



Review Article

Investigating the risk factors affecting the safety of tunnel constructions **Samsam Aghaie¹, Sayyed Yaghoub Zolfegharifar^{2*}**

1- Master Student, Department of Civil Engineering, Yasuj Branch, Islamic Azad University, Yasuj, Iran.

2* - Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Yasuj Branch, Islamic Azad University, Yasuj, Iran.

Abstract

The global increase in construction activity has resulted in a significant rise in construction-related accidents. Tunnel construction projects are particularly complex, which increases the risks involved. Numerous studies have been conducted on the subject to reduce the risks and improve safety. These studies have explored safety standards and regulations, methods of safety assessment, and environmental factors that can affect safety. Proper identification and management of these risks are crucial to ensure the safety of labourers and the successful completion of the project. The purpose of this study is to provide a comprehensive review of the risk factors that can affect construction safety in tunnels. A better understanding of tunnel safety can be achieved through the identification and analysis of risk factors, leading to improved workplace safety management strategies in the tunnelling industry.

Keywords: *Construction safety, risk factors, tunnel construction, tunnel construction safety, safety management.*

Received: 07 March 2024; Revised: 17 March 2024; Accepted: 30 March 2024; Published: 30 March 2024

Cite this article as: Aghaie, S., & Zolfegharifar, S. Y. (2024). Investigating the risk factors affecting the safety of tunnel constructions. *Civil and Project*, 6(2), 37-47. doi: 10.22034/cpj.2024.447136.1266

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2024 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



نشریه عمران و پروژه
<http://www.cpjournals.com/>

بررسی فاکتورهای خطر موثر بر ایمنی ساخت تونل‌ها

صمصام آقایی^۱، سید یعقوب ذوالفقاری فر^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۷ اسفند ۱۴۰۲؛ تاریخ بازنگری: ۲۷ اسفند ۱۴۰۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۱ فروردین ۱۴۰۳؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۱۱ فروردین ۱۴۰۳

چکیده

افزایش پروژه‌های عمرانی در سراسر جهان سبب افزایش شدید آمار حوادث عمرانی شده است. پروژه‌های ساخت تونل، تلاش‌های پیچیده و سختی هستند که خطرات و مخاطرات متعددی را به همراه دارند. از این رو مطالعات زیادی در زمینه ایمنی با هدف کاهش حوادث و خطرات ساخت و ساز انجام شده است. در این مطالعات مواردی از قبیل معرفی استانداردهای ایمنی و بررسی آن‌ها، قوانین و مقررات آن‌ها، نحوه ارزیابی ایمنی برای استفاده از آن در پروژه‌های آینده و عوامل محیطی ایمنی بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. درک و مدیریت این خطرات برای تضمین ایمنی کارگران و تکمیل موفقیت آمیز پروژه‌ها بسیار مهم است. هدف این مقاله مروری ارائه یک مرور کلی از عوامل خطر موثر بر ایمنی ساخت تونل است. این دسته بندی خطرات، از جمله عوامل زمین شناسی، ژئوتکنیکی، محیطی، فنی، سازمانی و فردی را بررسی می‌کند. شناسایی و تجزیه و تحلیل عوامل خطر در این بررسی می‌تواند منجر به افزایش درک ایمنی تونل و ترویج استراتژی‌های مدیریت ایمنی کارگاهی در صنعت تونل‌سازی گردد.

کلمات کلیدی:

