- قابلیت تورم و لهیدگی

یکی دیگر از عواملی که در پایداری تونل در درازمدت تاثیر مستقیمی دارد میزان قابلیت تورم و لهیدگی خاک است. تغییر رطوبت نسبی خاک‌های ریزدانه، وضعیت فیزیکی و مقاومت ظاهری آن‌ها را تغییر می‌دهد. خاک‌های رسی در برابر دست‌خوردگی و تخریب ساخت، تغییر مقاومت نشان می‌دهند. میزان این تغییر مقاومت بستگی به نوع خاک و شرایط تشکیل و کانی‌های آن دارد. نسبت مقاومت فشاری تک محوری یک نمونه را در حالت عادی به مقاومت یک نمونه آن در حالت تخریب شده حساسیت[1] گویند. اگر این حساسیت کوچک‌تر از چهار باشد خاک غیر حساس است، و اگر بین ۴ تا ۸ باشد خاک را حساس می‌نامند همچنین مقادیر بین ۸ تا ۱۶ را فوق‌العاده حساس و بیش از ۱۶ را رس روان[2] می‌گویند. (وفاییان، ۱۳۷۱)

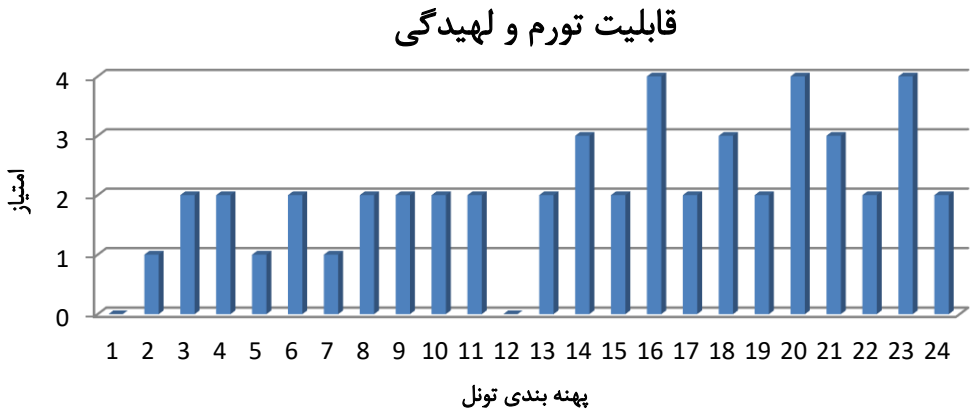
به منظور طبقه‌بندی عامل قابلیت تورم و لهیدگی در طول مسیر مترو خط هفت تهران از سیستم

1- Sensitivity
2- Quick clay

واحد زمین‌شناسی (ET) استفاده شده است. در جدول ۳- ۹ طبقه‌بندی خاک بر اساس قابلیت تورم و لهیدگی آمده‌است همچنین اطلاعات قابلیت تورم و لهیدگی خاک در ۲۴ پهنه در شکل ۳-۴ نشان داده شده است.

جدول ۳- ۹: معیار طبقه‌بندی خاک بر اساس قابلیت تورم و لهیدگی (وفاییان، ۱۳۷۱)

ردیف	درصد رس و سیلت (عبوری از الک ۲۰۰)	واحد زمین‌شناسی	امتیاز
۱	۲ درصد	ET1	۴
۲	۲ – ۱۰ درصد	ET2	۳
۳	۱۰ – ۲۰ درصد	ET3	۲
۴	۲۰ – ۳۰ درصد	ET4	۱
۵	۱۰۰ درصد	ET5	۰



شکل ۳-۴: امتیاز قابلیت تورم و لهیدگی برای پهنه‌های مختلف تونل خط ۷ متروی تهران

قسمت شرقی-غربی تونل خط ۷ متروی تهران از درصد ریز دانه بالایی برخوردار است همچنین در قطعه شمالی-جنوبی در محدوده برج میلاد درصد ریز دانه نسبت به بقیه این قسمت بالاتر است.

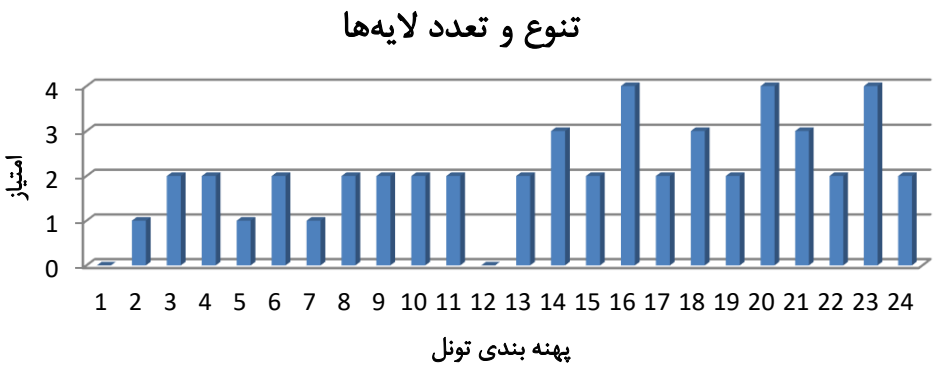
پ- تنوع و تعداد لایه‌ها

تنوع و تعداد لایه‌ها در یک برش نشان‌دهنده عدم تجانس و ناهمگنی در مقطع تونل است و این عامل باعث بروز تنش‌هایی فراتر از مقدار پیش‌بینی‌شده و علاوه بر این باعث بروز آشفتگی در خاک می‌شود. به منظور لحاظ کردن تغییرات شرایط زمین‌شناسی در طول مسیر تونل مورد بررسی، بر اساس

تعداد واحد زمین‌شناسی که در هر پهنه از مسیر تونل وجود دارد تقسیم‌بندی شده است. با توجه به معیار طبقه‌بندی شرایط زمین‌شناسی که در جدول ۳- ۱۰ ارایه شده است، مسیر تونل مورد مطالعه در ۲۴ پهنه طبقه‌بندی گردیده که در شکل ۳-۵ نشان داده شده است.

جدول ۳- ۱۰: معیار طبقه‌بندی خاک بر اساس تنوع و تعداد لایه‌ها

ردیف	تعداد لایه‌ها زمین‌شناسی	امتیاز
۱	بیش از چهار لایه زمین‌شناسی در یک پهنه	۰
۲	چهار لایه زمین‌شناسی در یک پهنه	۱
۳	سه لایه زمین‌شناسی در یک پهنه	۲
۴	دو لایه زمین‌شناسی در یک پهنه	۳
۵	یک لایه زمین‌شناسی در یک پهنه	۴



شکل ۳-۵: امتیاز تنوع و تعداد لایه‌ها برای پهنه‌های مختلف تونل خط ۷ متروی تهران

۳-۲-۲-۲- عوامل محیطی

عوامل محیطی مربوط به عواملی است که از محیط پیرامون بر تونل و عوامل ذاتی زمین (و حتی دیگر عوامل) تاثیر می‌گذارد این عوامل عبارتند از:

الف- سطح آب زیرزمینی

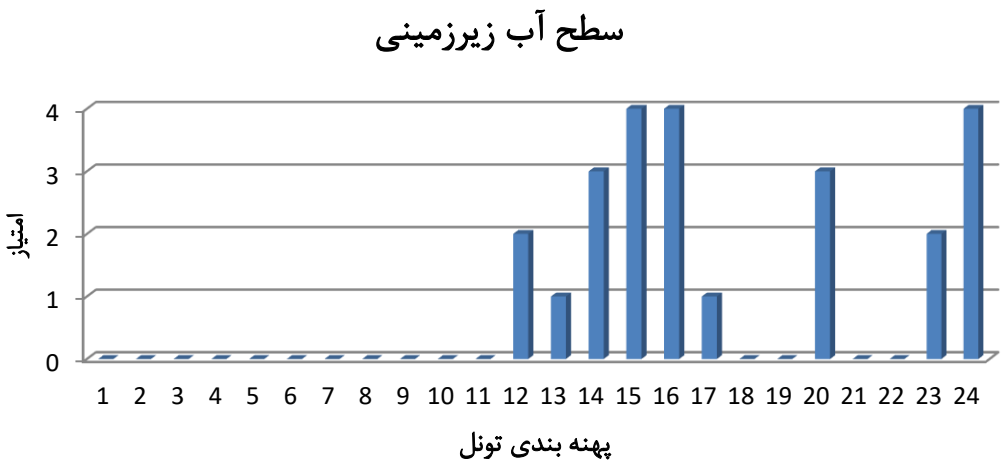
علاوه بر وزن طبیعی آب که موجب فشار دایمی در خاک می‌شود و علاوه بر اثرات طبیعی و مستقل آب در ساختمان‌ها و سازه‌ها، وجود آب بر مقاومت برشی و ظرفیت باربری نهایی خاک‌ها تاثیر محسوسی

دارد. برای مثال خاک‌های رسی با افزایش رطوبت، مقاومت برشی خود را از دست می‌دهند و در عوض در خاک‌های ماسه‌ای رطوبت اندک (به دلیل خاصیت مویینگی) باعث افزایش مقاومت خاک می‌شود هرچند به محض غوطه‌وری مقاومت خود را از دست می‌دهد (وفاییان، ۱۳۷۱).

به منظور طبقه‌بندی عامل سطح آب زیرزمینی در طول خط هفت مترو تهران جدول ۳- ۱۱ ارایه شده است و امتیازدهی سطح آب زیرزمینی مسیر تونل مورد بررسی، در ۲۴ پهنه در شکل ۳-۶ آمده است.

جدول ۳- ۱۱: معیار طبقه‌بندی سطح آب زیرزمینی

ردیف	وضعیت آب زیرزمینی	امتیاز
۱	سطح آب زیرزمینی بالای تاج تونل	۰
۲	سطح آب زیرزمینی در مقطع تونل و در کل سال زیر آب	۱
۳	سطح آب زیرزمینی در مقطع تونل و در بخشی از سال خشک می‌شود	۲
۴	سطح آب زیرزمینی پایین‌تر از مقطع تونل و در بخشی از سال آب بالا می‌آید	۳
۵	سطح آب زیرزمینی در تمام سال پایین‌تر از مقطع تونل	۴



شکل ۳-۶: امتیاز سطح آب زیرزمینی برای پهنه‌های مختلف تونل خط ۷ متروی تهران

قطعه شرقی-غربی خط ۷ مترو تهران در تمام طول سال زیر آب است بنابراین امتیاز پایینی گرفته

است. در قطعه شمالی در محدوده پل نصر تا ابتدای سعادت آباد تونل در طول سال زیر آب و یا قسمتی از آن زیر آب قرار دارد.

ب- گسل

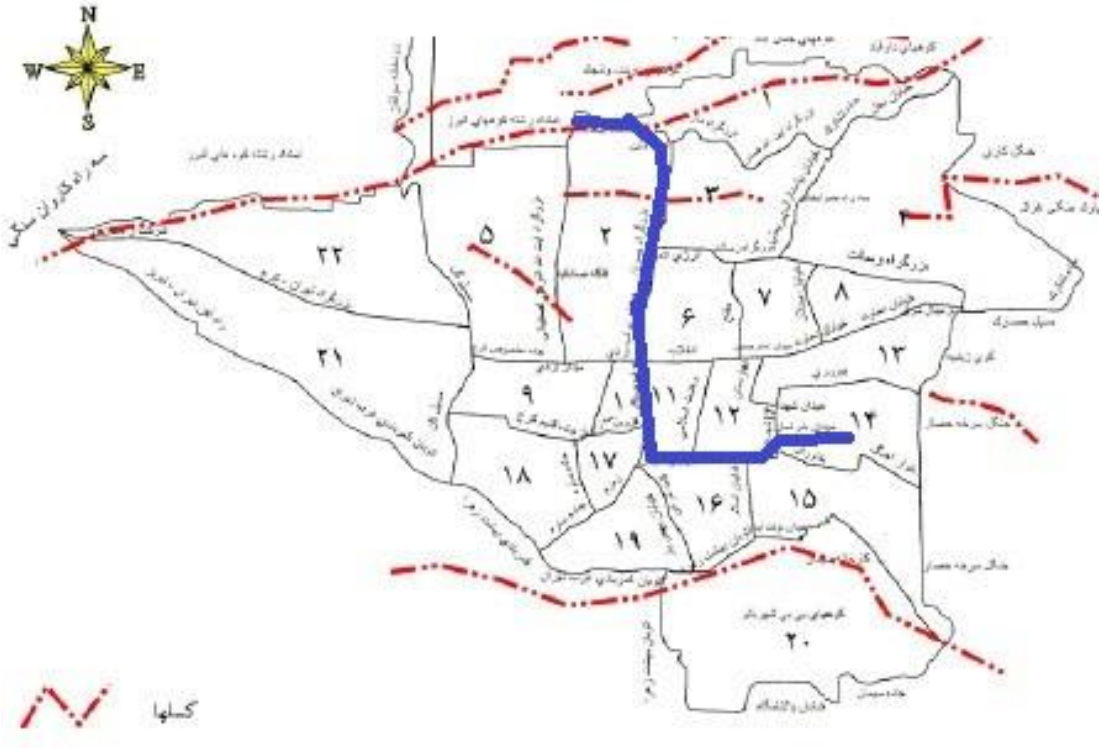
در هنگام زلزله، زمین در محل گسل‌ها حرکت‌های برشی می‌کند که باعث خرابی‌های شدید در سازه‌های مجاور گسل می‌شود. همچنین در زمان‌های غیر از زلزله به دلیل اینکه نواحی گسل خورده، نواحی سست و محل زهکشی آب زیرزمینی هستند از مناطق بحرانی در زمین‌های اطراف سازه به شمار می‌رود. به این دلیل باید قبل از ساخت سازه‌های مهم و بزرگ گسل‌های منطقه به خوبی شناسایی شوند تا تمهیدات لازم برای مواجهه با عوامل ناخواسته بررسی شود.

به منظور طبقه‌بندی عامل گسل از مدل نرخ خطر گسل‌های تهران که مرکز مطالعات زمین‌لرزه و محیط زیست تهران[1] (CEST) و آژانس بین‌المللی همکاری ژاپن[2] (JICA) ارایه داده، استفاده شده است . در جدول ۳- ۱۲ این طبقه‌بندی آمده است. در شکل ۳-۷ مدل نرخ خطر گسل‌های تهران که توسط مرکز مطالعات زمین‌لرزه و محیط‌زیست تهران و آژانس بین‌المللی همکاری ژاپن ارایه شده است نشان داده شده است. در شکل ۳-۸ مسیر تونل بر اساس این طبقه‌بندی در ۲۴ پهنه امتیازدهی شده است.

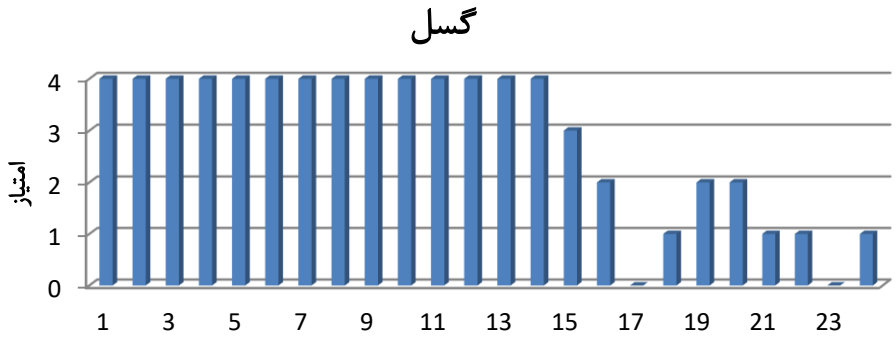
جدول ۳- ۱۲: معیار طبقه‌بندی خطر زمین‌لرزه برای نواحی مختلف شهر تهران (CEST & JICA, 2000)

ردیف	نوع گسل	امتیاز
۱	گسل خطرناک	۰
۲	گسل با خطر متوسط	۱
۳	گسل با خطر کم	۲
۴	گسل‌های کوچک محلی	۳
۵	بدون گسل	۴

1- Center for Earrth and Enironmental Studies of Tehran
2- Japan International Cooperation Agency



شکل ۳-۷: گسل‌های تهران



شکل ۳-۸: امتیاز گسل برای پهنه‌های مختلف تونل خط ۷ متروی تهران

در قسمت شمالی تونل خط ۷ مترو تهران ازمحدوده پل نصرتا سعادت آباد چندین گسل وجود دارد که سبب پایین آمدن امتیاز این قسمت شده است.

پ- رودخانه

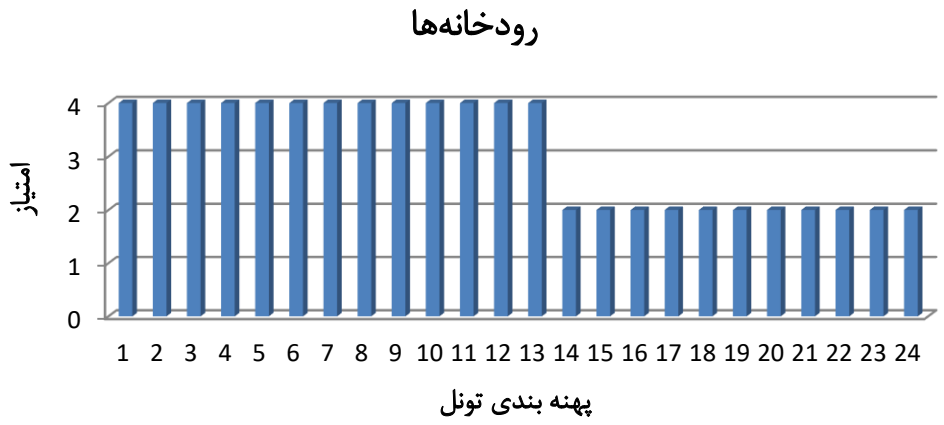
رودخانه‌ها به دلیل ایجاد یک حفره بزرگ، در شار تنش عبوری از منطقه، تاثیر بزرگی می‌گذارند.

همچنین می‌تواند به عنوان یک زهکش و یا تزریق آب به سازه‌ها، سطح آب زیرزمینی منطقه را تحت تاثیر قرار دهند؛ ازاین‌رو در پایداری دراز مدت حفریات زیرزمینی نقشی اساسی دارد.

به منظور طبقه‌بندی عامل رودخانه از معیار جدول ۳- ۱۳ استفاده شده است. امتیازدهی مسیر تونل خط هفت مترو تهران در ۲۴ پهنه در شکل ۳-۹ آمده است.