ایمنی ساخت، فاکتورهای خطر، ساخت تونل، ایمنی ساخت تونل، مدیریت ایمنی

۱. مقدمه

سالانه افراد زیادی در پروژه‌های عمرانی بنا به دلایل مختلف از جمله فعالیت‌های اجرایی گوناگون، ماهیت خطرات و عوامل آسیب‌رسان جان خود را از دست می‌دهند و این آسیب عظیمی به نیروی انسانی فعال در صنعت ساخت و ساز یک کشور است. از این رو آشنایی هرچه بیشتر با ایمنی و مدیریت به یکی از اولویت‌های اصلی سازمان‌های فعال در زمینه پروژه‌های عمرانی و ساخت و ساز تبدیل شده است. تعداد زیاد حادثه‌های ساخت و ساز در دهه‌های گذشته سبب کاهش خطرات و آسیب‌های صنعتی در دیگر پروژه‌های مشابه شده است [۱]. از طرفی در سال‌های اخیر با افزایش تعداد پروژه‌ها در کشورهای در حال توسعه سبب افزایش تعداد مرگ و میرهای ناشی از حوادث ساخت و ساز شده است و به موجب آن، نیاز ضروری به شناسایی و بهبود عملکرد ایمنی پروژه‌های عمرانی شده و اقدامات لازم مدیریت ایمنی در راستای ارتقا ایمنی را ضروری نموده است. از این رو لازم شده که شناسایی با روشی نظام‌مند و مبتنی بر اصول علمی صورت گیرد. رویکردهای مختلفی برای بهبود ایمنی ساخت و ساز توسعه داده شده است. به عنوان مثال، فناوری واقعیت مجازی در آموزش و پرورش مهندسی ساخت و ساز، رویکردهای مبتنی بر فناوری و مدیریت و رویکرد مبتنی بر رفتار، می‌تواند یک راه موثر برای جلوگیری از حوادث عمرانی باشد [۲-۴]. تونل‌سازی یکی از ساخت و سازهای عمرانی پیچیده و پرخطر است که معمولاً در فرآیند ساخت و ساز، با مشکلات زیادی روبرو می‌شود، زیرا محل ساخت و ساز عمدتاً مناطق کوهستانی و صعب‌العبور است و الزامات مربوط به فناوری ساخت و ساز سختگیرانه‌تری دارد [۵]. این مقاله عوامل خطر ساخت تونل در فرآیند ساخت و ساز را مطالعه می‌کند که از اهمیت عملی زیادی برخوردار است. در حال حاضر، مطالعات کمی در مورد رفتار و عوامل نایمن در ساخت وجود دارد و محتوای تحقیقات گذشته معمولاً پیرامون موارد فنی بوده و مطالعات کمتری در رابطه بین فاکتورهای خطر از دیدگاه شناسایی و در نهایت مدیریت آن انجام شده است. بنابراین این پژوهش به دنبال شناسایی هرچه بیشتر فاکتورهای خطر در پروژه‌های تونل‌سازی به جهت رسیدن به عملکرد ایمن و ارتقا سیستم مدیریت ایمنی می‌باشد که با شناسایی دقیق فاکتورهای خطر و مدیریت صحیح این امر تحقق می‌یابد و می‌تواند از ایجاد خسارات جسمی، روانی و مالی و ... در این پروژه‌ها جلوگیری کرده و راندمان کاری پروژه‌ها را افزایش دهد و در نهایت به موفقیت پروژه و سازمان کمک کند.

۲. پیشینه مطالعات

در مقاله‌ها و منابع متعددی موضوع ارزیابی ایمنی در حین ساخت تونل‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در اکثر مطالعات از روش کلاسیک ارزیابی ایمنی استفاده شده است. اثر رخداد اغلب بر خسارات مالی و جانی پروژه بررسی می‌شود. برخی دیگر از پژوهشگران زبان‌های مالی و جانی پروژه را با لحاظ ایمنی بصورت یک تابع احتمالی بیان کرده‌اند [۶]. همچنین برخی دیگر، نگرش کارگران ساخت و ساز نسبت به موضوع ایمنی را یکی از مهم‌ترین فاکتورهای تاثیرگذار بر عملکرد ایمنی کارگران ساخت تونل می‌دانند و آنان بر این باورند که به دلیل نگرش منفی نسبت به ایمنی، تشخیص خطر ضعیف و دست کم گرفتن ریسک ایمنی، احتمال حوادث خطرآفرین در محل کار افزایش می‌یابد [۹-۶].

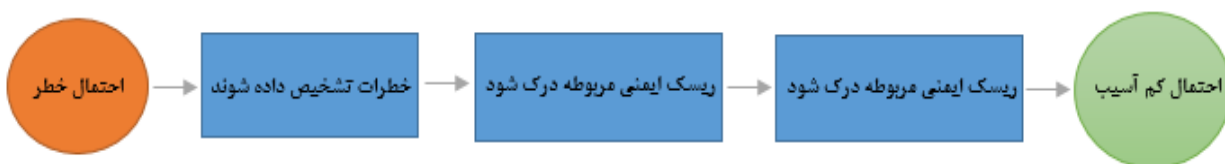
مطالعات چند دهه گذشته، عملیات راهسازی در مناطق کوهستانی و دارای شرایط پیچیده را نیازمند به احداث و ساخت تونل می‌دانند. ایمنی در ساخت تونل به عنوان نگرانی اصلی در احداث تونل می‌باشد. ایمنی در ساخت تونل‌ها تحت تأثیر عوامل حیاتی مختلفی از جمله عوامل ژئوتکنیکی، زیست‌محیطی و انسانی است. این عوامل می‌توانند منجر به حوادث ایمنی شوند. در بخش ژئوتکنیکی، پایداری سنگ‌های اطراف در نزدیکی سطح تونل برای ایمنی سازندگان و خود تونل بسیار مهم است و بر اهمیت آگاهی و کاهش ارتعاشات انفجار در میدان نزدیک تونل تأکید می‌کند [۱۰]. علاوه بر این، شناسایی و ارزیابی خطرهایی مانند خطرات بهداشتی و زیست‌محیطی که بر ایمنی ساخت تونل به کار گرفته شده‌اند، برای موفقیت و کارایی پروژه‌های تونل بسیار مهم است [۱۱]. جدی بودن وضعیت ایمنی تونل‌ها، توسعه روش‌های کنترل خطر را برای نظارت، ارزیابی و جلوگیری از حوادث را ضروری می‌کند. پیشرفت تکنولوژی و پیاده‌سازی برنامه‌های دیجیتال مبتنی بر مدل‌سازی اطلاعات سازه، سبب پیشرفت در مدیریت ریسک ایمنی برای ساخت تونل‌های کوهستانی شده است و راه‌های جدیدی را برای تضمین

ایمنی و کنترل ریسک در چنین پروژه‌هایی ارائه می‌دهد [۱۲]. همچنین ساخت تونل کوهستانی با چالش‌های متنوع و جدیدی مواجه است و نیاز به مدل‌های تحلیلی برای ارزیابی ریسک‌های فروپاشی و ارزیابی روانگرایی در لایه‌های خاک اشباع شده از آب را می‌طلبد و به نیاز به تجزیه و تحلیل ریسک و اقدامات ایمنی جامع تأکید می‌کند [۱۳]. مطالعات زیادی نیز نشان داده شده است که اجرای سیستم‌های نظارت خودکار در ساخت و ساز مهندسی زیرزمینی باعث بهبود عملکرد ایمنی و جلوگیری از حوادث خطرناک در محل می‌شود [۱۴].

اخیرا در عملیات راهسازی در کشورهای پیشرفته، استفاده از فناوری و نرم‌افزار پیشرفته مانند فناوری‌های GPS و هشدار دهنده‌های ایمنی جهت جلوگیری از حوادث کارگران و بهبود ایمنی در سایت‌های ساختمانی استفاده می‌گردد. بنابراین، ایمنی در ساخت تونل به دلیل شرایط پیچیده زمین‌شناسی، عوامل حیاتی موثر بر ایمنی و نیاز به ارزیابی ریسک و اقدامات کنترلی، از اهمیت بالایی برخوردار است. بررسی مطالعات شناسایی ریسک در پروژه‌های ساخت تونل برای به حداقل رساندن خطرات نامطلوب و اطمینان از ایمنی، اجرای فناوری پیشرفته، سیستم‌های نظارت و روش‌های کنترل ریسک برای جلوگیری از حوادث، تضمین و موفقیت پروژه‌های ساخت تونل ضروری است.