جدول ۳- ۱۳: معیار طبقه‌بندی رودخانه‌ها بر اساس ناحیه تاثیر

ردیف	فاصله رودخانه تا تونل	امتیاز
۱	محل تلاقی دو رودخانه و فاصله تا تونل کمتر از سه برابر قطر تونل و رودخانه دارای آب	۰
۲	یک رودخانه و فاصله تونل تا رودخانه کمتر از از سه برابر قطر تونل و رودخانه دارای آب	۱
۳	یک رودخانه و فاصله رودخانه تا تونل کمتر از از سه برابر قطر تونل و رودخانه بدون آب	۲
۴	یک رودخانه و فاصله تونل تا رودخانه بیشتر از از سه برابر قطر تونل و رودخانه دارای آب	۳
۵	فاصله رودخانه تا تونل بیشتر از قطر تونل از سه برابر و رودخانه بدون آب	۴



شکل ۳-۹: امتیازدهی پهنه‌های مختلف تونل خط ۷ متروی تهران بر اساس برخورد با رودخانه

۳-۲-۲-۳- عوامل مربوط به مشخصات تونل

این عوامل شامل شکل و مختصات عمومی تونل است که عبارتند از:

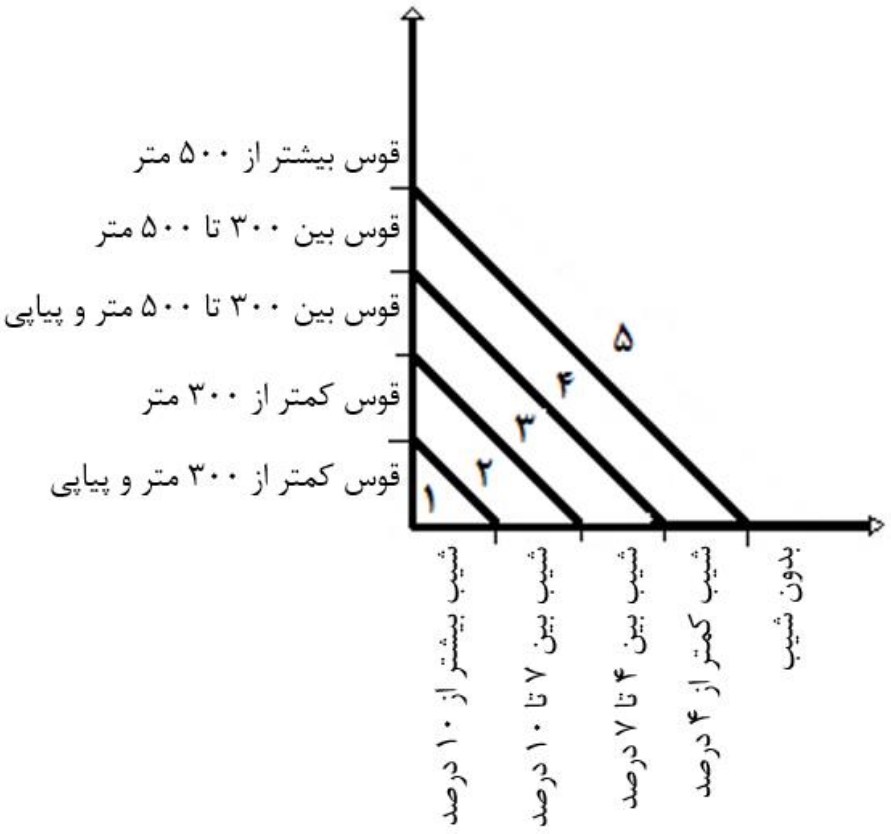
الف- امتداد تونل

قوس‌های افقی و عمودی سبب ایجاد تمرکز تنش در محل قوس می‌شود بنابراین شناسایی قوس‌ها

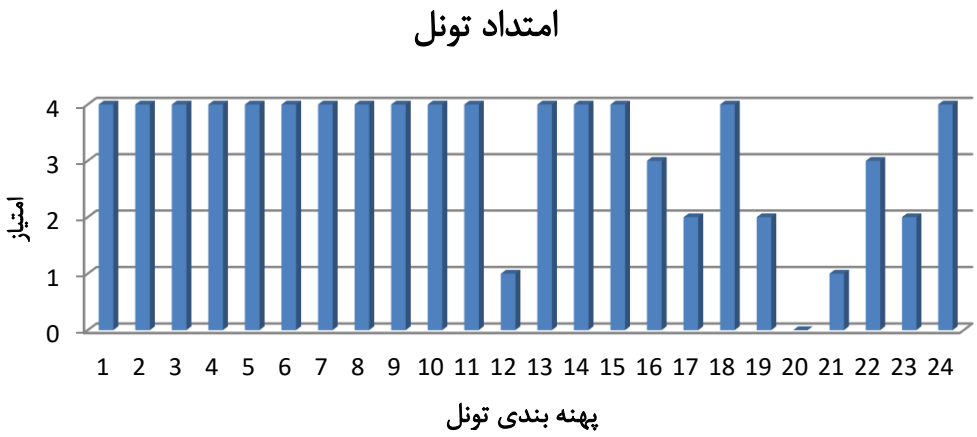
برای یافتن مکان‌های تمرکز تنش امری ضروری است همچنین قوس‌ها در هنگام زلزله از مکان‌های بحرانی هستند. به منظور طبقه‌بندی عامل امتداد تونل از معیار جدول ۳- ۱۴ استفاده شده است. رده‌بندی قوس‌ها در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است. همچنین امتیازدهی پهنه‌های ۲۴ گانه خط ۷ مترو تهران در شکل ۳-۱۱ آمده است.

جدول ۳- ۱۴: معیار طبقه‌بندی امتداد تونل بر اساس میزان قوس و شیب تونل

ردیف	توصیف	رده	امتیاز
۱	بد	۱	۰
۲	ضعیف	۲	۱
۳	متوسط	۳	۲
۴	خوب	۴	۳
۵	عالی	۵	۴



شکل ۳-۱۰: رده بندی امتداد تونل



شکل ۳-۱۱: امتیازدهی امتداد تونل در پهنه‌های مختلف تونل خط ۷ متروی تهران

پهنه ۱۲ به دلیل پیچش تونل از راستای شرقی-غربی به سمت شمال و پهنه ۱۹ تا ۲۳ به دلیل قوس در محدوده برج میلاد و شهرک غرب و همچنین شیب نسبتاً بالای تونل در این ناحیه امتیاز پایینی دریافت نموده‌اند.

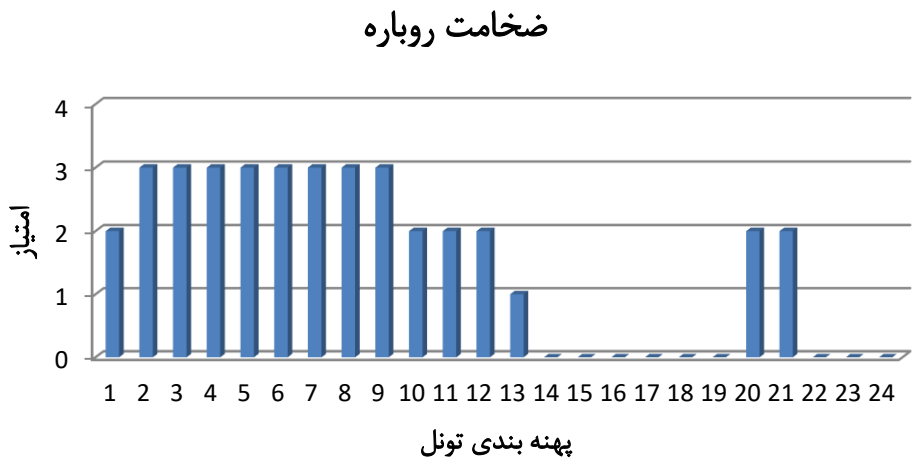
ب- ضخامت روباره

یکی دیگر از عوامل مرتبط با مشخصات تونل که بر پایداری تونل در زمان بهره‌برداری موثر است، عامل ضخامت روباره تونل است. ضخامت روباره در تونل‌های کم عمق شهری به خصوص در محیط‌های خاکی با فشار وارد بر سامانه نگهداری رابطه‌ای مستقیم دارد و هرچه ضخامت روباره تونل افزایش یابد فشار وارد بر سامانه نگهداری تونل افزایش می‌یابد. به همین منظور برای طبقه‌بندی معیار ضخامت روباره از جدول ۳- ۱۵ استفاده شده است و در ادامه امتیاز پهنه‌های ۲۴ گانه تونل مترو خط ۷ در شکل ۳-۱۲ آمده است.

.

جدول ۳- ۱۵: معیار طبقه‌بندی ضخامت روباره

ردیف	نوع ضخامت	میزان ضخامت روباره (متر)	امتیاز
۱	خیلی زیاد	بیشتر از ۲۰	۰
۲	زیاد	۱۵ تا ۲۰	۱
۳	متوسط	۱۰ تا ۱۵	۲
۴	کم	۵ تا ۱۰	۳
۵	بسیار کم	کمتر از ۵	۴



شکل ۳-۱۲: امتیازدهی ضخامت روباره در پهنه‌های مختلف تونل خط ۷ متروی تهران

در قسمت شمالی جنوبی به دلیل ارتفاع بالای روباره اکثر مناطق امتیاز پایین گرفته‌اند در بقیه پهنه‌ها امتیاز روباره متوسط بوده است. بدیهی است اجرای تونل‌ها در مناطقی با روباره کمتر از دو برابر قطر تونل همواره با مشکلات زیادی به ویژه نشست قابل ملاحظه‌ی سطح زمین مواجه است. در این جا صرفا آثر روباره بر پایداری تونل در نظر گرفته شده‌است.

۳-۲-۲-۴- عوامل مربوط به سامانه نگهداری

سامانه نگهداری تونل‌های شهری به عنوان اصلی‌ترین و مهم‌ترین عامل در پایداری تونل‌های شهری به شمار می‌رود. این عامل خود به چهار عامل ظرفیت باربری سامانه نگهداری، صلبیت سامانه نگهداری، کیفیت اجرای تزریق و کیفیت مصالح مورد استفاده تقسیم شده است؛ در ادامه به توضیح

هر یک پرداخته خواهد شد.

الف- ظرفیت باربری سامانه نگهداری

سامانه نگهداری در تونل‌های حفاری‌شده توسط TBM[1] شامل قطعات پیش‌ساخته بتنی است که در جهت طولی و شعاعی به صورت مفصلی به یکدیگر متصل شده‌اند. ظرفیت باربری سامانه نگهداری تونل یکی از عوامل مهم در پایداری سازه زیرزمینی است. این عامل طبق جدول ۳- ۱۶ تقسیم‌بندی شده است. از رابطه ۳-۱ ارتفاع قوس فشار بدست می‌آید که در حدود ۲۹ متر است، بنابراین مقدار فشار عمودی برابر ۰/۷۳۸ مگاپاسگال است.

$$H = 1.5(B + H_t) \qquad (۱-۳$$

که در آن:

H: ارتفاع قوس فشار

H_t: ارتفاع تونل

B: عرض تونل

از رابطه ۳-۲ مقدار تنش بحرانی محاسبه می‌شود که مقدار آن برابر ۲/۷۴ مگاپاسکال است. همچنین بر اساس گزارش شرکت سپاسد ظرفیت باربری سامانه نگهداری ۱۵ مگاپاسگال است (Sepsad.2008). بنابراین امتیازدهی تونل خط ۷ مترو تهران طبق شکل ۳-۱۳ است.

$$\sigma = \frac{1}{2} p_z [(1+k)(1+\frac{a^2}{r^2}) - (1-k)(1+3\frac{a^4}{r^4})\cos 2\theta \qquad (۲-۳$$

σ: تنش بحرانی

p_z: فشار عمودی

1- Tunnel Boring Machine

k: نسبت فشار افقی به عمودی (در اینجا برابر ۱/۵ است)

a: فاصله از مرکز تونل

r :شعاع تونل

همچنین با استفاده ازنمودار اندر کنش نیروی محوری- لنگر خمشی داده شده در گزارش طراحی سگمنت شرکت مشاور ساحل حداکثر بار محوری برابر ۶۰۰ تن است (مشاور ساحل ۱۳۸۸). و از طریق رابطه ۳-۳ می‌توان ظرفیت باربری سامانه را محاسبه نمود که برابر ۱۸/۵ مگاپاسگال می‌شود.

$$\sigma_{\max} = \frac{M \times Y}{I} + \frac{P}{A} \qquad (۳-۳$$

σ_{Max}: ظرفیت باربری سامانه

M: ممان وارد بر سامانه نگهداری

Y: نصف ضخامت سگمنت

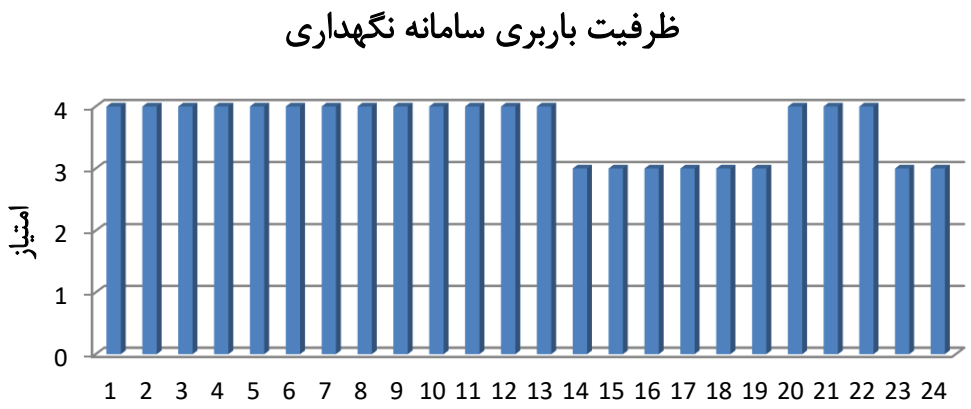
I: ممان اینرسی

P: نیروی محوری

A: سطح مقطع سگمنت (با در نظر گرفتن یک متر طول برابر با عرض سگمنت)

جدول ۳- ۱۶: معیار طبقه‌بندی ظرفیت باربری سامانه نگهداری

ردیف	ظرفیت باربری سامانه نگهداری	رده	امتیاز
۱	عالی	تنش وارد بر سامانه نگهداری کم‌تر از ۱۰ درصد ظرفیت باربری سامانه نگهداری	۴
۲	خوب	تنش وارد بر سامانه نگهداری بین ۱۰ تا ۲۵ درصد ظرفیت باربری سامانه نگهداری	۳
۳	متوسط	تنش وارد بر سامانه نگهداری بین ۲۵ تا ۴۰ درصد ظرفیت باربری سامانه نگهداری	۲
۴	کم	تنش وارد بر سامانه نگهداری بین ۴۰ تا ۵۰ درصد ظرفیت باربری سامانه نگهداری	۱
۵	خیلی کم	تنش وارد بر سامانه نگهداری بیش از ۵۰ درصد ظرفیت باربری سامانه نگهداری	۰



شکل ۳-۱۳: امتیازدهی ظرفیت باربری سامانه نگهداری در پهنه‌های مختلف در تونل خط ۷ متروی تهران

در این قسمت صرفا بار روباره که از قوس فشار ترزاقی بدست می‌آید استفاده شده است.

میلگردهای مورد استفاده در سازه از نوع آجدار AIII با حداقل تنش جاری شدن ۴۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع یا معادل آن است.

کلیه ورق‌ها و پروفیل‌های فولادی از نوع ST37 با تنش جاری شدن ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و یا سایر انواع فولادهای ساختمانی است. مشخصات بتن مصرفی مطابق جدول ۳- ۱۷ آمده است.

جدول ۳- ۱۷: مشخصات بتن مصرفی در سامانه نگهداری تونل خط ۷ مترو تهران (مشاور ساحل، ۱۳۸۸)

مقاومت ۲۸ روزه نمونه استوانه‌ای	۴۰MPa
مدول الاستیسیته	۳۰۰۰۰MPa
ضریب پواسون	۰/۸
جرم واحد حجم بتن	۲۵۰۰Kg/m3
مدول گسیختگی بتن	۴/۴۲MPa

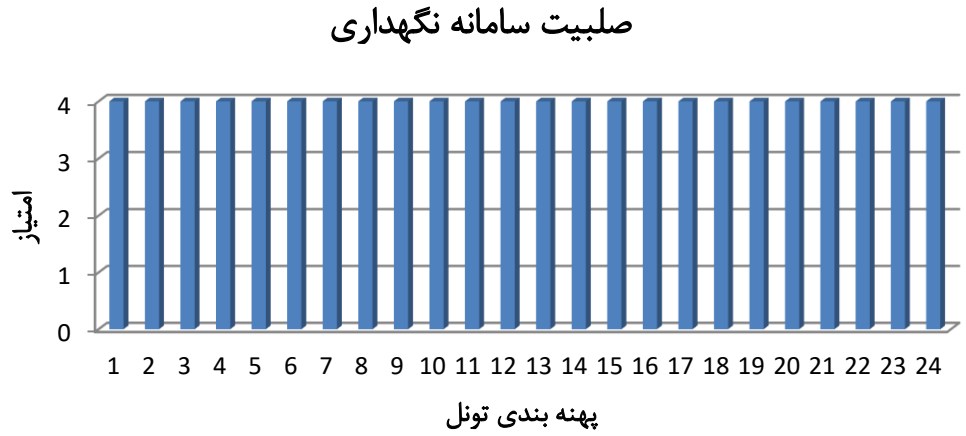
ب- صلبیت سامانه نگهداری

صلبیت سامانه نگهداری یکی دیگر از عوامل موثر در پایداری سامانه نگهداری است. در تونل‌های کم عمق هر قدر صلبیت سامانه نگهداری بیشتر باشد پایداری سامانه نگهداری نیز بیشتر خواهد بود.

بدین منظور در جدول ۳- ۱۸ معیار صلبیت سامانه نگهداری طبقه‌بندی شده است. صلبیت سامانه نگهداری برابر ۱۰۰۰۰ مگاپاسگال بر متر است (حیدری شیبانی و همکاران، ۱۳۹۱) که در رده عالی جدول ۳- ۱۸ قرار می‌گیرد بنابراین امتیازدهی مسیر تونل خط۷ مترو تهران طبق شکل ۳-۱۴ خواهد بود.

جدول ۳- ۱۸: معیار طبقه‌بندی صلبیت سامانه نگهداری

ردیف	صلبیت سامانه نگهداری	رده	واحد	امتیاز
۱	عالی	بیش‌تر از $۱۰^{۹}$	N/m	۴
۲	خوب	بین$۱۰^{۸}$ تا $۱۰^{۹}$	N/m	۳
۳	متوسط	بین $۱۰^{۷}$ تا $۱۰^{۸}$	N/m	۲
۴	کم	بین $۱۰^{۶}$ تا $۱۰^{۷}$	N/m	۱
۵	خیلی کم	کم‌تر از $۱۰^{۶}$	N/m	۰



شکل ۳-۱۴: امتیازدهی صلبیت سامانه نگهداری در پهنه‌های مختلف تونل خط ۷ متروی تهران

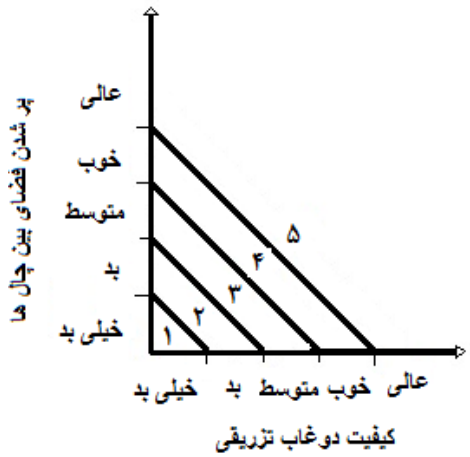
پ- کیفیت اجرای تزریق

اجرای تزریق مناسب و خوب در پایداری تونل مترو به دلیل پُر کردن فضای خالی بین سگمنت و دیواره تونل و همچنین جلوگیری از نشست زمین که باعث تغییر در مقاومت زمین می‌شود، تاثیر به‌سزایی دارد. بدین منظور معیار کیفیت اجرای تزریق در جدول ۳- ۱۹ طبقه‌بندی شده است. در شکل ۳-۱۵ رده‌بندی اجرای کیفیت تزریق بر اساس فاصله بین چال‌های تزریق و کیفیت دوغاب تزریق نشان داده

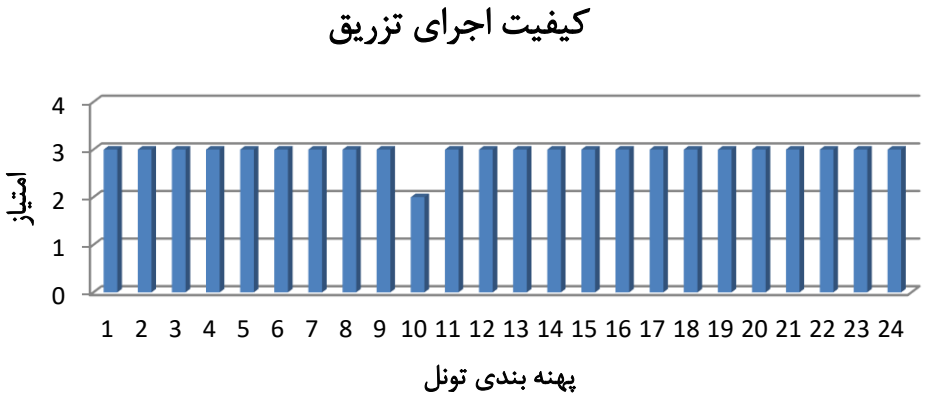
شده است. در شکل ۳-۱۶ امتیازدهی پهنه‌های ۲۴ گانه تونل مترو خط ۷ تهران آمده است. لازم به ذکر است این امتیازدهی صرفا بر اساس مصاحبه با متخصصان انجام شده است.