۳. مبانی اولیه

ایمنی عبارت است از میزان درجه‌ی دور بودن از خطر که با واژه (Hazard) در تعریف علمی ایمنی آمده است. که در واقع می‌توان آن را شرایطی تعریف کرد که دارای دارای پتانسیل آسیب رسیدن به کارکنان تجهیزات و کارگران، از بین بردن مصالح و کاهش بازدهی در اجرای یک وظیفه از پیش تعیین شده می‌باشد. هنگامی که Hazard وجود دارد، امکان وقوع اثرات منفی یاد شده در پروژه وجود خواهد داشت [15]. به عنوان پیشنهاد تعاریف دیگر می‌توان ایمنی را محیطی ایمن و یا یک اقلیم بدون خطر در نظر گرفت. تحت هیچ شرایطی منطقه‌ای مطلقاً ایمن وجود ندارد، زیرا همیشه احتمال خطر توسط اشتباهات انسانی یا رخداد‌های طبیعی وجود دارد، هرچند که ممکن است این اشتباهات و احتمالات کوچک و ناچیز باشد. اما این ما را متقاعد نمی‌کند که اهداف و اعمال روزمره ایمنی خود را انجام ندهیم، هدف باید این باشد که با انجام صحیح مدیریت ایمنی در کارگاه و پروژه، کارکنان تجهیزات و ماشین‌آلات، کار خود را در سلامت کامل انجام دهند و کار خود را ترک نکنند [۱۶]. همانطور که در شکل (۱) آمده است، عملکرد ایمن به میزان زیادی به توانایی تشخیص خطر و درک ریسک ایمنی بستگی دارد، و هنگامی که خطرات تشخیص داده نشوند، کارگران قادر به کنترل خطرات با انجام اقدامات اصلاحی و اتخاذ تصمیمات ایمن و کارآمد نیستند [۱۵].



شکل ۱. مدل مفهومی برای مدیریت ایمنی در پروژه عمرانی [۱۵].

۴. فاکتورهای خطر موثر بر ایمنی ساخت تونل‌ها

فاکتورهای خطر موثر بر ایمنی ساخت تونل‌ها به عنوان عواملی که می‌توانند خطرات و تهدیداتی را در طول فرآیند ساخت ایجاد کنند، در نظر گرفته شوند که در جدول (۱) اصلی‌ترین این عوامل ذکر شده است و در ادامه هر یک از آن‌ها به تفکیک توضیح داده شده است.

جدول ۱: مهم‌ترین عوامل موثر بر ایمنی ساخت تونل‌ها

ردیف	فاکتورهای خطر موثر بر ایمنی ساخت تونل‌ها
۱	عوامل ماشین آلات و ابزار ساخت
۲	عوامل انسانی
۳	عوامل مدیریتی و سازمانی
۴	عوامل فنی
۵	عوامل زمین‌شناسی (ژئوتکنیکی)
۶	عوامل شرایط طبیعی

۴-۱. عوامل ماشین‌آلات و ابزار ساخت

اخیراً ایمنی در حین استفاده از ماشین آلات در ساخت تونل‌ها بطور ویژه‌ای مورد توجه اجراکاران، ناظرین و کارفرماها قرار گرفته است. که بطور مستقیم بر روی نتایج کلی پروژه و موفقیت آن می‌تواند تأثیر گذار باشد. تجزیه و تحلیل خطر در حین ساخت تونل یک جنبه حیاتی است که مستقیماً به تأثیر ماشین آلات بر ایمنی مربوط می‌شود. مطالعات روش‌هایی را برای ارزیابی خطرات مرتبط با ساخت تونل ارائه کرده‌اند و بر نقش ماشین‌آلات در کاهش یا تشدید این خطرات تأکید می‌کنند [۱۷]. یکی از پر کاربردترین ماشین‌آلات در ساخت تونل، ماشین‌های حفاری تونل (TBM) است که در اکثر مطالعات از پیش‌بینی عملکرد این ماشین‌های حفاری در پروژه‌های تونل‌سازی به عنوان یک نقطه کانونی یاد شده است. در میان مدل‌های مورد استفاده برای پیش‌بینی عملکرد ماشین‌های حفاری تونل سنگ سخت، دو مدل برجسته هستند که اغلب در صنعت استفاده می‌شوند. آنها شامل مدل نیمه نظری، توسط دانشکده معادن کلرادو و مدل تجربی، توسط دانشگاه علم و فناوری نروژ در تروندهایم می‌باشند. در حالی که هر کدام نقاط قوت و حوزه کاربرد خود را دارند، دیگر محققان با اصلاح یکی از مدل‌های موجود یا معرفی یک مدل جدید به دنبال پیش‌بینی دقیق‌تر بوده‌اند. برای دستیابی به این هدف، می‌توان پایگاه داده‌ای از عملکرد واقعی ماشین TBM در پروژه‌های تونل‌زنی گردآوری و تجزیه و تحلیل کرد تا یک مدل جدید پیش‌بینی عملکرد TBM توسعه یابد. بنابراین افزایش تعداد این تحقیقات، مدل‌های جدیدی را برای پیش‌بینی عملکرد TBM ارائه می‌دهند و در نتیجه آن، سبب افزایش ایمنی و کارایی در ساخت تونل را می‌گردند [۱۸].