جدول ۳- ۱۹: معیار طبقه‌بندی کیفیت اجرای تزریق بر اساس کیفیت دوغاب تزریق

ردیف	کیفیت اجرای تزریق	رده	امتیاز
۱	خیلی بد	۱	۰
۲	بد	۲	۱
۳	متوسط	۳	۲
۴	خوب	۴	۳
۵	عالی	۵	۴



شکل ۳-۱۵: رده‌بندی کیفیت اجرای تزریق بر اساس کیفیت دوغاب تزریقی و فضای پرشده (یزدیان، ۱۳۹۳)



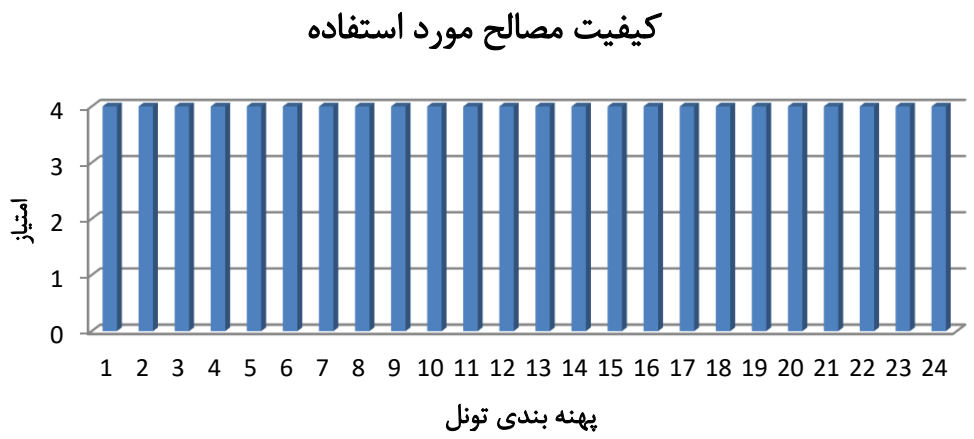
شکل ۳-۱۶: امتیازدهی کیفیت تزریق در پهنه‌های مسیر تونل خط ۷ متروی تهران

ت- کیفیت مصالح مورد استفاده

کیفیت و استانداردهای مصالح استفاده شده در هر سازه در عمر و کاربری بهینه آن سازه نقشی اساسی ایفا می‌کند. بنابراین استفاده از مصالح باکیفیت و استفاده صحیح از آن در عمر پروژه مهمی چون مترو اَمری مهم است. بدین منظور معیار کیفیت مصالح مورد استفاده در جدول ۳- ۲۰ طبقه‌بندی شده است و امتیازدهی این عامل در پهنه‌های ۲۴ گانه خط ۷ متروی تهران در شکل ۳-۱۷ آمده است.

جدول ۳- ۲۰: معیار طبقه‌بندی کیفیت مصالح مورد استفاده

ردیف	کیفیت مصالح	توضیحات	امتیاز
۱	بد	مصالح بدون هیچ‌گونه نظارتی مورد استفاده قرارگرفته‌اند	۰
۲	متوسط	نظارت بر مصالح مورد استفاده بسیار کم و مقطعی بوده است	۱
۳	خوب	نظارت بر کیفیت مصالح مورد استفاده به صورت دوره‌ای انجام شده است	۲
۴	خیلی خوب	نظارت بر مصالح مورد استفاده از طریق یک ناظر دایمی انجام شده است	۳
۵	عالی	نظارت بر مصالح مورد استفاده توسط یک ناظر دایمی و طبق استانداردها و آیین‌نامه‌های معتبر انجام گرفته است	۴



شکل ۳-۱۷: امتیازدهی کیفیت مصالح مورد استفاده در پهنه‌های مسیر تونل خط ۷ متروی تهران

از طریق مصاحبه با متخصصان و گروه اجرایی مشخص شد که مصالح مورد استفاده در تونل خط

۷ تهران بر اساس استانداردها و آیین‌نامه‌های معتبر ساخته شده است. بنابراین به این عامل در تمام پهنه‌ها امتیاز چهار تعلق گرفت.

۳-۲-۲-۵- عوامل مربوط به بارهای زنده و دینامیکی

در هنگام بهره‌برداری از تونل‌های مترو علاوه بر بارهای مرده بارهای زنده و دینامیکی ترافیک شهری به سامانه نگهداری وارد می‌شود؛ بنابراین بررسی پایداری سازه زیرزمینی در مقابل بارهای دینامیکی از قبیل زلزله، برخورد پرتابه، انفجار سطحی، زمین لغزش و غیره به خاطر اهمیت حیاتی آن‌ها در زمان‌های خاص و پایداری بیشتر آن‌ها نسبت به سازه‌های سطحی ضروری است (میرزینلی و کولیوند، ۱۳۹۰).

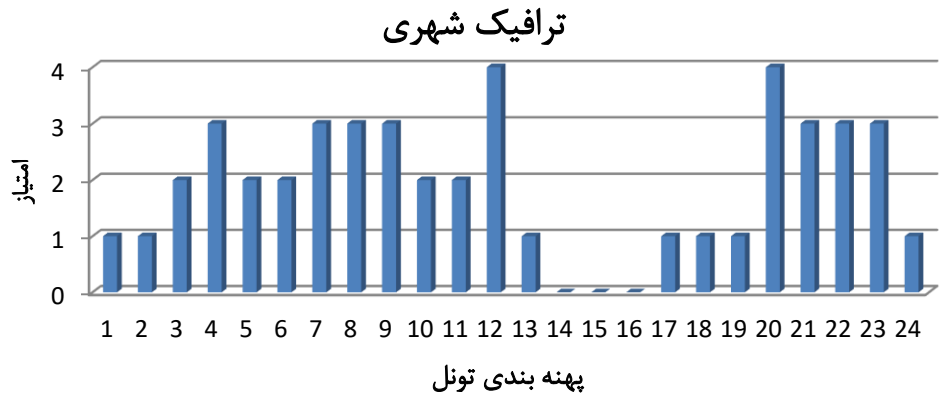
الف- ترافیک شهری

یکی از بارهایی که به سامانه نگهداری وارد می‌شود و در طول شبانه‌روز متفاوت است بار ناشی از ترافیک شهری است که به عرض خیابان و شلوغی خیابان وابسته است. این بار به دلیل این‌که در طول روز کم و زیاد می‌شود می‌تواند موجب خستگی در سامانه نگهداری شود. بدین منظور معیار ترافیک شهری در جدول ۳- ۲۱ طبقه‌بندی شده است و در شکل ۳-۱۹ امتیاز پهنه‌های ۲۴ گانه تونل خط ۷ متروی تهران نشان داده شده است.

شکل ۳-۱۸: رده‌بندی ترافیک شهری بر اساس عرض خیابان و شلوغی مسیر

جدول ۳- ۲۱: معیار طبقه‌بندی ترافیک شهری بر اساس پهنای خیابان و شلوغی مسیر

ردیف	نوع ترافیک	رده	امتیاز
۱	خیلی بد	۵	۰
۲	بد	۴	۱
۳	متوسط	۳	۲
۴	خوب	۲	۳
۵	عالی	۱	۴



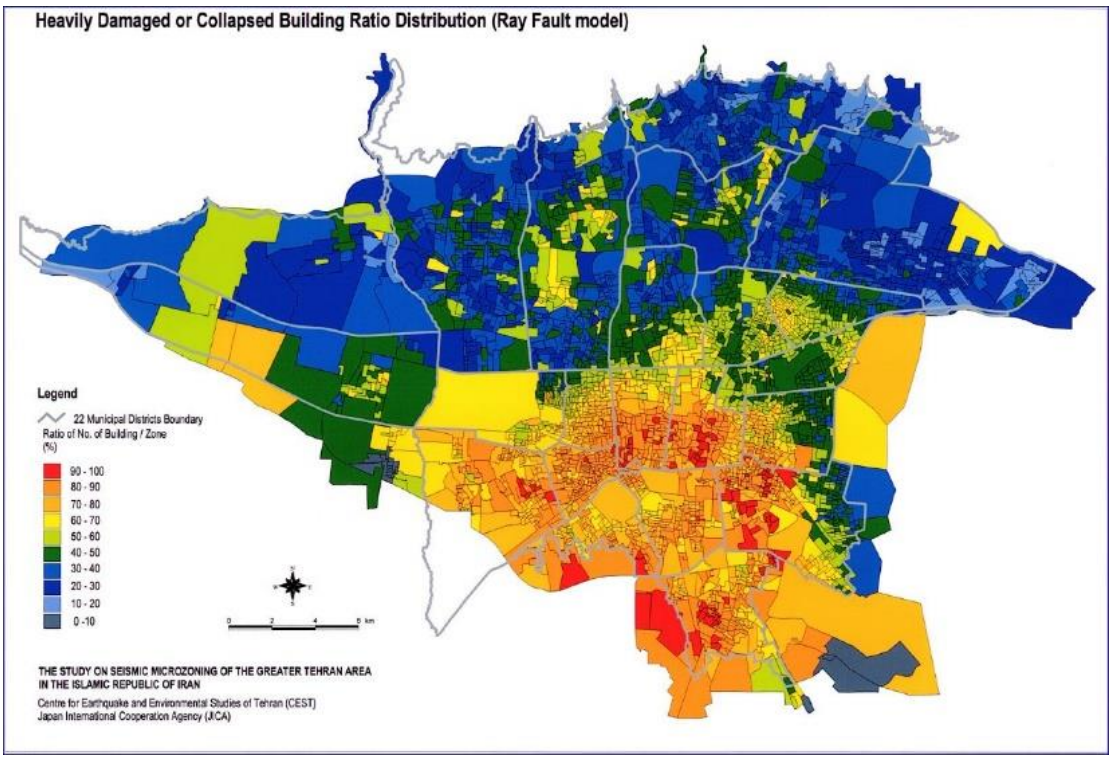
شکل ۳-۱۹: امتیازدهی ترافیک شهری در پهنه‌های مسیر تونل خط ۷ متروی تهران

محدوده شرقی- غربی به دلیل عرض کم خیابان‌ها به نسبت امتیاز بالاتری دریافت کرده است. ولی محدوده بزرگراه نواب به دلیل شلوغی بزرگراه در ساعاتی از روز و همچنین پهنای زیاد خیابان دارای امتیاز پایینی است در قسمت پایانی این مسیر نیز ترافیک کم‌تر می‌شود.

ب- زلزله

ایران یکی از کشورهای لرزه‌خیز جهان است که در امتداد کمربند لرزه‌خیز آلپ هیمالیا قرار دارد. فلات ایران در چند صد سال اخیر شاهد وقوع زمین‌لرزه‌های مخرب و ویرانگری بوده که تلفات و خسارات سنگینی را به همراه داشته است. با توجه به موقعیت ایران و شواهد تاریخی ثبت‌شده، (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۲) عامل زلزله بر پایداری تونل‌های مترو در درازمدت تاثیر بسزایی دارد. به طور کلی،

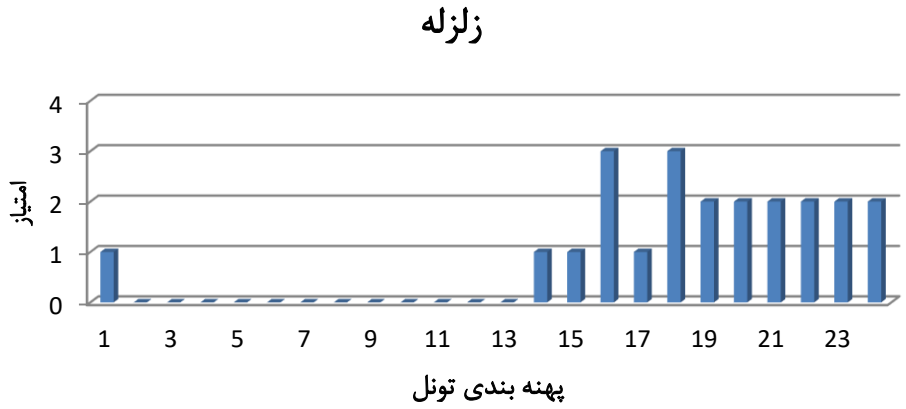
سازه‌های زیرزمینی نسبت به سازه‌های سطحی در برابر زلزله از ایمنی بالاتری برخوردار هستند؛ زیرا سازه‌های سطحی فقط در سطح تحتانی خود به زمین اتصال دارند و به صورت آزاد مرتعش می‌شوند، اما سازه‌های زیرزمینی، درگیری کاملی با محیط در برگیرنده داشته و در برابر لرزش مقاوم‌تر هستند (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۲). زلزله به دلیل واردکردن تنش زیاد در زمانی اندک به عنوان خطرناک‌ترین عامل در پایداری سامانه نگهداری در درازمدت معرفی می‌شود و بار دینامیکی ناشی از آن، در نزدیکی گسل‌های تهران خرابی‌های بیشتری به بار می‌آورد. خط ۷ متروی تهران به دلیل عبور از کنار گسل‌های قصر فیروزه، شمال ری، طرشت، داوودیه و ایوبی در هنگام بروز زلزله بار دینامیکی نسبتاً زیادی را باید تحمل نماید. همچنین بر اساس طبقه‌بندی CEST و JICA مناطق مختلف تهران بر اساس خطر زلزله رده‌بندی شده است در شکل ۳-۲۰ این رده‌بندی مشاهده می‌شود. در جدول ۳- ۲۲ معیاری برای طبقه‌بندی خطر زلزله ارایه شده است. در شکل ۳-۲۱ پهنه‌های ۲۴ گانه تونل خط ۷ متروی تهران امتیازدهی شده است.



شکل ۳-۲۰: نرخ خطر وقوع زلزله و خرابی منتج از آن بر اساس گسل‌های موجود (CEST & JICA, 2000)

جدول ۳- ۲۲: معیار طبقه‌بندی خطر وقوع زلزله و خرابی منتج از آن (CEST & JICA, 2000)

ردیف	خطر وقوع زلزله و شدت خرابی	نرخ خطر	امتیاز
۱	خطر وقوع زلزله و میزان خرابی کم	۰ تا ۲۰ درصد	۴
۲	خطر وقوع زلزله و میزان خرابی متوسط	۲۰ تا ۴۰ درصد	۳
۳	خطر وقوع زلزله و میزان خرابی زیاد	۴۰ تا ۶۰ درصد	۲
۴	خطر وقوع زلزله و میزان خرابی خیلی زیاد	۶۰ تا ۸۰ درصد	۱
۵	خطر وقوع زلزله و میزان خرابی بسیار زیاد	۸۰ تا تا ۱۰۰	۰



شکل ۳-۲۱: امتیازدهی خطر خرابی ناشی از وقوع زلزله در پهنه‌های مسیر تونل خط ۷ متروی تهران

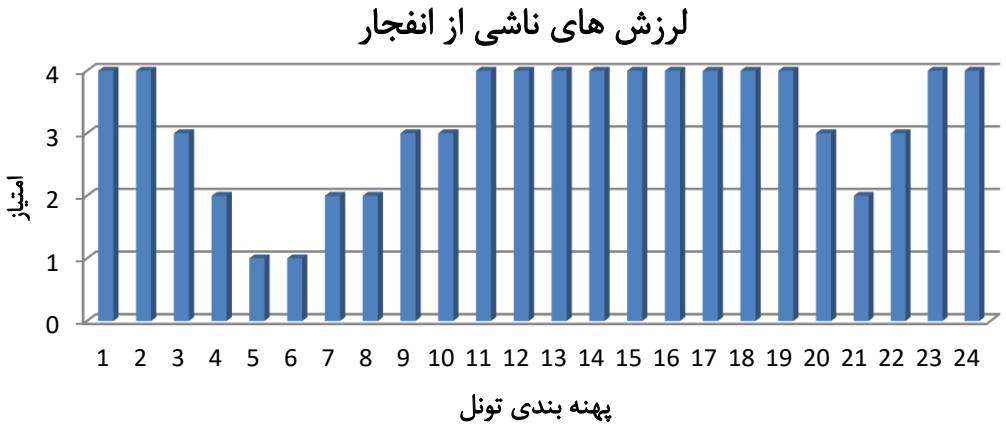
پ- لرزش‌های ناشی از انفجار

سازه‌های زیرزمینی به دلیل طول عمر بیشتر در بحث پدافند غیرعامل از اهمیت بالایی برخوردارند بنابراین باید تمامی بارهایی که به آن‌ها وارد می‌شود از جمله بار دینامیکی ناشی از پرتابه‌ها (موشک)، انفجارهای سطحی و زیرسطحی (بمب‌گذاری‌ها و انفجار در خطوط گاز) و غیره را مورد بررسی قرارداد. بدین منظور برای طبقه‌بندی، از رده‌بندی حداکثر سرعت مجاز[1] برای سازه‌های بتنی (Lopez Jimeno, et al., 1995) استفاده شده است. امتیازدهی این عامل در پهنه‌های ۲۴ گانه مترو خط ۷ تهران در شکل ۳-۲۲ نشان داده شده است.

1- PPV

جدول ۳- ۲۳: معیار طبقه‌بندی لرزش‌های ناشی از انفجار (Lopez Jimeno, et al., 1995)

ردیف	نوع لرزش	مقدار PPV(mm/s)	امتیاز
۱	لرزش خیلی شدید	۱۰۰	۰
۲	لرزش شدید	۵۰	۱
۳	لرزش متوسط	۲۵	۲
۴	لرزش ناچیز	۱۰	۳
۵	لرزش بدون خطر یا عدم لرزش	۵	۴



شکل ۳-۲۲: امتیازدهی لرزش‌های ناشی از انفجار در پهنه‌های مسیر تونل خط ۷ متروی تهران

در این عامل، به نواحی که ممکن است خطهای مترو آینده شهر تهران از آنها عبور کنند از لحاظ وقوع انفجار (انفجارهای عملیاتی) امتیاز پایین داده شده است. همچنین به نواحی حساس و شلوغ در محدوده بازار تهران و برج میلاد از نظر احتمال وقوع انفجار (انفجارهای ناشی از حملات تروریستی) امتیاز پایین داده شده است.

۳-۲-۲-۶- عوامل غیر مترقبه

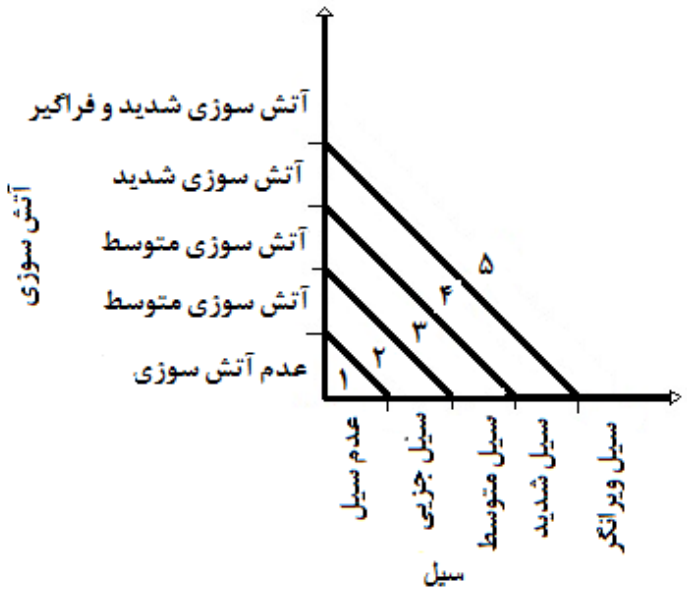
الف- سیل و آتش‌سوزی

یکی دیگر از عواملی که در بلند مدت پایداری تونل مترو را تهدید می‌کند، سیل و آتش‌سوزی است. سیل و آتش‌سوزی می‌تواند موجب خرابی بخشی از تونل و یا باعث کاهش استحکام تونل در طول

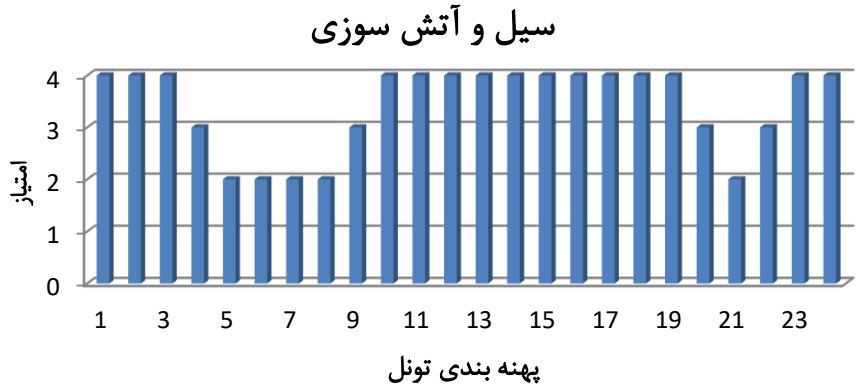
مدت بهره‌برداری شود که این عامل در صورت تکرار و یا وسعت منطقه تحت پوشش می‌تواند در درازمدت پایداری سامانه نگهداری را با خطر روبرو کند. بدین منظور معیار طبقه‌بندی سیل و آتش‌سوزی در جدول ۳- ۲۴ آمده است. در شکل ۳-۲۳ برای طبقه‌بندی این معیار دو عامل سیل و آتش‌سوزی باهم ادغام‌شده‌اند و امتیازدهی این معیار در پهنه‌های ۲۴ گانه تونل مترو خط ۷ در شکل ۳-۲۴ آمده است.