همچنین محققان مطالعاتی را بر روی تأثیر زمان نصب ماشین آلات بر ایمنی خاک و سنگ اطراف تونل انجام داده‌اند که در مطالعات آنان به تعامل بین عملیات ماشین آلات و ملاحظات ژئوتکنیکی در تضمین ایمنی در حین ساخت تونل تأکید شده است. ارزیابی ایمنی سازه‌های تونل‌ها بر اساس داده‌های پایش دینامیکی در طول ساخت‌وساز تونل نیز یک حوزه مهم مطالعه بوده است که بر نقش تکنولوژی و ماشین‌آلات پیشرفته در تضمین یکپارچگی و ایمنی سازه در طول فرآیند ساخت و ساز تأکید دارد. از این مطالعات می‌توان دریافت که تأثیر ماشین آلات بر ایمنی پروژه ساخت تونل یک موضوع چند وجهی و بین رشته‌ای است که شامل تجزیه و تحلیل ریسک، پیش‌بینی عملکرد، تشخیص ایمنی، ارزیابی ایمنی سازه، و پیامدهای آن بر سازه‌های اطراف و محیط می‌باشد. ترکیب این مطالعات درک جامعی از رابطه پیچیده بین عملیات ماشین آلات و پارامترهای ایمنی در ساخت تونل ارائه می‌دهد و بر نیاز به فناوری پیشرفته، ارزیابی ریسک و برنامه ریزی دقیق برای اطمینان از ایمنی و کارایی پروژه‌های ساخت تونل تأکید می‌کند [۱۹].

۴-۲. عوامل انسانی

پژوهشگران بر این باورند که پیش شرط های عملکرد باید از عملکرد متفاوت باشد [۲۰]. یکی از این پیش شرطها انگیزه ایمنی است که به عنوان تمایل نیروی انسانی برای تلاش در جهت ایمنی تعریف شده است. محققان برآوردهایی از جو ایمنی، انگیزه و رفتار ایمنی را در دو زمان سنجیدند و آنها را به سطوح قبل و بعد از حوادث در طی یک دوره ۵ ساله تقسیم کردند. انگیزه ایمنی فردی، به نوبه خود با تغییرات بعدی در رفتار ایمنی فرد گزارش شده بود. بهبود میانگین سطح رفتار ایمنی در گروه ها با کاهش تلفات در حوادث در سطح گروهی همراه بود و دریافتند که نتایج به درک عوامل موثر بر ایمنی محیط کار و سطوح و عواملی که این اثرات را تحت تاثیر قرار می دهند، کمک می کند [۲۱ و ۲۲].

عوامل استرسزا مانع^۱ تاثیرات منفی بر نگرش های مربوط به کار (مانند رضایت شغلی) دارد که به نوبه خود به عنوان پیشداوری ها برای رفتار ایمنی شناخته شده است [۲۳]. علاوه بر این، عوامل استرسزا مانع، به احتمال زیاد انگیزه را برای رعایت قوانین ایمنی و شرکت در فعالیتهای مرتبط با ایمنی کاهش می دهند. فرض شده است که عوامل استرسزا منجر به کاهش سطح رعایت ایمنی و مشارکت ایمنی می شود. در نتیجه، عوامل تنش زدگی مربوط به استرسزاهای مانع، باعث آسیب رسیدن به عملکرد می شوند، زیرا آنها به عنوان محدودیت ها عمل می کنند که باعث افزایش احتمال نابودی و آسیب دیدگی می شود. به عنوان مثال، فقدان وضوح نقش، ممکن است به کارکنان تحمیل کند که آنها به طور مناسب آموزش ندیده یا واجد شرایط نیستند، و احتمال آسیب افزایش می یابد [۲۴].