جدول ۳- ۲۴: معیار طبقه‌بندی خطر وقوع سیل و آتش‌سوزی (یزدیان، ۱۳۹۳)

ردیف	نوع آتش‌سوزی یا سیل	رده	امتیاز
۱	سیل و آتش‌سوزی شدید و فراگیر	۵	۰
۲	سیل و آتش‌سوزی شدید	۴	۱
۳	سیل و آتش‌سوزی متوسط	۳	۲
۴	سیل و آتش‌سوزی جزیی	۲	۳
۵	عدم سیل و آتش‌سوزی	۱	۴



شکل ۳-۲۳: رده‌بندی خطر وقوع سیل و آتش‌سوزی (یزدیان، ۱۳۹۳)



شکل ۳-۲۴: امتیازدهی سیل و آتش‌سوزی پهنه‌های مسیر تونل خط ۷ متروی تهران

در این عامل به محدوده بازار به دلیل شلوغی و احتمال سرایت آتش‌سوزی به تونل مترو امتیاز پایین داده شده است، همچنین در محدوده برج میلاد به دلیل حساس بودن این منطقه و احتمال آتش‌سوزی بعد از انفجار امتیاز پایین داده شده است. در این عامل همچنین به پهنه‌های تشکیل دهنده قطعه شمالی - جنوبی تونل خط ۷ مترو تهران به دلیل بالا بودن احتمال وقوع سیل نسبت به قطعه شرقی - غربی امتیاز پایین‌تری داده شده است.

۳-۲-۲-۷- عوامل مربوط به عوارض و موانع سطحی و زیرزمینی

عوارض و موانع سطحی و زیرسطحی به دلیل تغییر در تنش منطقه و یا زهکشی برای ورود آب‌های زیرزمینی از عواملی هستند که در زمان طراحی مورد توجه خاصی قرار می‌گیرند. عوامل سطحی مشتمل بر پل‌ها و ساختمان‌های بلند و عوارض زیرسطحی شامل چاه‌ها، لوله‌های فاضلاب، تونل‌های مترو مجاور، ایستگاه‌های مترو و ... هستند. موانع زیرسطحی با دو نوع موانع ارتباط دارد؛ گروه اول موانع کوچک ولی داری خاصیت زهکش آب که می‌تواند موجب بروز ورود سیل به تونل و یا تغییر سطح آب زیرزمینی در منطقه تونل شود از قبیل قنات‌ها، چاه‌های فاضلاب مجاری آب و... . گروه دوم از موانع زیرسطحی موانعی هستند که بزرگ مقیاس هستند و به دلیل ایجاد تمرکز تنش‌های بالا موجب بروز خطراتی برای تونل می‌شوند. برای مثال تونل‌های متروی مجاور مسیر مورد مطالعه، ایستگاه‌های مجاور و تونل‌های حمل‌ونقل

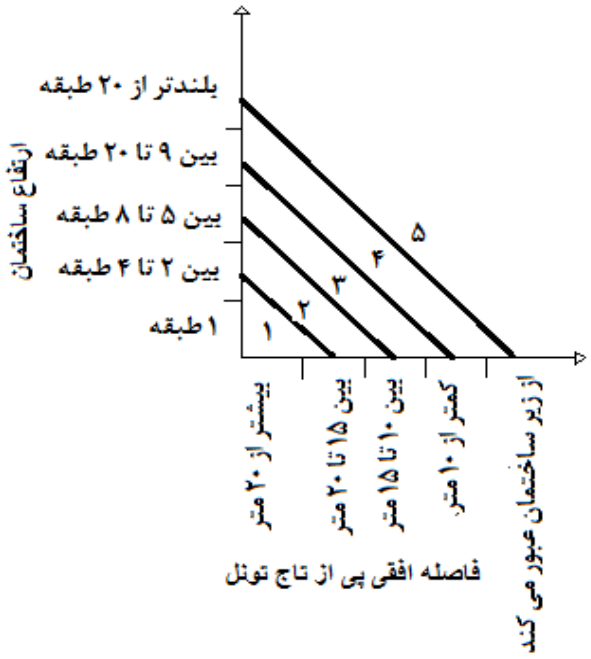
شهری از این دسته از موانع هستند.

الف- وضعیت ساختمان‌های اطراف

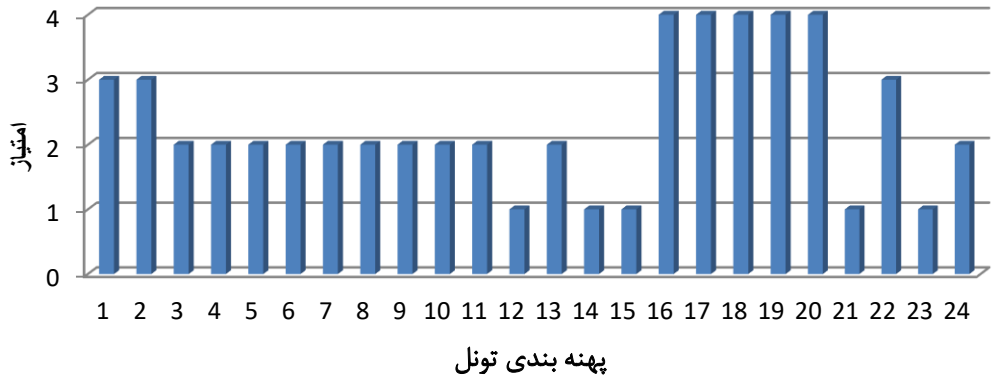
بلندای ساختمان‌های اطراف تونل مترو و پی سنگین و صلب آن‌ها باعث تغییر در شرایط تنش منطقه می‌شود. این تغییر تنش به بلندی ساختمان و نزدیکی آن به تونل بستگی دارد (شکل ۳-۲۵). بدین منظور برای طبقه‌بندی معیار ساختمان‌های اطراف تونل مترو از جدول ۳- ۲۵ استفاده شده است. و امتیازدهی پهنه‌های ۲۴ گانه تونل خط ۷ متروی تهران در شکل ۳-۲۶ آمده است.

جدول ۳- ۲۵: معیار طبقه‌بندی ساختمان‌های اطراف تونل بر اساس فشار اعمالی به تونل مترو

ردیف	وضعیت ساختمان‌ها	رده	امتیاز
۱	فشار کمی به تونل وارد می‌شود	۱	۴
۲	فشار نسبتاً کمی به تونل وارد می‌شود	۲	۳
۳	فشار کمی به تونل وارد می‌شود	۳	۲
۴	فشار زیادی به تونل وارد می‌شود	۴	۱
۵	فشار خیلی زیادی به تونل وارد می-شود	۵	۰



شکل ۳-۲۵: رده‌بندی فشار وارده بر تونل از طرف ساختمان‌ها بر اساس ارتفاع ساختمان و فاصله افقی ساختمان از تاج تونل



شکل ۳-۲۶: امتیازدهی ساختمان‌های اطراف تونل مترو در پهنه‌های مسیر تونل خط ۷ متروی تهران

پهنه‌های ۱ تا ۱۱ به دلیل عبور تونل از زیر خیابان‌های نسبتاً باریک و همچنین وجود ساختمان‌های با بلندی متوسط امتیاز متوسط گرفته است. پهنه‌های ۱۲ تا ۱۵ به دلیل عبور از زیر ساختمان‌ها امتیاز پایینی دریافت کرده است و پهنه‌های ۱۶ تا ۲۰ با عبور از زیر بزرگراه و همچنین عدم وجود ساختمان‌های بلند امتیاز بالا دریافت کرده است. پهنه ۲۱ به دلیل عبور از کنار برج میلاد امتیاز پایینی دریافت کرده است و پهنه ۲۳ نیز به دلیل عبور از زیر ساختمان‌های محدوده سعادت‌آباد امتیاز پایینی دریافت کرده است.

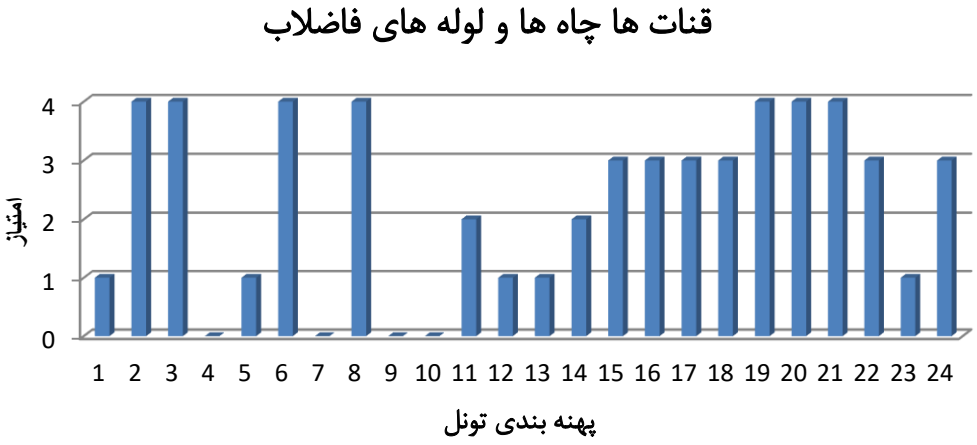
ب- قنات‌ها، چاه‌ها و لوله‌های فاضلاب

قنات‌ها، چاه‌ها و لوله‌های فاضلاب داری خاصیت زهکش آب است که می‌تواند موجب ورود سیل به تونل و یا تغییر سطح آب زیرزمینی در منطقه تونل شود. میزان تاثیر آن‌ها به فاصله از تونل ارتباط دارد. بدین منظور برای طبقه‌بندی معیار قنات‌ها، چاه‌ها و لوله‌های فاضلاب از جدول ۳- ۲۶ استفاده شده است. در این طبقه‌بندی L فاصله مرکز تونل تا مرکز معارض و D قطر معارض زیرسطحی است. همچنین امتیازدهی پهنه‌های ۲۴ گانه تونل خط ۷ متروی تهران در شکل ۳-۲۷ آمده است.

جدول ۳- ۲۶: معیار طبقه‌بندی قنات‌ها، چاه‌ها و لوله‌های فاضلاب بر اساس فاصله و جهت آن‌ها از تونل

ردیف	نوع مجاورت	فاصله	امتیاز
۱	موازی	L>3D	۴
۲	موازی	2D<L<3D	۳
۳	موازی	1.5D<L<2D	۲
۴	موازی	1D<L<1.5D	۱
۵	موازی	L<1.5D	۰
۶	متقاطع	L>3D	۴
۷	متقاطع	2D<L<3D	۳
۸	متقاطع	1.5D<L<2D	۲
۹	متقاطع	1D<L<1.5D	۱
۱۰	متقاطع	L<1 D	۰

منظور از موازی بودن نوع مجاورت این است که محور طولی سازه کم و بیش در راستای محور تونل باشد. به همین ترتیب منظور از مجاورت متقاطع این است که محور طولی سازه تقریباً در امتداد عمود بر محور تونل قرار داشته باشد.



شکل ۳-۲۷: امتیازدهی قنات‌ها، چاه‌ها و لوله‌های فاضلاب در پهنه‌های مسیر تونل خط ۷ متروی تهران

در پهنه‌های ۱، ۴، ۵، ۶، ۷، ۹ و ۱۰ قنات در محدوده تونل وجود دارد و در پهنه‌های ۵، ۶، ۷، ۸، ۹،۱۰، ۱۱و ۱۲ تونل انتقال آب در محدوده تونل وجود دارد و پهنه های ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸ و

۲۳ در محدوده انتقال خط لوله فاضلاب هستند.

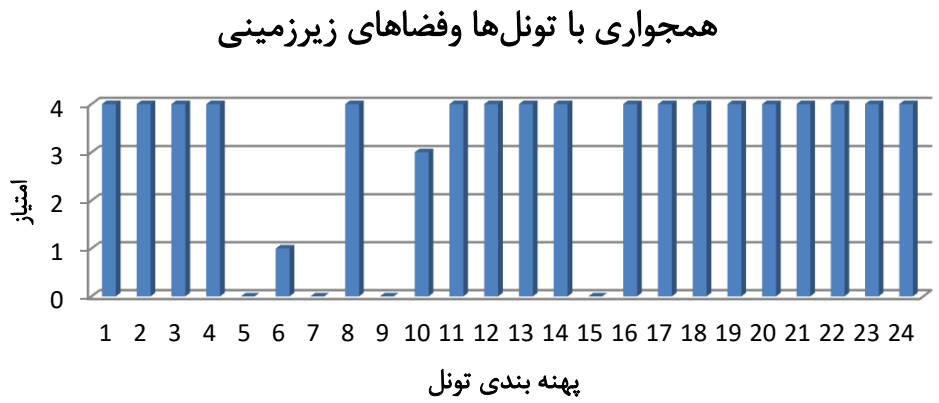
پ- همجواری با تونل‌ها و سایر فضاهای زیرزمینی

تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی بزرگ مقیاس به دلیل ایجاد تمرکز تنش‌های بالا موجب خطر برای تونل مترو می‌شود لذا بررسی آن‌ها در پایداری تونل مترو نقشی اساسی دارد. برای طبقه‌بندی معیار تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی از جدول ۳- ۲۷ استفاده شده است. در این طبقه‌بندی L فاصله مرکز تونل تا مرکز معارض و D قطر معارض است. امتیازدهی پهنه‌های ۲۴ گانه تونل خط ۷ متروی تهران در شکل ۳-۲۸ آمده است.

جدول ۳- ۲۷: معیار طبقه‌بندی تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی بر اساس ناحیه تاثیر و جهت آن‌ها

ردیف	نوع مجاورت	فاصله	امتیاز
۱	موازی	L>3D	۴
۲	موازی	2D<L<3D	۳
۳	موازی	1.5D<L<2D	۲
۴	موازی	1D<L<1.5D	۱
۵	موازی	L<1.5D	۰
۶	متقاطع	L>3D	۴
۷	متقاطع	2D<L<3D	۳
۸	متقاطع	1.5D<L<2D	۲
۹	متقاطع	1D<L<1.5D	۱
۱۰	متقاطع	L<1.5D	۰

منظور از موازی بودن نوع مجاورت این است که محور طولی سازه کم و بیش در راستای محور تونل باشد. به همین ترتیب منظور از مجاورت متقاطع این است که محور طولی سازه تقریباً در امتداد عمود بر محور تونل قرار داشته باشد.

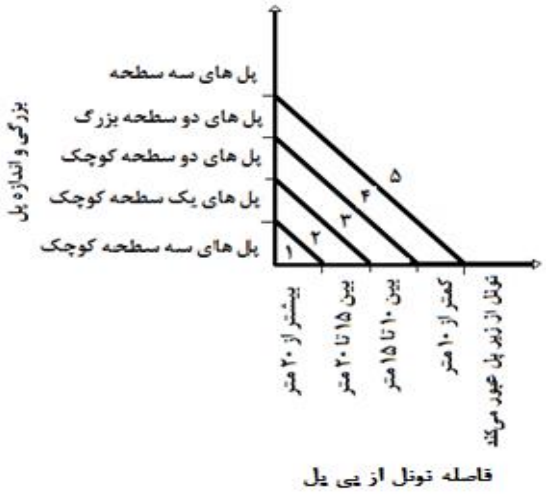


شکل ۳-۲۸: امتیازدهی تاثیر تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی در پهنه‌های مسیر تونل خط ۷ متروی تهران

پهنه ۵ در محدوده ایستگاه F1 (خط ۱) قرار دارد. پهنه‌های ۶ و ۷ در محدوده تونل خیام قرار دارد و پهنه ۹ در محدوده ایستگاه خط ۳ است. همچنین پهنه ۱۵ در محدوده تونل‌های خط ۲ و ۴ مترو تهران و تونل توحید قرار دارد.

ت- پل‌های مجاور سازه

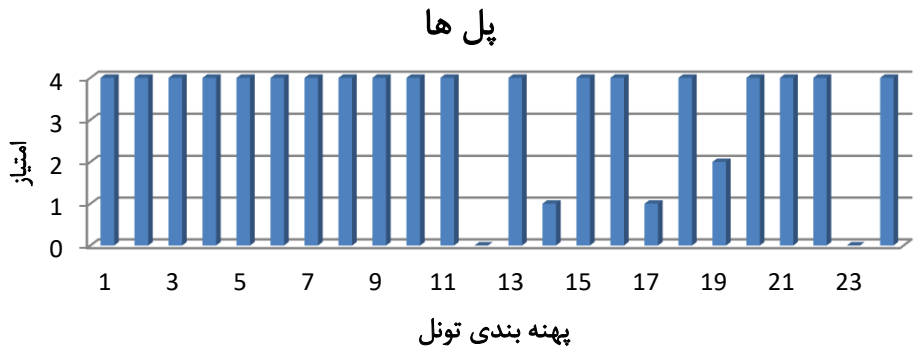
پل‌های ترافیکی به دلیل بار زیادی که به شمع‌ها و از آن جا به زمین وارد می‌کنند، اهمیت زیادی دارند. چنانچه تونل از زیر یا نزدیکی پل عبور کند ممکن است تنش زیادی به پوشش تونل وارد شود که مقدار آن به اندازه و بزرگی پل و فاصله پل از تونل بستگی دارد. در شکل ۳-۲۹ تاثیر پل‌ها بر تونل‌های مترو بر اساس بزرگی و فاصله شمع‌های پل از تونل رده‌بندی شده است. برای طبقه‌بندی معیار پل‌ها از جدول ۳- ۲۸ استفاده شده است و امتیازدهی پهنه‌های ۲۴ گانه تونل خط ۷ مترو تهران در شکل ۳-۳۰ آمده است.



شکل ۳-۲۹: رده‌بندی اهمیت پل بر اساس بزرگی و فاصله تونل از شمع‌های پل (یزدیان، ۱۳۹۳)

جدول ۳- ۲۸: معیار طبقه‌بندی تاثیر پل‌ها بر روی تونل مترو

ردیف	نوع پل	رده	امتیاز
۱	پل بااهمیت خیلی زیاد	۵	۰
۲	پل بااهمیت زیاد	۴	۱
۳	پل بااهمیت متوسط	۳	۲
۴	پل بااهمیت کم	۲	۳
۵	پل بااهمیت ناچیز	۱	۴



شکل ۳-۳۰: امتیازدهی پل‌های موجود در پهنه‌های مسیر تونل خط ۷ متروی تهران

پهنه۱۲ به دلیل عبور تونل از زیر شمع‌های پل قزوین امتیاز صفر، پهنه ۱۴ با عبور از زیر سه پل کوچک، پهنه ۱۷ با عبور از زیر پل صدر، پهنه ۱۹ عبور از کنار پل چمران و پهنه ۲۳ با عبور از زیر پل نیایش امتیازهای پایینی دریافت کرده‌اند.

۳-۲-۲-۸- عوامل مربوط به نیروی انسانی

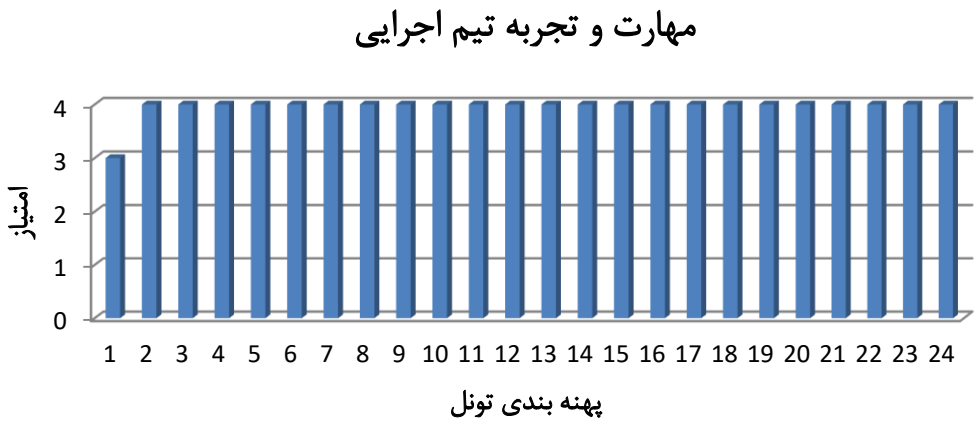
نیروی انسانی در هنگام ساخت و بهره‌برداری از تونل‌های مترو یکی از ارکان اصلی در تضمین پایداری سازه است چرا که در زمان ساخت اگر از نیروی مجرب استفاده نشود ممکن است سامانه نگهداری به استحکام در نظر گرفته‌شده در طراحی‌ها نرسد و اگر در زمان بهره‌برداری نظارت‌های دوره‌ای به خوبی انجام نشود یک مشکل کوچک می‌تواند به مشکل بزرگی تبدیل شود. بدین منظور دو عامل مهارت و تجربه مهندسان، تکنسین‌ها و کارگرها و بازدیدهای دوره‌ای و تعمیرات اساسی در این بخش بررسی می‌شود.