در کنار عوامل استرسزا مانع که باعث آسیب به عملکرد می شوند، عوامل استرسزا چالشی هستند که شامل استرس های شغلی، مانند فشار زمان یا حجم کاری بالا، هنگامی که افراد را در موقعیت مناسب برای گسترش منابع شخصی قرار می دهند، چالش برانگیز می شوند [۲۵]. به عنوان مثال، مدیریت زمان های کم و یا درخواست های پیچیده کار، افراد را قادر می سازد مهارت ها، دانش و راهبردهای مقابله با آنها را توسعه دهند که بر انگیزه، رضایت شغلی، تعامل، خلاقیت و رفتار پیشگیرانه آنان تاثیر گذاشته و احتمالاً سبب انگیزه برای رعایت قوانین ایمنی و تلاش بیشتر برای شرکت در فعالیتهای ایمنی می شود. اما برخی مطالعات نشان داده اند که استرس های چالشی، به ویژه فشار زمان و حجم کاری، می تواند منجر به افزایش آسیب های کاری شود.

۳-۴. عوامل مدیریتی و سازمانی

امروزه اهمیت ایمنی و مدیریت آن در دستیابی به کارآیی سازمان به طور فزاینده ایی مورد توجه قرار گرفته است. در راستای پیشگیری از بروز حوادث محل کار و خسارات جانی و مالی ناشی از آنها، مقررات ایمنی روز به روز سختگیرانه تر شده و ایمنی و فرهنگ سازی آن به شرط اولیه محیط کار تبدیل شده است. به طور کلی، هدف از استقرار و پیاده سازی سیستم مدیریت ایمنی، حصول اطمینان از این است که سازمان به ویژه سازمان پروژه محور صنعت ساخت چگونگی تأثیر فعالیتهای خود در زمینه بهداشت و ایمنی را بشناسد و اندازه گیری ها و چارچوب هایی به منظور کنترل و بهبود آن تدوین کند [۲۶].

محور مدیریت ایمنی ساخت تونل، کنترل رفتار ناامن افراد و وضعیت ناامن امور، اجرای تصمیمات و اهداف در جهت پیشرفت پروژه، از بین بردن همه حوادث، جلوگیری از آسیب های تصادفی و کاهش تلفات تصادفی است. تکنولوژی ساخت تونل و تجهیزات مکانیکی بطور مستمر با گذشت زمان در حال ارتقاء هستند. در عین حال، انجام یک کار در سطح مناسب، با بکارگیری فن آوری های نوین و بروز از طریق یادگیری و آموزش ضروری است. با توجه به اهمیت آموزش در فرهنگ سازی HSE، لازم است ابتدا آموزش هایی در سطوح مدیران پروژه، سرپرستان کارگاه و مسئولین HSE پروژه ها ارائه شود. پس از آموزش نفرات کلیدی و تحقق اهداف سازمان در خصوص ایجاد فرهنگ در سطوح ارشد مدیریتی، آموزش کلیه کارکنان نیز می تواند در پروژه ها انجام گیرد. با انتشار جزوه های آموزشی در قالب دستورالعمل ها، چک لیست ها، فیلم و کلیپ های آموزشی، جایگاه HSE مستحکم شده و در نهایت با بازرسی صحیح ناظرین، این سیستم را می توان مدیریت نمود [۲۷]. محققان در زمینه حوادث ساخت بر این باورند که بیشتر حوادث به دلیل کارگران بی احتیاط و مشکلات مدیریتی ایجاد می شود [۲۸].

^۱ Barrier stressors

بنابراین پیشگیری از حوادث در ساخت تونل نیاز به یک سیستم مدیریت ایمنی دارد. هنگامی که کارکنان درک کنند که مدیریت به ایمنی آن‌ها اهمیت می‌دهد، عملکرد ایمنی آن‌ها بالاتر خواهد بود [۲۹]. پس می‌توان در نظر داشت که مدیران و ناظران خط مقدم شخصیت‌های حیاتی در پیشگیری از حوادث هستند [۳۰].

یکی از اهداف اصلی هر پروژه ساخت تونل، تمرکز بر روی مسائل بهداشتی و ایمنی است تا محیط امن در محل ساخت و ساز را تضمین کند. در چنین محیطی پیچیده، منابع خطر زیادی وجود دارد. حوادث ساخت تونل‌ها خرابی‌های مکانیکی و آسیب به تجهیزات را به همراه دارند [۳۱]. مدیریت، بهترین راه برای کاهش حوادث ساخت تونل است. هنگامی که مدیریت ایمنی حذف شود، ممکن است منجر به حوادث در پروژه‌های ساخت تونل گردد [۳۲]. بنابراین مدیریت ایمنی می‌تواند یک فعالیت برای پروژه‌های ساخت تونل باشد که به طور مستقیم بر ایمنی و ترتیب ساخت تونل تأثیر می‌گذارد.

۴-۴. عوامل فنی

پروژه‌های ساخت تونل، اغلب با مقیاس بزرگ، زمان تحویل طولانی و خطرات بالا مشخص می‌شوند که نیاز به تکنولوژی ساخت و ساز و طراحی فنی متناسب با شرایط منطقه دارد. در حال حاضر، در بخش ساخت تونل، نظارت بر ساخت و ساز به یک تکنولوژی پشتیبانی فوری تبدیل شده است. با پیشرفت مداوم فناوری اطلاعات و اتوماسیون ساخت و ساز، روش‌ها و فن‌آوری‌های جدید مختلفی به تدریج در فرآیند ساخت و ساز اعمال شده است که به پیشرفت پروژه کمک می‌کند که هر کدام خطرات مربوط به خود را دارد. ولی از طرفی، دشواری مدیریت فنی را افزایش می‌دهد. تجهیزات زیادی در ساخت تونل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد که در بخش حفاری بیشتر از تجهیزات مکانیکی اتوماتیک استفاده می‌شود. انتخاب روش‌های طراحی و ساخت تونل مربوط به شرایط زمین‌شناسی و محیطی مربوط به آن است. بنابراین بسیار مهم است که اطلاعات زمین‌شناسی در فرآیند ساخت بدست آید و به طور منطقی با آن برخورد گردد. با بهبود مستمر اتوماسیون جمع‌آوری اطلاعات مختلف، انتقال داده‌های بی‌سیم، هشدار زودهنگام ایمنی و روش‌های فنی مربوطه سیستم مدیریت، اساساً می‌توان تشخیص پارامترهای محیطی مربوطه از جمله گازهای مضر آسیب‌پذیر و ردیابی و موقعیت پرسنل ساخت تونل را تحقق بخشید. علاوه بر این، در صورت حوادث ایمنی در هنگام ساخت تونل، با بکارگیری روش‌های فنی و تجهیزات اتوماتیک، هشدارهای ایمنی مربوطه و اطلاعات یادآورنده مربوطه را با توجه به داده‌های نظارت، ارتباطات بی‌سیم و تجهیزات پشتیبانی زیرزمینی می‌توان دریافت نمود؛ بطوری که وظیفه کارکنان مدیریت ساخت تونل را برای شروع هشدار زود هنگام و برنامه اضطراری مربوطه که نقش راهنمای خوبی در تخلیه و نجات پرسنل ساخت دارد را تسهیل کند و ایمنی ساخت تونل و ایمنی اموال واحدها و افراد را تضمین نماید [۳۳]. پس بطور کلی در طول کل فرآیند ساخت تونل، ساختار زمین‌شناسی و محیط اطراف باید از لحاظ فنی مورد مطالعه قرار گیرد. حوادث ساخت تونل‌ها گاهی به اشتباهات طراحی و ساخت مربوط می‌شود. بنابراین، طراحی دقیق و بهینه‌سازی به موقع طرح‌ها بر اساس گزارش‌های اکتشاف و نظارت زمین‌شناسی برای اطمینان از کیفیت و ایمنی ساخت و ساز ضروری است. علاوه بر این، مدیریت فنی پرسنل، آموزش منظم، آموزش و جلسات فنی می‌تواند به طور موثر سطح فنی پرسنل را بهبود بخشد [۳۴].