الف- مهارت و تجربه عوامل کارگاهی

کادر مجرب و دانش‌آموخته نه تنها در امر اجرا سرعت عمل بالاتری دارد بلکه طبق طراحی انجام‌شده مراحل ساخت تونل را پیاده‌سازی می‌کند و سامانه نگهداری تونل به حداکثر میزان بارپذیری خود دست می‌یابد. به منظور در نظرگرفتن عامل انسانی در پژوهش حاضر، با نظر کارشناسان شرکت مشاور پروژه‌ی خط ۷ متروی تهران، معیار ارایه شده در جدول ۳- ۲۹ برای طبقه‌بندی این عامل در نظر گرفته شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود این معیار شامل ۵ دسته بوده که با پیشروی ساخت تونل، میزان امتیاز مربوطه افزایش می‌یابد. امتیازدهی پهنه‌های ۲۴ گانه تونل مترو خط ۷ تهران در شکل ۳-۳۱ آمده است.

جدول ۳- ۲۹: معیار طبقه‌بندی مهارت و تجربه عوامل اجرایی (خراسانی،۱۳۹۲)

ردیف	مهارت عوامل اجرایی	امتیاز
۱	تیم اجرایی بدون تجربه قبلی و در ۵۰۰ متر ابتدایی تونل	۰
۲	تیم اجرایی بدون تجربه قبلی و در فاصله ۵۰۰ متر تا ۲۰۰۰ متر حفر تونل	۱
۳	تیم اجرایی بدون تجربه قبلی و در فاصله ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ متری ابتدایی تونل	۲
۴	تیم اجرایی باتجربه قبلی و در ۲۰۰۰ متر ابتدایی تونل و یا بدون تجربه قبلی و در فاصله ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ متری ابتدایی تونل	۳
۵	تیم اجرایی باتجربه قبلی و در فاصله بیشتر از ۵۰۰۰ متری ابتدایی تونل متر به بعد تونل	۴



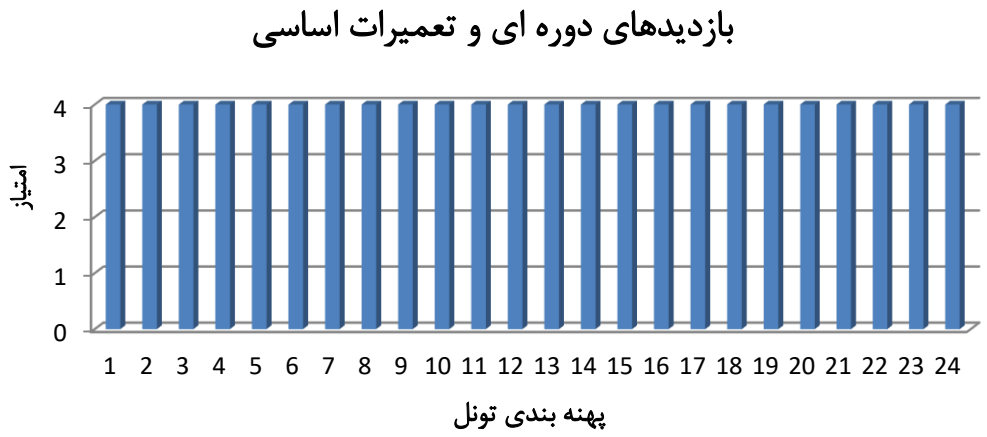
شکل ۳-۳۱: امتیازدهی مهارت و تجربه کادر اجرایی در پهنه‌های مسیر تونل مترو خط ۷ تهران

ب- بازدیدهای دوره‌ای و تعمیرات اساسی

این عامل با حفظ ظرفیت سامانه نگهداری به بالا بردن عمر سامانه نگهداری کمک می‌کند. در جدول ۳- ۳۰ معیار طبقه‌بندی این عامل آمده است. همچنین در شکل ۳-۳۲ امتیازدهی پهنه‌های ۲۴ گانه تونل خط ۷ مترو تهران آمده است. قابل‌ذکر است به دلیل به بهره‌برداری نرسیدن کامل این تونل و همچنین متوقف شدن بهره‌برداری این تونل تمامی پهنه‌ها بالاترین امتیاز را دریافت کرده‌اند.

جدول ۳- ۳۰: معیار طبقه‌بندی عامل بازدیدهای دوره‌ای و تعمیرات اساسی (یزدیان، ۱۳۹۳)

ردیف	کیفیت بازدیدهای دوره‌ای و تعمیرات اساسی	امتیاز
۱	خیلی ضعیف	۰
۲	ضعیف	۱
۳	متوسط	۲
۴	خوب	۳
۵	عالی	۴



شکل ۳-۳۲: امتیازدهی بازدیدهای دوره‌ای و تعمیرات اساسی در پهنه‌های مسیر تونل مترو خط ۷ تهران

۳-۳- جمع‌بندی

در این فصل ابتدا به معرفی تونل خط ۷ متروی تهران پرداخته شد، سپس مفهوم پایداری تونل‌های مترو در زمان بهره‌برداری تعریف شده و عوامل تاثیرگذار بر پایداری تونل‌های مترو در زمان بهره‌برداری شناسایی شده و در ادامه هر یک از عوامل در پهنه‌های ۲۴ گانه تونل خط ۷ متروی تهران امتیازدهی شده است. در فصل آینده به ارایه شاخصی برای پایداری تونل خط ۷ متروی تهران در حین بهره‌برداری پرداخته می‌شود.

فصل چهارم

شاخص پایداری تونل خط ۷ مترو تهران در حین بهره‌برداری

۴-۱- مقدمه

هدف نهایی از پژوهش حاضر برآورد شاخص پایداری تونل مترو (SI) در زمان بهره‌برداری است. بدین منظور در این فصل از روش قضاوت توسط کارشناسان برای کاربرد روش قابلیت اطمینان استفاده شده است.

برای بررسی پایداری تونل در زمان بهره‌برداری با استفاده از روش قابلیت اطمینان می‌توان از روش‌های آماری مختلفی در تحلیل داده‌های مربوط به تونل‌های قبلی که دچار شکست شده‌اند یا اطلاعاتی از یک تونل مبنا که با تونل مورد مطالعه شباهت بسیار زیادی داشته باشد در دسترس باشد استفاده کرد. در صورت عدم وجود داده و یا تونل مبنا می‌توان از روش قضاوت توسط کارشناسان استفاده کرد.

۴-۲- تحلیل پایداری تونل خط ۷ مترو تهران

در این پژوهش به دلیل عدم وجود داده و یا تونل مبنا برای انجام آنالیزها از روش قضاوت توسط کارشناسان استفاده شده است. برای استفاده از روش قضاوت توسط کارشناسان یک فرم نظرسنجی مطابق با جدول۴- ۱ تنظیم شده است. در این فرم نظرسنجی ۲۲ عامل موثر بر پایداری تونل در زمان بهره‌برداری که در فصل(۳) بخش (۲) بحث شد، آورده شده است.

جدول۴- ۱: فرم خام نظرسنجی برای جمع‌آوری نظرات کارشناسان

ردیف	عامل	درجه اهمیت عامل در تونل مورد مطالعه	وزن اختصاص داده شده به هر عامل توسط کارشناس		
			حداقل	میانه	حداکثر
۱	مقاومت خاک				
۲	قابلیت تورم و لهیدگی				
۳	تنوع و تعداد لایه‌ها				
۴	سطح آب زیرزمینی				
۵	گسل				
۶	رودخانه				
۷	امتداد تونل				
۸	ضخامت رویاره				
۹	ظرفیت باربری سامانه نگهداری				
۱۰	صلبیت سامانه نگهداری				
۱۱	کیفیت اجرای تزریق				
۱۲	کیفیت مصالح مورد استفاده				
۱۳	تراکیک شهری				
۱۴	زلزله				
۱۵	ارزش‌های ناشی از انفجار				
۱۶	سیل و آتشسوزی				
۱۷	وضعیت ساختمان‌های اطراف				
۱۸	قنات‌ها، چاه‌ها و لوله‌های فاضلاب				
۱۹	همجواری یا سایر تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی				
۲۰	پل‌ها				
۲۱	مهارت و تجربه کادر اجرایی				
۲۲	بازدیدهای دوره‌ایی و تعمیرات اساسی تونل				

هر یک از عوامل موثر بر پایداری تونل در زمان بهره‌برداری در تمامی پهنه‌های تشکیل دهنده تونل دارای امتیاز متفاوتی هستند، برای بررسی تاثیر هر عامل بر پایداری تونل در زمان بهره‌برداری هر عامل باید در تمامی پهنه‌ها دارای یک امتیاز واحد باشد، لذا میانگین امتیاز هر عامل را در ۲۴ پهنه را محاسبه کرده و در فرم نظرسنجی به عنوان درجه اهمیت هر عامل در جدول۴- ۲ آورده شده است.

جدول۴- ۲: فرم خام نظرسنجی به همراه امتیاز کلی هر عامل در کل تونل برای جمع‌آوری نظرات کارشناسان

ردیف	عامل	درجه اهمیت عامل در تونل مورد مطالعه	وزن اختصاص داده شده به هر عامل توسط کارشناس		
			حداقل	میانه	حداکثر
۱	مقاومت خاک	۲			
۲	قابلیت تورم و لهیدگی	۲			
۳	تنوع و تعداد لایه‌ها	۳			
۴	سطح آب زیرزمینی	۱			
۵	گسل	۳			
۶	رودخانه	۴			
۷	امتداد تونل	۴			
۸	ضخامت رویاره	۲			
۹	ظرفیت یاریری سامانه نگهداری	۴			
۱۰	صلبیت سامانه نگهداری	۴			
۱۱	کیفیت اجرای تزریق	۳			
۱۲	کیفیت مصالح مورد استفاده	۴			
۱۳	تراکیک شهری	۲			
۱۴	زلزله	۱			
۱۵	ارزش‌های ناشی از انفجار	۴			
۱۶	سیل و آتش‌سوزی	۳			
۱۷	وضعیت ساختمان‌های اطراف	۳			
۱۸	قنات‌ها، چاه‌ها و لوله‌های فاضلاب	۳			
۱۹	همجواری یا سایر تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی	۴			
۲۰	پل‌ها	۴			
۲۱	مهارت و تجربه کادر اجرایی	۴			
۲۲	بازدیدهای دوره‌ایی و تعمیرات اساسی تونل	۴			

در این مطالعه برای استفاده از روش قضاوت توسط کارشناسان از ۱۰ کارشناس با سوابق و تجربه‌های متفاوت و همچنین سِمَت‌های کارگاهی گوناگون و با دارا بودن مدارک تحصیلی در رشته‌های

تحصیلی عمران و معدن استفاده شده است. نمونه‌ای از پرسشنامه‌های تهیه شده برای انجام تحلیل در جدول۴- ۳ آورده شده است.

جدول۴- ۳: پرسشنامه(۶) (کارشناس دارای ۱۰ سال سابقه، سرپرست کارگاه)، درصد کاهش عمر مفید تونل نسبت به تونل مبنا: ۲۰ تا ۳۰

ردیف	عامل	درجه اهمیت عامل در تونل مورد مطالعه	وزن اختصاص داده شده به هر عامل توسط کارشناس		
			حداقل	میانه	حداکثر
۱	مقاومت خاک	۲	۴	۵	۶
۲	قابلیت تورم و لهیدگی	۲	۵	۶/۵	۸
۳	تنوع و تعداد لایه‌ها	۳	۱	۲	۳
۴	سطح آب زیرزمینی	۱	۷	۸/۵	۱۰
۵	گسل	۳	۲	۴	۶
۶	رودخانه	۴	۰	۰/۵	۱
۷	امتداد تونل	۴	۲	۲/۵	۳
۸	ضخامت رویاره	۲	۲	۳	۴
۹	ظرفیت باربری سامانه نگهداری	۴	۲	۳/۵	۵
۱۰	صلبیت سامانه نگهداری	۴	۱	۲	۳
۱۱	کیفیت اجرای تزریق	۳	۱	۲/۵	۴
۱۲	کیفیت مصالح مورد استفاده	۴	۰	۱	۲
۱۳	تراکیک شهری	۲	۱	۳	۵
۱۴	زلزله	۱	۹	۹/۵	۱۰
۱۵	لرزش‌های ناشی از انفجار	۴	۱	۲	۳
۱۶	سیل و آتشسوزی	۳	۱	۱	۳
۱۷	وضعیت ساختمان‌های اطراف	۳	۱	۲	۳
۱۸	قنات‌ها، چاه‌ها و لوله‌های فاضلاب	۳	۱	۲	۳
۱۹	همجواری یا سایر تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی	۴	۲	۳	۴
۲۰	پل‌ها	۴	۱	۲/۵	۴
۲۱	مهارت و تجربه کادر اجرایی	۴	۲	۳	۴
۲۲	بازدیدهای دوره‌ایی و تعمیرات اساسی تونل	۴	۱	۲	۳

در این مطالعه از کارشناسان خواسته شده است تاثیر هر عامل بر پایداری تونل در زمان بهره‌برداری را به وسیله یک امتیاز از بین صفر تا ۱۰ بیان کنند که امتیاز صفر بیان کننده این است که عامل مورد نظر فاقد تاثیر بر پایداری تونل در زمان بهره‌برداری است و امتیاز ۱۰ بیان کننده این است که عامل مورد نظر دارای بیشترین تاثیر بر پایداری تونل در زمان بهره‌برداری است، و برای اینکه نظرات کارشناسان همواره با عدم قطعیت‌هایی همراه است از آنان خواسته شده است که نظرات خود را به صورت یک توزیع مثلثی بیان کنند تا میزان عدم قطعیت موجود در نظرات هر کارشناس به حداقل ممکن کاهش یابد.

در این فرم نظرسنجی همچنین از کارشناسان خواسته شده است که درصد کاهش عمر مفید تونل ناشی از تاثیر از ۲۲ عامل را نسبت به تونل مبنایی که تمامی عوامل در سطح مطلوب و دارای امتیاز ۴ هستند، به صورت یک بازه بیان کنند.

۴-۲-۱- میزان اهمیت عوامل موثر بر پایداری تونل در زمان بهره‌برداری

هر عامل را با $P_i, i = 1, \dots, 22$ معرفی شود. با توجه به تعاریف ارایه شده در فصل ۳ (بخش ۲)، و با توجه به تغییر مشخصات هر پهنه، به هر یک از این عوامل یک مقدار مشخصی از صفر تا ۴ متناسب با هر پهنه تعلق می‌گیرد. به عبارتی، $r(P_i) = r_i, r_i = 0, \dots, 4 ; i = 1, \dots, 22$، که مقدار صفر بیانگر بدترین کیفیت و مقدار ۴ نشان دهنده‌ی بهترین کیفیت عامل مورد نظر در پهنه مورد مطالعه است. طبیعی است که هر کدام از این عوامل به نحوی در پایداری تونل موثر هستند، لذا لازم است میزان اهمیت این عوامل در پایداری تونل محاسبه گردد. در صورت عدم وجود داده‌های واقعی برای تخمین زدن میزان این تاثیرگذاری، می‌توان فرض کرد که طول عمر مفید، علاوه بر اینکه، در ذات خود پدیده‌ای تصادفی است، میزان کاهش مقدار آن در شرایط مختلف تابعی از تاثیرات ناشی از تغییرات عوامل است. به همین منظور لازم است، اهمیت این عوامل از نقطه نظر تاثیر بر کاهش طول عمر مفید تونل، اولویت بندی شود. برای این منظور، با طراحی پرسش نامه‌ای، از مجموع ۱۰ کارشناس، خواسته شده است که این عوامل را اولویت‌بندی کنند. هر کارشناس نظرش را با ارایه یک وزن از ۰ تا ۱۰ برای هر عامل بیان

می‌کند، که وزن صفر بیانگر عدم تاثیر عامل مورد نظر بر طول عمر مفید تونل، و وزن ۱۰ برابر با بیشترین میزان تاثیر بر طول عمر مفید تونل است. برای در نظرگرفتن عدم قطعیت موجود در نظر کارشناس، از کارشناسان خواسته شده است، که وزن عامل مورد نظر را در قالب یک توزیع مثلثی بیان کنند. اگر میزان تاثیرگذاری عامل $P_i, i = 1, \dots, 22$ بر طول عمر مفید تونل برابر با γ در نظر گرفته شود، کارشناس $e_j, j = 1, \dots 10$ نظرش را در رابطه با میزان تاثیرگذاری عامل $P_i, i = 1, \dots, 22$، را با ارایه مجموعه $[\gamma_{i,a}^j, \gamma_{i,b}^j, \gamma_{i,c}^j]$ بیان می‌کند که $\gamma_{i,a}^j$ حداقل، $\gamma_{i,b}^j$ مد، و $\gamma_{i,c}^j$ مقدار حداکثر توزیع مثلثی مربوط به عامل P_i است. برای تعیین میزان اهمیت این عامل در نظر تصمیم گیرنده، می‌توان با اختصاص دادن یک ضریب وزنی به کارشناسان، و سپس با به کار بردن روش میانگین وزنی، میزان اهمیت هر عامل را به‌دست آورد. به عبارتی دیگر، با در نظر گرفتن یک ضریب وزنی و ترکیب نظر کارشناسان با روش میانگین وزنی، می‌توان به یک وزن واحد برای هر عامل رسید که در نهایت توسط تصمیم گیرنده مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به مفهوم میانگین وزنی برای توزیع‌های احتمال می‌توان نوشت:

$$F_{\Gamma_i}^{DM}(\gamma) = \sum_{j=1}^{10} \omega_j F_{\Gamma_i}^j(\gamma) \qquad (۱-۴$$

که در آن $\Gamma_i^j \sim F_{\Gamma_i}^j(\gamma) = Tria[\gamma_{i,a}^j, \gamma_{i,b}^j, \gamma_{i,c}^j]$ ضریب وزنی مربوط به عامل $P_i, i = 1, \dots 22$ بوده که توسط کارشناس $e_j, j = 1, \dots 10$ ارایه شده است و دارای توزیع مثلثی است و $\omega_j \in [0,1]$ ضریب وزنی اختصاص داده شده به کارشناس e_j است. در جدول۴- ۴ به عنوان نمونه، داده‌های مربوط به کارشناس شماره ۱، برای هر عامل آورده شده است.

جدول۴- ۴: داده های ارایه شده برای درجه اهمیت هر عامل موثر بر پایداری تونل توسط کارشناس شماره ۱

شماره کارشناس	۱		
تجربه کارشناس برحسب سال	۵		
	عوامل مهم		
شماره عامل	min	mod	max
۱	۴	۵	۶
۲	۲	۳	۴
۳	۴	۵	۶
۴	۸	۹	۱۰
۵	۱	۱/۵	۲
۶	۱	۲	۳
۷	۱	۲	۴
۸	۱	۲	۳
۹	۳	۴/۵	۶
۱۰	۲	۳	۴
۱۱	۱	۲	۳
۱۲	۰	۱	۲
۱۳	۱	۳	۵
۱۴	۹	۹/۵	۱۰
۱۵	۱	۲	۳
۱۶	۰	۱	۲
۱۷	۲	۳	۴
۱۸	۳	۴	۵
۱۹	۲	۴	۶
۲۰	۱	۱/۵	۲
۲۱	۱	۲	۳
۲۲	۱	۲	۳

وزن مربوط به هر کارشناس در واقع بیانگر برتری نسبی نظر آن کارشناس به بقیه کارشناسان است. اختصاص این وزن بر عهده تصمیم‌گیرنده است و می‌تواند برای هر کارشناس به صورت برابر تعریف گردد، یا متناسب با سطح دانایی و تجربه کارشناس تعیین شود. در هر صورت، مجموع وزن‌های تخصیص

داده شده به کارشناسان برابر با واحد است، یعنی $\sum_{j=1}^{10} \omega_j = 1$.

در این مطالعه ضریب وزنی اختصاص داده شده به هر کارشناس به صورت مستقیم با میزان تجربه آن کارشناس ارتباط دارد. برای این منظور می‌توان ضریب وزنی ω_j را از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$\omega_j = \frac{y_j}{\sum_{j=1}^{10} y_j} \quad (۴-۲$$

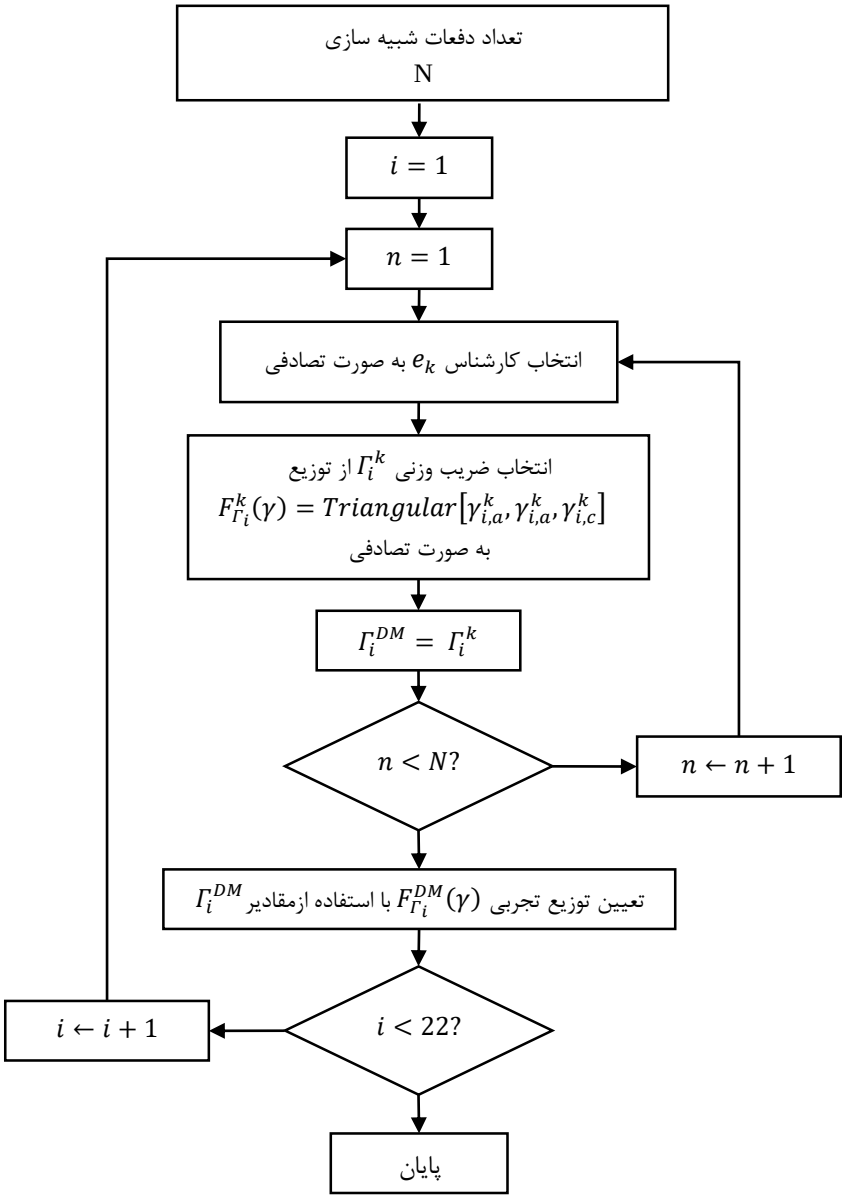
که y_j میزان تجربه کارشناس بر اساس سال است. در جدول۴- ۵ میزان تجربه هر کارشناس و ضریب وزنی اختصاص داده شده به آن کارشناس ارایه شده است.

جدول۴- ۵: میزان تجربه کاری هر کارشناس و ضریب وزنی اختصاص داده شده به آنها

شماره کارشناس	سابقه کارشناس (سال)	ضریب وزنی اختصاص داده شده به کارشناس
۱	۵	۰/۰۷۷
۲	۵	۰/۰۷۷
۳	۲	۰/۰۳۲
۴	۱	۰/۰۱۵
۵	۸	۰/۱۲۳
۶	۲۰	۰/۳۰۷
۷	۶	۰/۰۹۲
۸	۱۰	۰/۱۵۳
۹	۶	۰/۰۹۲
۱۰	۲	۰/۰۳۲

در نهایت با استفاده از رابطه ۴-۱، می‌توان توزیع مربوط به درجه اهمیت هر کدام از عوامل را که توسط تصمیم گیرنده مورد استفاده قرار خواهد گرفت، یعنی $\Gamma_i^{DM} \sim F_{\Gamma_i}^{DM}(\gamma)$، را به‌دست آورد. برای حل این معادله از فرآیند شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است. در این فرآیند ابتدا یک عدد تصادفی از توزیع یکنواخت بین صفر و یک انتخاب می‌شود. با مقایسه آن عدد و ضریب‌های وزنی کارشناسان، در نهایت یک کارشناس انتخاب می‌شود. در مرحله بعد، از توزیع ارایه شده توسط کارشناس انتخاب شده

در مرحله قبل، یک عدد تصادفی که بیانگر میزان اهمیت عامل مورد نظر است، انتخاب می‌گردد. برای هر کدام از عوامل مورد بحث، این دو فرآیند به دفعات زیادی انجام می‌شود و در پایان می‌توان توزیع تجمعی $F_{\Gamma_i}^{DM}(\gamma)$، یا توزیع چگالی مربوط به درجه اهمیت هر عامل را به‌دست آورد. فرآیند شبیه‌ساز مونت کارلو استفاده شده در نرم‌افزار متلب[1] در شکل ۴-۱ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱: فرآیند شبیه‌ساز مونت کارلو برای تعیین توزیع های احتمال درجه اهمیت هر عامل

در جدول۴- ۶، انحراف معیار، میانه، و صدک ۵ و ۹۵ درصد مربوط به هر عامل بعد از ترکیب

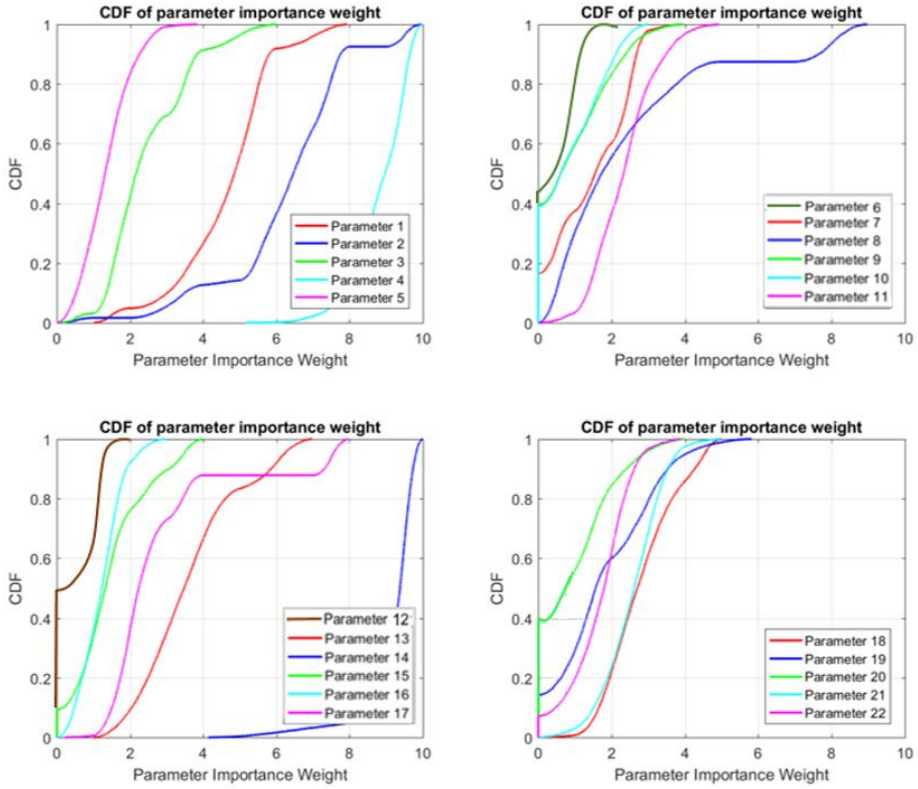
1-Matlab

کردن نظر کارشناسان ارایه شده است. شکل ۴-۲ و شکل ۴-۳ به ترتیب توزیع‌های تجمعی و چگالی مربوط به هر عامل را که با انجام فرآیند شبیه‌ساز مونت کارلو و بعد از انتخاب ۱۰۰۰۰ عدد تصادفی به‌دست آمده است را نشان می‌دهد. تاثیر عدم قطعیت نظر هر کارشناس را در رابطه با عامل مورد نظر می‌توان در شکل ۴-۲ و شکل ۴-۳ مشاهده کرد. باید به این نکته توجه شود همان‌گونه که در جدول۴-۶ ارایه شده است، با توجه به تجمیع نظر تمامی کارشناس ها و به طور میانگین، عوامل شماره ۲، ۴ و ۱۴ به ترتیب دارای بیشترین درجه اهمیت و عوامل شماره ۶، ۱۲ و ۲۰ دارای کمترین درجه اهمیت بر میزان پایداری تونل در زمان بهره‌برداری هستند.

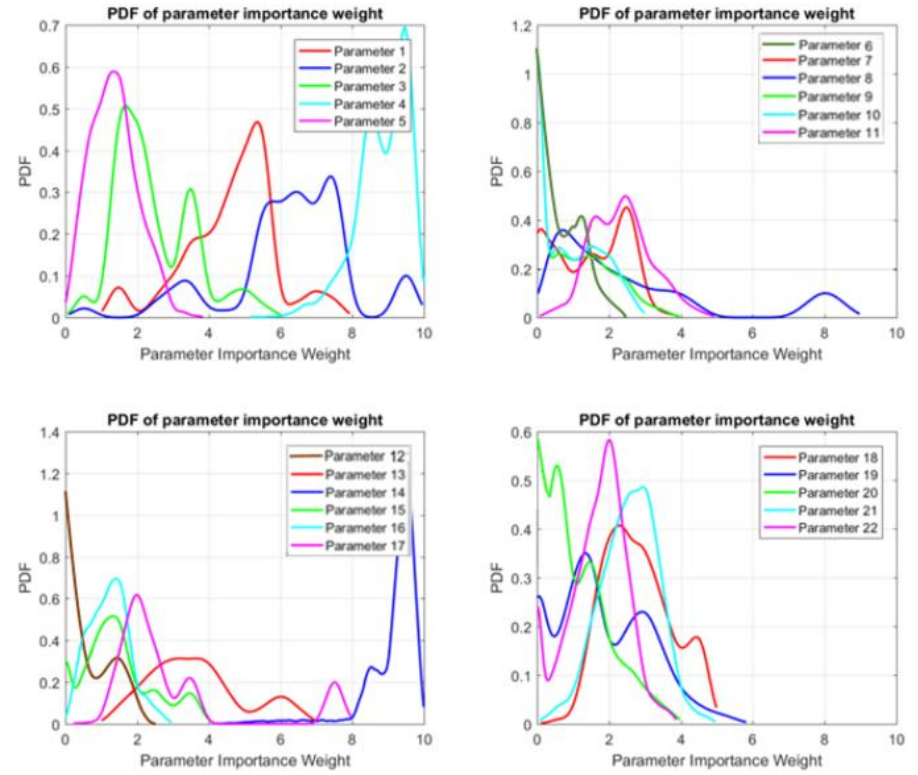
جدول۴- ۶: میانگین، انحراف معیار، میانه، و صدک ۵ و ۹۵ درصد مربوط به هر عامل بعد از ترکیب کردن نظر کارشناس‌ها

Statistics DM's parameter ranks:

	Mean_DM_ranks	Std_dev_DM_ranks	Perc5th_DM_ranks	Perc50th_DM_ranks	Perc95th_DM_ranks
Parameter #1	4.6513	1.2689	2.1589	4.8496	6.866
Parameter #2	6.2762	1.7319	2.9291	6.4624	9.411
Parameter #3	2.4721	1.1089	1.173	2.1664	4.7996
Parameter #4	8.8457	0.72874	7.4539	8.9654	9.7506
Parameter #5	1.3548	0.65186	0.36254	1.3158	2.5304
Parameter #6	0.6375	0.0549	0	0.5316	1.5477
Parameter #7	1.4626	1.0237	0	1.548	2.8216
Parameter #8	2.545	2.3543	0.335	1.729	8.1194
Parameter #9	0.90209	0.9749	0	0.61242	2.7175
Parameter #10	0.83282	0.85694	0	0.60815	2.3679
Parameter #11	2.3375	0.83262	1.1287	2.3285	3.8069
Parameter #12	0.5477	0.4714	0	0.7032	1.5671
Parameter #13	3.6375	1.3246	1.7281	3.4793	6.2067
Parameter #14	9.1474	0.77084	8.0082	9.377	9.8142
Parameter #15	1.4602	0.97976	0	1.3229	3.4714
Parameter #16	1.2194	0.55747	0.34575	1.2298	2.22
Parameter #17	2.8926	1.8301	1.3346	2.237	7.5477
Parameter #18	2.8042	0.94305	1.4382	2.7032	4.5316
Parameter #19	1.8029	1.292	0	1.5624	4.0265
Parameter #20	0.7765	0.90644	0	0.81337	2.8739
Parameter #21	2.5671	0.79525	1.2164	2.6146	3.7765
Parameter #22	1.6781	0.80994	0	1.7927	2.8443



شکل ۴-۲: توزیع تجمعی درجه اهمیت هر عامل که توسط تصمیم گیرنده مورد استفاده قرار می‌گیرد



شکل ۴-۳: توزیع چگالی درجه اهمیت هر عامل که توسط تصمیم گیرنده مورد استفاده قرار می‌گیرد

رفتار تورمی خاک معمولاً در خاک‌هایی مشاهده می‌شود که به اندازه‌ی لازم ذرات ریز دانه رسی داشته باشند. تمایل به جذب آب در این ذرات و تغییر در رطوبت طبیعی خاک در اثر تغییر آب و هوای محل، موجب می‌شود که خاک گاه تا حد درصد رطوبت حد پلاستیک مرطوب شده و سپس تا پایین‌ترین حد انقباض، رطوبت خود را از دست دهد. جذب رطوبت باعث ازدیاد حجم خاک و از دست دادن آن، باعث انقباض و کاهش حجم خاک می‌شود. تغییرات حجمی ناشی از تغییر درصد رطوبت خاک، باعث وارد آمدن خسارت‌هایی به سازه‌های موجود در سطح خاک می‌شود. این نشان دهنده اهمیت مطالعات لازم برای شناسایی رفتار تغییر حجم و فشار تورمی خاک‌های ریز دانه است. پتانسیل تغییر حجم به‌طور مستقیم به میزان فعالیت کانی رسی غالب در خاک و به عبارت دیگر به پلاستیسیته خاک بستگی دارد. در کنار مجموعه عواملی که بیان کننده ترکیبات خاک هستند، مجموعه عوامل محیطی نیز در آزاد شدن این پتانسیل موثرهستند.

اگر میزان رطوبت یک خاک متورم شونده بدون تغییر بماند، قابلیت تورم و لهیدگی وجود نخواهد داشت. از این رو عامل موثر در بررسی قابلیت تورم و لهیدگی خاک، اثر تغییرپذیری رطوبت در محتوای خاک‌های متورم شونده است. به طور کلی در مناطقی که بسته به شرایط محیطی، خاک در معرض تر و خشک شدن متوالی قرار گیرد تغییرات شدید حجمی در آن مشاهده می‌شود. این تغییرات حجمی خاک باعث تغییر حجم خاک در اطراف پوشش تونل می‌گردد که افزایش حجم خاک در اثر جذب رطوبت باعث تغییر در فشارهای جانبی و فشار ناشی از وزن روباره می‌شود و کاهش حجم خاک در اثر از دست دادن رطوبت باعث ایجاد فضای خالی در اطراف پوشش می‌شود که این فضاهای خالی خود زمینه‌ای برای ریزش تونل تلقی می‌شوند. از این رو عامل قابلیت تورم و لهیدگی(عامل شماره ۲) یکی از عوامل با اهمیت زیاد بر پایداری تونل خط ۷ متروی تهران در زمان بهره‌برداری است.

علاوه بر وزن طبیعی آب که موجب فشار دایمی در خاک می‌شود و علاوه بر اثرات طبیعی و مستقل آب در ساختمان‌ها و سازه‌ها، وجود آب بر مقاومت برشی و ظرفیت باربری نهایی خاک‌ها تاثیر محسوسی

دارد. برای مثال خاک‌های رسی با افزایش رطوبت، مقاومت برشی خود را از دست می‌دهند و در عوض در خاک‌های ماسه‌ای رطوبت اندک (به دلیل خاصیت مویینگی) باعث افزایش مقاومت خاک می‌شود هرچند به محض غوطه‌وری مقاومت خود را از دست می‌دهد. همچنین وجود آب و تغییرات مقدار آن تاثیر بسیار زیادی در عامل قابلیت تورم و لهیدگی خاک دارد. از آنجا که عامل سطح آب زیرزمینی (عامل شماره ۴) در اکثر پهنه‌ها دارای امتیاز پایینی است لذا یکی از عوامل پر اهمیت بر پایداری تونل در زمان بهره‌برداری به شمار می‌آید.

بر اساس اطلاعات ثبت‌شده، سازه‌های زیرزمینی نسبت به سازه‌های سطحی در برابر زلزله از ایمنی بالاتری برخوردار هستند؛ زیرا سازه‌های سطحی فقط در سطح تحتانی خود به زمین اتصال دارند و به صورت آزاد مرتعش می‌شوند، اما سازه‌های زیرزمینی، درگیری کاملی با محیط در برگیرنده داشته و در برابر لرزش مقاوم‌تر هستند. آسیب پذیری سازه‌های زیرزمینی در برابر زلزله هم می‌تواند به واسطه گسیختگی زمین در هنگام وقوع زلزله و هم به دلیل ارتعاشات ناشی از زلزله روی دهد. گسیختگی زمین در هنگام وقوع زلزله عمدتاً شامل گسلش، زمین‌لغزش و روانگرایی می‌باشد.

تنش‌های حاصل از گسلش در مقاطع تونل یا سایر سازه‌های زیرزمینی می‌تواند به مراتب از تنش‌های حاصل از لرزش و لغزش بیشتر باشند. طراحی تونل‌ها به نحوی که بتواند در برابر جابجایی‌های چند سانتی‌متری تا چند متری ناشی از گسلش مقاومت کنند، نیز از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست؛ بدین لحاظ مطالعه خطر گسلش در مسیر یک تونل و یا سایر سازه‌های زیرزمینی از اهمیت خاصی برخوردار است. زمین‌لغزش و روانگرایی نیز از پدیده‌های طبیعی ناشی از زلزله است. زمین لغزش‌ها که معمولاً توسط زلزله تحریک می‌گردند، به‌خصوص در ورودی-خروجی تونل‌ها می‌توانند صدمات زیادی را به فضاهای زیرزمینی وارد نمایند. بسیاری از گزارشات مربوط به آسیب فضاهای زیرزمینی در اثر زلزله، به واسطه ایجاد لغزش در ورودی تونل‌ها بوده‌اند. روانگرایی نیز بخصوص چنانچه فضای زیرزمینی در رسوبات سست دارای درصد بالای ماسه و سیلت احداث شده باشد، می‌تواند صدمات زیادی را به فضای

زیر زمینی وارد نماید. این آسیب‌ها بیشتر در رابطه با تونل‌های مترو در نواحی شهری که از رسوبات منفصل عبور می‌کنند دیده شده است.

هر چند که گسیختگی زمین در اثر گسلش، روانگرایی و زمین‌لغزش می‌تواند اثرات ویرانگری را بر سازه‌های زیر زمینی وارد نماید، ولی صدمات ناشی از ارتعاشات زلزله به دلایل زیر به مراتب مهم‌تر از این صدمات هستند:

- صدمات ناشی از گسیختگی (نظیر گسلش یا زمین‌لغزش) در نواحی خاصی اتفاق می‌افتند که می‌توان با مطالعات دقیق زمین‌شناسی مهندسی از قبل این نواحی را شناسایی نموده و تمهیداتی را در آنها در نظر گرفت ولی ارتعاش می‌تواند در اثر جنبش هر گسلی در فواصل دور یا نزدیک به فضای زیرزمینی ایجاد گردد و شدت آن نیز می‌تواند بسیار متغیر باشد.
- ارتعاش منحصر به قسمت خاصی از تونل یا فضای زیرزمینی نمی‌شود و خسارات حاصله در کل مسیر تونل یا فضا می‌تواند ایجاد شود ولی گسلش یا زمین لغزش (و تا حدودی روانگرایی) در قسمت‌های محدودی از مسیر اثر می‌گذارند و به کل سیستم آسیب نمی‌رسانند.
- ارتعاشات ناشی از زلزله می‌تواند به شکل امواج مختلف طولی، عرضی یا برشی فضای زیرزمینی را تحت تاثیر قرار دهند و لذا تغییرشکل‌های گوناگونی در مقاطع یا سازه‌های زیرزمینی در اثر ارتعاش امکان وقوع دارد. امواج اولیه یا P که به موازات محور طولی تونل یا سازه زیرزمینی انتشار می‌یابند، تونل را در جهت طولی دچار فشار یا کشش می‌کنند که می‌تواند باعث ایجاد ترک‌های کششی یا خردشدگی‌های فشاری در امتداد آن گردد. امواج برشی یا S که بخش اصلی انرژی را انتقال می‌دهند، چنانچه در جهت طولی تونل انتشار یابند باعث ارتعاش در جهت عمود بر محور تونل شده و یا ایجاد جابجایی‌های برشی، آسیب‌های زیادی را به فضای زیرزمینی وارد می‌کنند. چنانچه جهات برخورد این امواج با تونل مایل یا عمود بر محور تونل باشد، باز هم شکل‌های دیگری از تغییر مکان در فضای زیرزمینی ایجاد می‌گردد. در حالی که گسیختگی‌های

ناشی از گسلش یا زمین‌لغزش معمولاً جهت تغییرشکل از بررسی‌های ساختگاهی قابل پیش‌بینی است.

زلزله به دلیل واردکردن تنش زیاد در زمانی اندک به عنوان خطرناک‌ترین عامل در پایداری سامانه نگهداری در دراز مدت معرفی می‌شود و بار دینامیکی ناشی از آن، در نزدیکی گسل‌های تهران خرابی‌های بیشتری به بار می‌آورد. خط ۷ متروی تهران به دلیل عبور از کنار گسل‌های قصر فیروزه، شمال ری، طرشت، داوودیه و ایوبی در هنگام بروز زلزله بار دینامیکی نسبتاً زیادی را باید تحمل نماید.

عامل زلزله (عامل شماره ۱۴) بر پایداری تونل‌های مترو در درازمدت تاثیر به‌سزایی دارد، و این عامل در اکثر پهنه‌های تشکیل دهنده تونل خط ۷ مترو تهران دارای امتیاز ضعیفی است لذا این عامل (عامل شماره۱۴) نیز مانند عوامل قابلیت تورم و لهیدگی (عامل شماره ۲) و سطح آب زیرزمینی (عامل شماره ۴) از عوامل پُر اهمیت بر پایداری تونل در زمان بهره‌برداری محسوب می‌شود.

به دلیل اینکه تونل خط ۷ متروی تهران از کنار رودخانه عبور نمی‌کند به همین دلیل در نظرسنجی، کارشناسان ضریب وزنی پایینی به این عامل (عامل شماره ۶) اختصاص دادند. این عامل تمامی پهنه‌های تشکیل دهنده تونل خط ۷ متروی تهران دارای امتیاز ۴ (امتیاز حداکثر) است.

از طریق مصاحبه با متخصصان و گروه اجرایی مشخص شده کلیه مصالح مصرفی در ساخت تونل خط ۷ متروی تهران (عامل ۱۲) براساس استانداردها و آیین‌نامه‌های معتبر استفاده شده است، بنابراین عامل کیفیت مصالح در تمامی پهنه‌های تشکیل دهنده تونل خط ۷ متروی تهران دارای امتیاز ۴ است.

پل‌های ترافیکی همجوار سازه (عامل شماره ۲۰) به دلیل بار زیادی که به شمع‌ها و از آن جا به زمین وارد می‌کنند، اهمیت زیادی دارند. چنانچه تونل از زیر یا نزدیکی پل عبور کند ممکن است تنش زیادی به پوشش تونل وارد شود که مقدار آن به اندازه و بزرگی پل و فاصله پل از تونل بستگی دارد. به دلیل اینکه از پهنه‌های تشکیل دهنده تونل خط ۷ مترو تهران تنها پهنه‌های ۱۲ و ۲۳ از زیر پل‌های با اهمیت زیاد عبور می‌کنند و مابقی پهنه‌ها داری امتیاز بالایی هستند.

۴-۲-۲- تعریف و محاسبه شاخص پایداری کلی

تونل‌ها از تعداد پهنه‌های مختلفی با مشخصات متفاوت تشکیل شده‌اند. طول عمر هر کدام از پهنه‌ها تابع ۲۲ عامل بحث شده در فصل سه است که هر کدام مقدار مشخصی از ۰ تا ۴ دارند ، یعنی $r(P_i) = r_i, i = 0, \dots, 4$. در این بخش یک شاخص کلی برای بررسی میزان طول عمر مفید هر پهنه ارایه می‌شود.

در بخش قبلی با توجه به نظر کارشناسان، اهمیت هر کدام از ۲۲ عامل به صورت نسبی رتبه‌بندی شده است، که رتبه ۱۰ بیشترین اهمیت و رتبه صفر کمترین اهمیت را دارد. برای ارایه یک شاخص کلی که بیانگر تمامی این ۲۲ عامل باشد، مجددا از میانگین وزنی استفاده شده است. با توجه به این که درجه اهمیت هر عامل، اکنون یک توزیع احتمال را دنبال می‌کند ($\Gamma_i^{DM} \sim F_{\Gamma_i}^{DM}(\gamma)$)، شاخص پایداری کلی تعریف شده برای هر پهنه نیز دارای یک توزیع احتمال خواهد بود. قبل از ارایه رابطه میانگین وزنی برای شاخص پایداری کلی، باید ضریب‌های وزنی اهمیت هر عامل به صورت نرمال تعریف شود، یعنی حاصل جمع ضریب‌های وزنی برای تمامی ۲۲ عامل برابر با واحد باشد. اگر ضریب وزنی نرمال شده عامل $P_i, i = 1, \dots, 22$ را که توسط تصمیم گیرنده مورد استفاده قرار می‌گیرد با Δ_i^{DM} نمایش دهیم، خواهیم داشت:

$$\Delta_i^{DM} = \frac{\Gamma_i^{DM}}{\sum_{i=1}^{22} \Gamma_i^{DM}} \qquad (۴-۳$$

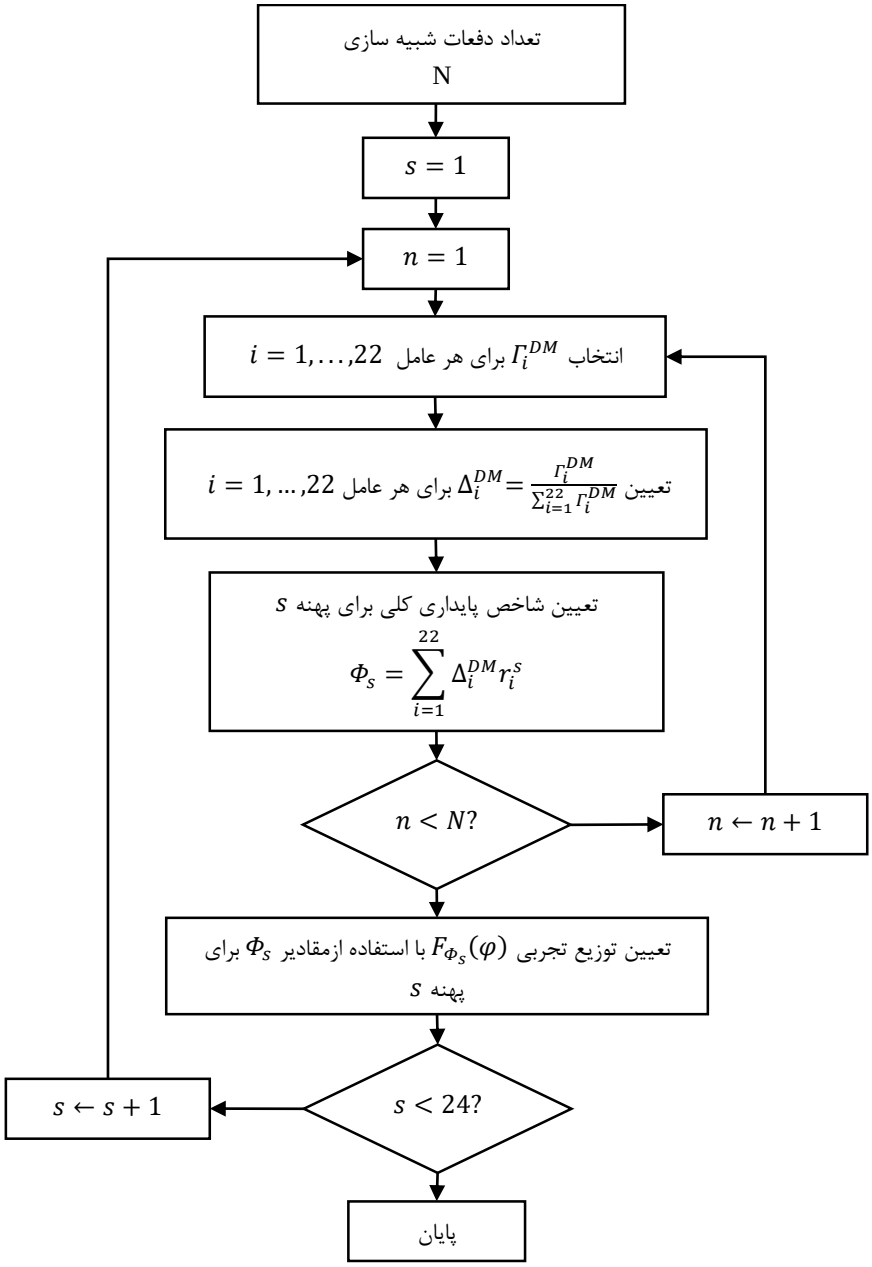
با استفاده از ضریب وزنی نرمال شده در رابطه ۴-۳، و با داشتن مقادیر هر شاخص در هر پهنه، می‌توان شاخص کلی را به صورت زیر تعریف کرد:

$$\Phi_s = \sum_{i=1}^{22} \Delta_i^{DM} r_i^s \qquad (۴-۴$$

که در آن $\Phi_s, s = 1, \dots, 24$ شاخص کلی برای پهنه s بوده، و r_i^s مقدار عامل یا شاخص $P_i, i = 1, \dots, 22$ در پهنه s است. با توجه به Γ_i^{DM} یک متغیر تصادفی است که توزیع $F_{\Gamma_i}^{DM}(\gamma)$ را دنبال می‌کند، Δ_i^{DM} هم یک متغیر تصادفی خواهد بود که از رابطه ۴-۳ به‌دست آمده و توزیع احتمال $\Delta_i^{DM} \sim F_{\Delta_i}^{DM}(\delta)$ را دنبال خواهد کرد. در نهایت، با توجه به رابطه ۴-۴ ، Φ_s یک متغیر تصادفی خواهد

بود که توزیع احتمال $\Phi_s \sim F_{\Phi_s}(\varphi)$ را دنبال می‌کند.

برای حل رابطه ۴-۴، مجدداً از روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده می‌شود. الگوریتم مورد استفاده در نرم‌افزار متلب برای حل رابطه ۴-۴ در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۴: فرآیند شبیه‌ساز مونت کارلو برای تعیین توزیع های احتمال شاخص پایداری کلی هر پهنه

در نهایت همان‌طور که در شکل ۴-۵ و شکل ۴-۶ نشان داده شده است، با استفاده از مقادیر به‌دست آمده برای شاخص پایداری کل هر پهنه، می‌توان نمودار توزیع چگالی و توزیع تجمعی شاخص پایداری کل را برای پهنه مورد نظر ترسیم کرد. به منظور مقایسه بهتر شاخص پایداری کل برای هر پهنه، مقادیر میانگین، میانه، انحراف از معیار و صدک ۵ و ۹۵ درصد در جدول۴- ۷ ارایه شده است.

با توجه به داده‌های جدول۴- ۷ و نمودارهای شکل ۴-۵ و شکل ۴-۶، می‌توان نتیجه گرفت، که پهنه‌های شماره ۱۶ و ۲۰ دارای بالاترین شاخص پایداری هستند که این پهنه‌ها به ترتیب از لایه‌های زمین‌شناسی ET2 و ET5 تشکیل شده‌اند و هر دو پهنه فاقد هرگونه معارض تاثیرگذار بر روی پایداری تونل هستند.

با توجه به داده های جدول۴- ۷ و نمودارهای شکل ۴-۵ و شکل ۴-۶، می‌توان نتیجه گرفت، که پهنه‌های شماره ۱، ۵ و ۱۷ دارای پایین‌ترین شاخص پایداری هستند.

پهنه شماره ۱ از لایه‌های زمین‌شناسی ET1، ET2، ET3، ET4 و ET5 تشکیل شده است و این پهنه محدود به قنات‌های حاج محمدحسن و اقدسیه است.

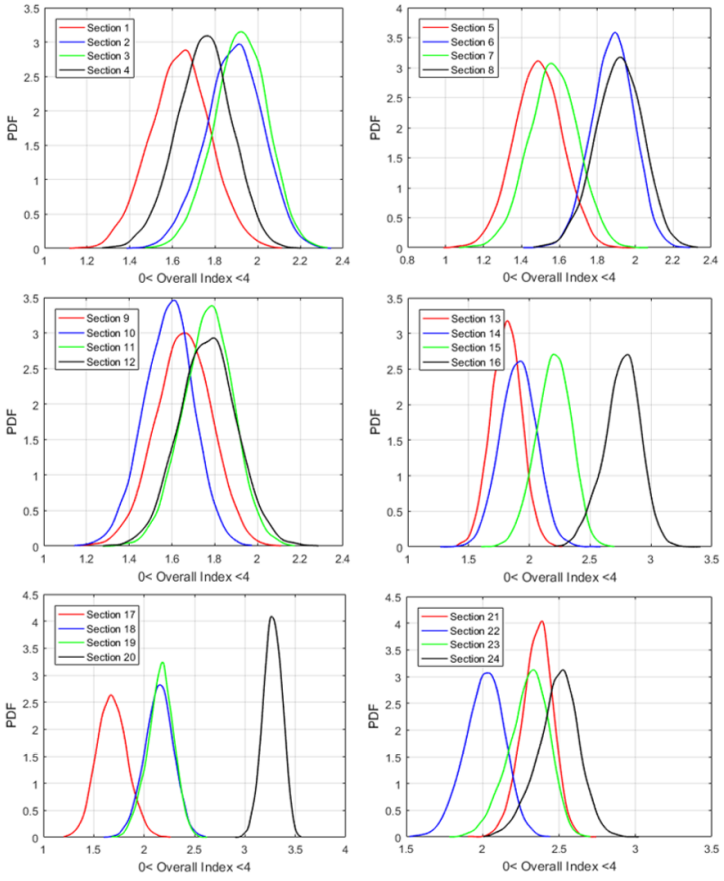
پهنه شماره ۵ از لایه‌های زمین‌شناسی ET2، ET3، ET4 و ET5 تشکیل شده است و این پهنه محدود به قنات مجدالدوله جدید و قدیم و ایستگاه F1 و تونل انتقال آب رباط‌کریم است. همچنین در این پهنه تغییر در ساختار زمین‌شناسی نسبت به مقطع قبلی بیشتر مشاهده می‌شود.

پهنه شماره ۱۷ از لایه‌های زمین‌شناسی ET1، ET2 و ET3 تشکیل شده است و این پهنه محدود به گسل‌های طرشت، داوودیه و پل نصر است. همچنین در این پهنه تغییر در ساختار زمین‌شناسی نسبت به مقطع قبلی مشاهده می‌شود.

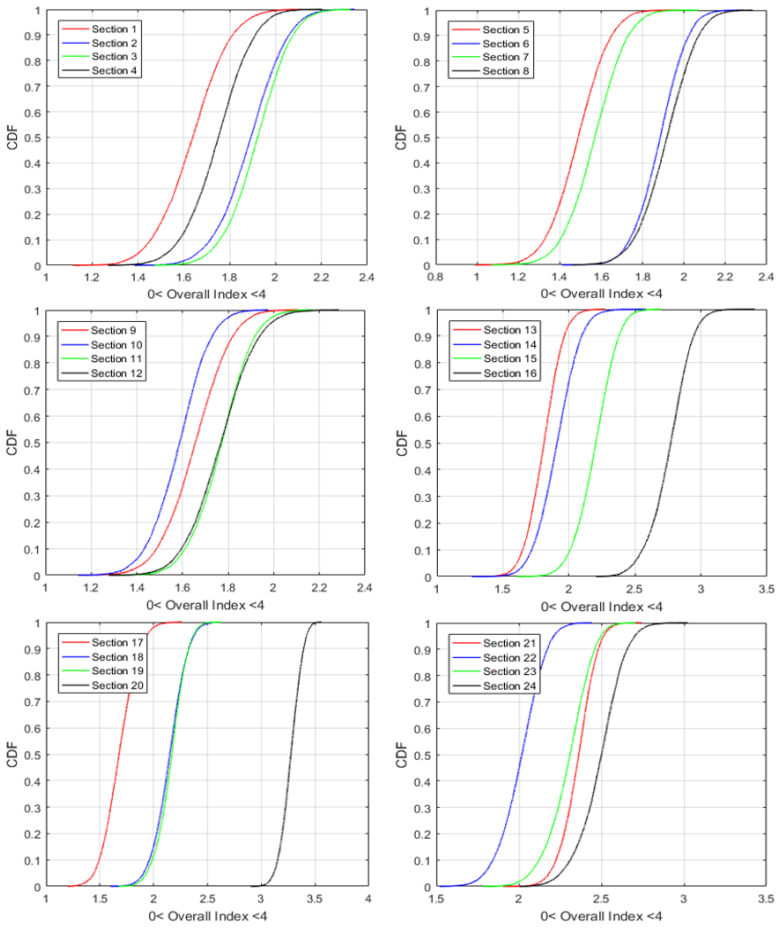
جدول۴- ۷: مشخصات آماری شاخص پایداری کل برای هر پهنه

Statistics of Overall Stability Index (OSI) for each section:

	Mean_OSI	Std_dev_OSI	Perc5th_OSI	Median_OSI	Perc95th_OSI
Section #1	1.6364	0.13911	1.4051	1.6384	1.8664
Section #2	1.8893	0.13302	1.6618	1.8925	2.1033
Section #3	1.9193	0.12408	1.7078	1.9217	2.118
Section #4	1.7475	0.12905	1.53	1.7507	1.9575
Section #5	1.488	0.12647	1.2796	1.4885	1.6964
Section #6	1.8822	0.11037	1.6991	1.8851	2.0583
Section #7	1.5678	0.12857	1.355	1.5688	1.7785
Section #8	1.9148	0.12369	1.7054	1.9175	2.1134
Section #9	1.6542	0.13006	1.437	1.656	1.8638
Section #10	1.5833	0.11604	1.3861	1.5872	1.7697
Section #11	1.7678	0.11954	1.5673	1.7719	1.9597
Section #12	1.767	0.13368	1.5503	1.7679	1.9871
Section #13	1.8095	0.12345	1.6056	1.812	2.0112
Section #14	1.9096	0.14853	1.6647	1.9105	2.1492
Section #15	2.1986	0.14396	1.9513	2.2032	2.4275
Section #16	2.7614	0.15151	2.4925	2.7714	2.9944
Section #17	1.682	0.14984	1.4452	1.6783	1.9393
Section #18	2.1467	0.14209	1.9067	2.1498	2.3794
Section #19	2.1614	0.13056	1.9331	2.168	2.3681
Section #20	3.2737	0.093047	3.1162	3.2753	3.4226
Section #21	2.357	0.10039	2.1827	2.362	2.514
Section #22	2.012	0.12833	1.7908	2.0177	2.2113
Section #23	2.2995	0.13037	2.0668	2.3095	2.4972
Section #24	2.4918	0.13536	2.2516	2.5007	2.7031



شکل ۴-۵: نمودار توزیع چگالی شاخص پایداری کل برای هر پهنه



شکل ۴-۶: نمودار توزیع تجمعی شاخص پایداری کل برای هر پهنه

۴-۲-۳- بررسی درصد کاهش عمر مفید تونل

برای تخمین طول عمر مفید تونل با استفاده از نظرات کارشناسان، می‌توان معیاری تعریف کرد که در واقع درصد کاهش یا افزایش طول عمر مفید تونل را نسبت به یک مورد مبنا نشان دهد. تونل مبنا می‌تواند تونلی باشد که مشخصات پهنه‌های آن در اختیار بوده و طول عمر مفید آن نیز مشخص است. سپس با مقایسه شاخص‌های پایداری در پهنه‌های مختلف تونل مورد بحث با شاخص‌های پایداری پهنه‌های تونل مبنا، درصد کاهش یا افزایش طول عمر مفید تونل را تخمین زد.

در این مطالعه موردی، به لحاظ اینکه اطلاعات تونل مبنا در دسترس نیست، تونل مبنا، تونلی در نظرگرفته شده است، که مقدار شاخص‌های مختلف همگی در سطح مطلوب هستند، یعنی تمامی شاخص‌ها دارای مقدار (امتیاز) ۴ هستند، $r(P_i) = 4, i = 1, \dots, 22$. درنهایت از کارشناسان

خواسته شده است با مقایسه مقادیر شاخص‌های تونل مورد بحث با حالت مطلوب که در تونل مبنا مدنظر گرفته شده است، درصد کاهش طول عمر تونل مورد نظر را به یک توزیع مثلثی بیان کنند.

اگر فرض شود، L طول عمر مفید تونل مورد نظر و L_0 طول عمر مفید تونل مبنا باشد، درصد کاهش طول عمر مفید تونل مورد مطالعه از رابطه ۴-۵ به‌دست می آید:

$$L = L_0\ (\ 1 - E\ ) \qquad (۵-۴$$

که در واقع E متغیر تصادفی است با توزیع احتمال $E \sim F_E(\varepsilon)$.

برای به‌دست آوردن توزیع تجربی احتمال عامل E، از روش میانگین وزنی برای تجمیع نظرات کارشناسان استفاده شده است.

اگر کارشناس $e_j, j = 1, \dots 10$ نظر خود را در رابطه با درصد کاهش طول عمر مفید تونل مورد نظر به صورت عوامل توزیع مثلثی بیان کند، خواهیم داشت:

$$F_E^j(\varepsilon) = Triangular\left[\varepsilon_a^j, \varepsilon_b^j, \varepsilon_c^j\right] \qquad (۶-۴$$

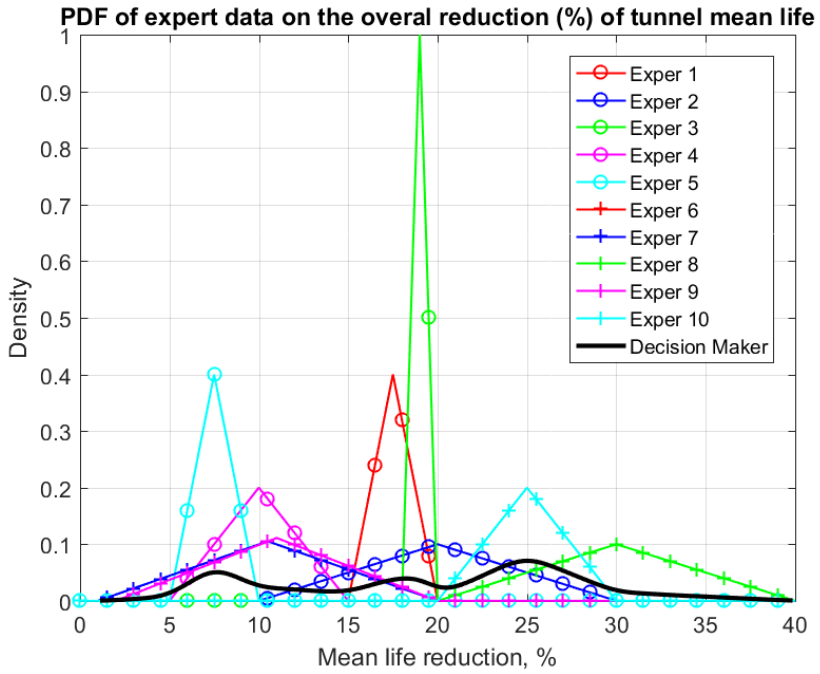
که با توجه به آن، توزیع احتمال درصد کاهش طول عمر مفید تونل برای تصمیم گیرنده، $F_E^{DM}(\varepsilon)$، از رابطه ۴-۷ به‌دست می‌آید:

$$F_E^{DM}(\varepsilon) = \sum_{j=1}^{J} \omega_j F_E^j(\varepsilon) \qquad (۷-۴$$

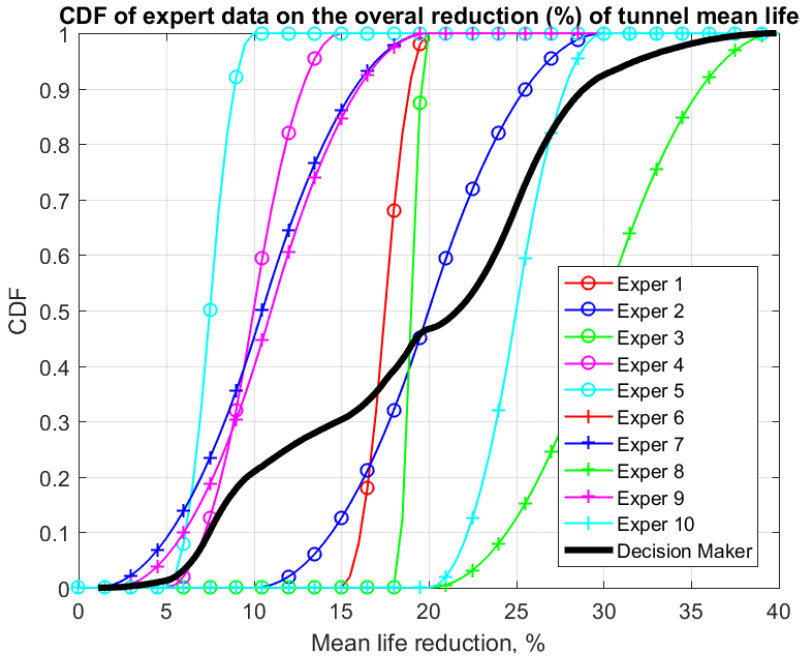
همانند معادلات قبلی برای حل معادله ۴-۷ از روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده می‌شود. که در قسمت‌های قبلی توضیح داده شده است. در شکل ۴-۷ و شکل ۴-۸، به ترتیب نمودار توزیع چگالی و توزیع تجمعی نظر هر کارشناس، علاوه بر نظر تصمیم گیرنده که برآیند نظر کارشناسان در رابطه با درصد کاهش طول عمر مفید تونل است، ارایه شده است.

در جدول۴- ۸، مشخصات آماری برآیند نظر کارشناسان در رابطه با درصد کاهش طول عمر مفید

تونل ارایه شده است. با توجه به نتایج ارایه شده در جدول۴- ۸، تونل مورد مطالعه به طور میانگین با کاهش طول عمر ۱۹/۶۲ درصد با انحراف از معیار ۸/۲۷ درصد مواجه است. صدک ۵ و ۹۵ درصد، کاهش طول عمر مفید به ترتیب برابر با ۶/۵۲ و ۳۱/۵۳ درصد است.



شکل ۴-۷: نمودار توزیع چگالی نظرات کارشناس‌ها و برآیندها در رابطه با درصد کاهش طول عمر مفید تونل مورد نظر



شکل ۴-۸: نمودار توزیع تجمعی نظرات کارشناس‌ها و برآیندها در رابطه با درصد کاهش طول عمر مفید تونل مورد نظر

جدول۴- ۸: مشخصات آماری درصد کاهش طول عمر مفید تونل مورد مطالعه

Statistics of the percentage of reduction in tunnel mean life:

	Value_percent
Mean	19.62
Standard deviation	8.2739
The 5th percentile	6.5163
The 50th percentile	21.643
The 95th percentile	31.825

۴-۳- جمع‌بندی

در این فصل پایداری تونل خط ۷ متروی شهری تهران در زمان بهره‌برداری مورد بررسی قرار گرفت. در این فصل ابتدا به اهمیت هر کدام از عوامل موثر در پایداری تونل در زمان بهره‌برداری پرداخته شد، سپس به بررسی شاخص پایداری کل برای هر پهنه و در انتهای فصل به بررسی درصد کاهش عمر مفید تونل نسبت به تونل مبنا پرداخته شد. در فصل آینده به جمع‌بندی نهایی و نتیجه‌گیری پژوهش حاضر پرداخته می‌شود.

فصل پنجم

نتایج و پیشنهادات

۵-۱- نتایج

تاکنون پژوهش‌های فراوانی در مورد پایداری تونل‌های مترو در زمان اجرا انجام شده است. با این حال کم‌تر به پایداری تونل‌های مترو در زمان بهره‌برداری پرداخته شده است. در زمان بهره‌برداری عوامل زیادی بر روی پایداری تونل تاثیرگذار هستند؛ مانند زلزله، حملات موشکی و تروریستی، بالا و پایین رفتن آب زیرزمینی معارضین سطحی و زیرزمینی و... . در این پژوهش سعی شده است تمامی عوامل تاثیرگذار بر روی پایداری تونل‌های مترو در زمان بهره‌برداری شناسایی و در ادامه شاخصی برای پایداری (SI) تونل‌های مترو در زمان بهره‌برداری ارایه شود. مطالعه موردی در نظر گرفته شده برای این پژوهش تونل خط ۷ متروی تهران است.

نتایج پژوهش حاضر شامل موارد زیر است:

- در این پژوهش ۲۲ عامل موثر بر پایداری تونل مترو درزمان بهره‌برداری مورد ارزیابی قرارگرفته است. وزن این عوامل به صورت کلی محاسبه گردیده و مختص به پژوهش حاضر نیست. بنابراین در موارد مشابه نیز می‌توان از نتایج پژوهش استفاده کرد.
- در بین عوامل موثر بر پایداری تونل‌های مترو عوامل قابلیت تورم و لهیدگی، سطح آب زیرزمینی و زلزله دارای بیش‌ترین تاثیر بر مسأله حاضر هستند و عوامل رودخانه، کیفیت مصالح مورد استفاده و پل‌های همجوار سازه کم‌ترین تاثیر را بر مسأله حاضر دارند.
- با توجه به عواملی که تاثیر بیشتری بر پایداری تونل مترو در زمان بهره‌برداری دارند، می‌توان اقدام به کنترل این عوامل در مکان‌های با ضریب ایمنی پایین‌تر نمود.
- پهنه‌های ۱۶ (کیلومتر ۱۶+۹۰۰ تا ۱۷+۵۰۰) و ۲۰ (کیلومتر ۲۱+۱۳۰ تا ۲۲+۰۰۰) دارای بیشترین شاخص پایداری هستند و می‌توانند به عنوان سازه پدافندی غیرعامل نقش خوبی ایفا کنند و پهنه‌های ۱ (کیلومتر ۷+۵۰۰ تا ۷+۸۶۰) ، ۵ (کیلومتر ۸+۸۰۰ تا ۹+۱۶۰) و ۱۷ (کیلومتر ۱۷+۵۰۰ تا ۱۹+۱۷۰) دارای کم‌ترین شاخص پایداری هستند،

لذا لازم است از مراقبت و نگهداری بیشتری برخوردار باشند و گروه‌های امدادی باید به این پهنه‌ها دسترسی آسان‌تری داشته باشند تا در مواقع لزوم امداد رسانی صورت گیرد.

- با توجه به تحلیل‌های انجام شده تونل مورد مطالعه به طور میانگین با کاهش طول عمر ۱۹/۶۲ درصد نسبت به تونل مبنا مواجه است.

۵-۲- پیشنهادات

- با بررسی دیگر تونل‌های مترو در ایران و سراسر جهان می‌توان به یک طبقه‌بندی در زمینه پایداری تونل‌های مترو در زمان بهره‌برداری رسید. لذا پیشنهاد می‌شود برای اعتبارسنجی روش پیشنهاد شده در این تحقیق حداقل ۲ مورد از پهنه‌ها با روش عددی بررسی شود. بهتر است این اعتبار سنجی برای پهنه‌های با شاخص پایداری بالا و پایین صوررت پذیرد.
- در این پژوهش به دلیل همکاری نکردن برخی از کارشناسان از ۱۰ کارشناس نظرسنجی شده لذا پیشنهاد می‌شود تعداد کارشناسانی که برای استفاده از این روش از آنها نظرسنجی می‌شود افزایش یابند.
- برخی از عواملی که رده‌بندی آنها صرفا بر اساس نظرسنجی انجام شده است مانند عوامل لرزش‌های ناشی از انفجار، سیل و آتش‌سوزی و عامل بازدیدهای دوره‌ایی و تعمیرات اساسی تونل، با روش‌های دیگر رده‌بندی شوند.
- در این پژوهش برای پهنه‌بندی مسیر تونل از اطلاعات زمین‌شناسی، معارضین سطحی و زیرسطحی و مشخصات تونل استفاده شده است، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده مسیر تونل بر اساس تمامی عوامل موثر بر پایداری تونل در زمان بهره‌برداری پهنه‌بندی صورت گیرد.

منابع

منابع انگلیسی

Bedford, T., and Cooke, R. M., 2001, Probabilistic Risk Analysis: Foundations and Methods, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Benson, P. G., and Nichols, M. L., 1982, "An Investigation of Motivational Bias in Subjective Predictive Probability Distributions," Decis. Sci., 13(2), pp. 225–239.

Billinton, R., Allan, R.N., 1992. Reliability Evaluation Of Engineering Systems. New York, pp. 23-13.

Centre for Earthquake and Environmental studies of tehran (CEST) , Jappan International cooperation agency (JICA)., 2000. The study on seismic microzonic of the great tehran area in the Islamic Republic of Iran, Final Report: SSF J R 00-186.

Clemen, R.T. and Winkler, R.L. 1999.Combining Probability Distributions from Experts in Risk Analysis. Risk Anal 19 (2): 187–203.http:/dx.doi.org/10.1023/A:1006917509560.

Conner, P., 2003. Practical Reliability Engineering, pp. 11-13.

Cooke, R. M., 1991, Experts in Uncertainty: Opinion and Subjective Probability in Science, Oxford University Press, New York.

Dhillon, B.S., 2008. Mining Equipment Reliability, Maintainability , and Safety, Springer, pp. 209.

French, S., 1985, "Group Consensus Probability Distributions: A Critical Survey," Bayesian Statistics 2—Proceedings of the Second Valencia International Meeting, J. M. Bernardo, M. H. D. Groot, D. V. Lindley, and A. F. M. Smith, eds., Elsevier, Amsterdam, pp. 183–201.

Lopez Jimeno, C., Lopez Jimeno, E. & Ayala Carcedo, F., 1995. Drilling and Blasting of Rock. ROTERDAM.

Mannan, S., 2012, Lees' Loss Prevention in the Process Industries, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, Chap. 9.

Meyer, M. A., and Booker, J. M., 1991, Eliciting and Analyzing Expert Judgement—A Practical Guide, Academic Press, London, UK.

Modarres, M., Kaminskiy, M., Krirtsov, V., 1999. Reliability engineering and risk

analysis, New York Marcel Dekker, pp. 16-388.

Moon, J.H. and Kang, C.S. 1999. Use of Fuzzy Set Theory in the Aggregation of Expert Judgments. Ann Nucl Energy 26 (6): 461–469. http:// dx.doi.org/10.1016/S0306-4549(98)00073-5.

Mosleh, A., Bier, V. M., and Apostolakis, G., 1987, "Methods for the Elicitation and Use of Expert Opinion in Risk Assessment: Phase 1—A Critical Evaluation and Directions for Future Research," U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, Report No. NUREG/CR-4962.

Ortiz, N.R., Wheeler, T.A., Breeding, R.J. et al. 1991. Use of Expert Judgment in NUREG-1150. Nucl Eng Des 126 (3): 313–331. http://dx.doi. org/10.1016/0029-5493(91)90023-B.

Purba, J.H. 2014. A Fuzzy-Based Reliability Approach to Evaluate Basic Events of Fault Tree Analysis for Nuclear Power Plant Probabilistic Safety Assessment. Ann Nucl Energy 70 (August 2014): 21–29. http:// dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2014.02.022.

Pritchard; Risk Management Concepts and Guidance, ESI, 2001.

Sepasad, 2008. Tehran Metro Line 7 North-South Section, Rport, Tehran.

Tarigh Azali, S., Ghafoori, M., Lashkaripour, G.. & Hassanpour, J., 2013. Engineering geological investigations of mechanized tunneling in soft ground: A case study, East–West lot of line 7, Tehran Metro, Iran. Engineering Geology.

Wideman, Project and Program Risk Management, PMI, 1992.

منابع فارسی

http://zabanzad.mihanblog.com/post/155 سایت خبری تاریخ دسترسی ۱۳۹۳/۱۲/۱۱

حسین‌دخت, حسین؛ سید علی ضیایی؛ هاشم امینی طوسی و سید شهریار حسینی، ۱۳۹۲، ارزیابی و مطالعه خطرها و تهدیدات در تونل‌های درون شهری (با محوریت آتش‌سوزی‌های غیرعمدی)، کنفرانس مهندسی عمران و توسعه پایدار با محوریت کاهش خطرپذیری در بلایای طبیعی.

حیدری شیبانی, رضا؛ شکرالله زارع؛ حسین میرزائی نصیرآباد و محمد فروغی، ۱۳۹۱، بررسی تاثیر فشار جبهه کار بر نشست سطح زمین در تونلسازی مکانیزه در زمین نرم- مطالعه ی موردی: تونل قطعه ی شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران، فصل‌نامه مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی.

خراسانی ع، (۱۳۹۲)، پایان نامه ارشد؛ "برآورد ضریب بهره‌وری TBM در زمین‌های نرم با استفاده از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

رضایی ز، (۱۳۸۹)، پایان نامه ارشد؛ "تحلیل قابلیت اطمینان در شبکه‌های معادن، مطالعه موردی: معدن تخت"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

سپاسد، ۱۳۹۰. خدمات مهندسی یکپارچه سازی مطالعات ژئوتکنیک مسیر تونل خط ۷ مترو (قطعه شمالی-جنوبی)، تهران

سعیدی عباس آباد، م، موسوی، م. نژاد محمد، ف. ۱۳۹۲. ارزیابی سامانه نگهداری تونل خط ۴ متروی تهران در تقاطع غیر هم سطح با تونل توحید و تونل خط ۷ متروی تهران در برابر بارهای دینامیکی ناشی از زلزله .نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی ۲: ۱-۱۱.

عبدالله پور, علی؛ الهام خراسانی، ۱۳۹۲، نقش مدیریت ایمنی در کنترل سیلاب در متروی تهران، پانزدهمین همایش بین‌المللی حمل‌ونقل ریلی.

متصدی زرندی، س، ۱۳۸۷. آلودگی هوا، راهبردهای ملی، قوانین و مقررات. مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران ۲۰-۱۱

مشاور ساحل، ۱۳۸۸. خدمات مهندسی پروژه تونل خط ۷ متروی تهران قطعه شرقی- غربی روش اجرا حفاری مکانیزه ,تهران

مشاور ساحل،۱۳۹۰. مطالعات زمین‌شناسی و ژیوتکنیکی مسیر تونل خط ۷ مترو تهران شمالی-جنوبی، تهران.

مصطفوی مقدم، ع، آشتیانی، م، ۱۳۹۱. خطرهای محتمل بر تونل‌های درون‌شهری .مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران. مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران.

میرزینلی، س، ح و کولیوند، ف، ۱۳۹۰. مدل‌سازی عددی پایداری تونل در توده سنگ ضعیف در برابر انفجارهای سطحی با استفاده از روش عددی اجزا مجزا .تهران ,انجمن تونل ایران ۲۰۶-۱۹۹.

وفاییان، م, ۱۳۷۱. خواص مهندسی خاک. اصفهان : انتشارات اراکان اصفهان.

یزدیان ر، (۱۳۹۳)، پایان نامه ارشد؛ "برآورد پایداری تونل‌های مترو در زمان بهره‌برداری به روش سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

Abstarct

Pollution caused by increasing population and urban traffics in metropolises has become to a national dilemma. Researches show that rail way transport system is the best solution in order to decrease the air pollution in Iran. Hence, constructing urban tunnels is the only way to develop railway system. Considering the costs of tunnel constructing, identifying the risks ahead of tunneling and evaluating the stability and safety related issues are essential in all three steps of design, implementation and operation. As a result, reaching the continuous development in transportation infrastructures could be achieved. Consequently, recognizing, evaluating, managing and controlling the uncertain hazards should be assessed. In this thesis, information of Line No.7 subway tunnel of Tehran has been used for stability analysis of subway tunnels in operational step. To this purpose, firstly, 22 parameters affecting on tunnel stability have been identified. Secondly, Utilizing experts judgment method, Stability index has been introduced. First, the importance of each of the parameters affecting the tunnel stability at the time of operation for the Tehran Metro line 7 tunnel has been identified. The parameters of inflation and ponding, groundwater level and earthquake are the most important parameters, and the parameters of the river, the quality of the materials used And contiguous bridges are the least important parameters in the sustainability of Tehran Metro Line 7 tunnel during operation. The results show that, zone No.16 (km 16+900 to 17+500) and zone No.20 (km 21+130 to 22+000) include higher stability index and could be used as passive defense constructions. On the other hand, zone No. 1 (km 7+500 to 7+860), zone No. 5 (km 8+800 to 9+160) and zone No. 17 (km 17+500 to 19+170) have had low stability index. Also, the ratio of the reduction in useful life of the tunnel compared to the base tunnel (tunnel with all the parameters affecting the stability of the tunnel at the time of operation with a maximum score) is on average 19.62%.

Keywords:

Stability index, Line No.7 Subway (Tehran), passive defense

Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering

Master of Science in Rock Mechanic Engineering

Presentation of tunnel stability index during operation based on statistical methods

Case Study: Tehran Metro Line 7 Tunnel

Mostafa Arabi

Supervisors:

Dr. Seied Mohammad Esmaeil Jalali

January 2018