۴-۵. عوامل زمین‌شناسی (ژئوتکنیکی)

تونل‌های کوهستانی یک روش بی‌نظیر در زیرساخت‌های پایدار، جهت تغییر مسافت‌ها و کاهش هزینه‌های حمل و نقل، حمایت و هدایت رشد زیست محیطی می‌باشند. اثرات نامطلوب می‌تواند برای پروژه‌های بزرگ فاجعه‌بار باشد. یکی از منابع مرتبط با خطرات و آثار نامطلوب، ناشی از دانش ناکافی از شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیک قبل از ساخت و ساز است. چندین جنبه زمین‌شناسی می‌تواند قبل از ساخت واقعی، تا حدی یا به طور کامل ناشناخته باقی بماند. عدم قطعیت‌هایی که بر مدل

زمین شناسی تأثیر می‌گذارند معمولاً متناسب با مقدار، ماهیت و کیفیت تحقیقات زمین‌شناسی و ژئوتکنیک است. بر اساس تجزیه و تحلیل ۸۹ پروژه زیرزمینی در سراسر جهان مشاهده شده است که در بیش از ۸۵٪ از موارد، سطح ناکافی تحقیقات منجر اتلاف زمان و هزینه‌های بیش از حد شده است. نشریه USNCTT توصیه‌هایی را در مورد حداقل الزامات برای هر پروژه به ویژه برای در نظرگیری هزینه تحقیق در سطوح مختلف آن دارد. متأسفانه در طول سال‌های گذشته (به دلیل رکود اقتصادی؟) در اکثر کشورهای دنیا، به نظر می‌رسد بودجه اختصاص داده شده به تحقیقات زمین‌شناسی در پروژه‌های تونل به صورت واقعی کاهش یافته است و تحقیقات امروز اغلب بر اساس "حداقل هزینه و حداکثر سرعت" است. بنابراین بسیاری از پروژه‌ها از تأثیر (خطر) انواع مختلف مشکلات با هزینه‌های زیاد، تاخیر در طراحی و ساخت و مشکلات عملیاتی رنج می‌برند [۳۵]. تحقیقات زمین شناسی، شرایط زمین شناسی مختلف مانند سنگ‌ها، مواد معدنی و آب‌های زیرزمینی را در منطقه ساخت تونل بررسی و مطالعه می‌کند. روش‌های طراحی و ساخت تونل بر اساس نتایج بررسی زمین شناسی است. اکتشاف زمین شناسی برای ساخت تونل به تکنولوژی، هزینه و شرایط طبیعی محدود می‌شود و مشکلاتی مانند عدم جزئیات و اکتشاف با دقت کم وجود دارد [۳۶]. نتایج بررسی زمین شناسی به طور قابل توجهی بر پیوندهای طراحی و ساخت و ساز تونل تأثیر می‌گذارد و به شدت از پروژه ساخت و ساز حمایت می‌کند [۳۷]. اپراتورهای انجام دهنده تحقیقات بخصوص نقشه بردارها عامل حیاتی در تعیین کیفیت زمین شناسی مهندسی زیرزمینی هستند. در تحقیقات مهندسی تونل، تعداد زیادی از کارگران غیر حرفه‌ای و پرسنل‌های غیر متخصص دخالت دارند. با این حال، کیفیت کار این محققان بسیار جدی است و اطمینان از کیفیت تحقیقات دشوار است [۳۸]. مناطق با شرایط طبیعی خاص، روش‌های تشخیص ویژه و تکنیک‌های ساخت و ساز جدیدی را می‌طلبد. به ویژه هنگامی که تونل باید از زمین‌های لغزشی، جریان آب، خاک نرم و سایر مناطق زمین شناسی ضعیف یا سایر مناطق خاص زمین عبور کند. باید اقدامات فنی و مهندسی لازم برای مقابله با آن‌ها انجام شود [۳۵].

۴-۶. شرایط طبیعی

محیط طبیعی پیچیده، ذاتاً دارای شرایط غیرقابل پیش بینی و تنوع زیاد است. بنابراین ساخت تونل بعنوان یک محیط پیچیده نیز در معرض عوامل خطر متعددی است که می‌تواند منجر به حوادث شود [۳۹]. شرایط طبیعی تحت تأثیر آب و هوا و سایر عوامل قابل تغییر هستند و می‌توانند بر عملیات ساخت و ساز تونل تأثیر قابل توجهی داشته باشند؛ مانند افزایش دما در تابستان در مناطق کوهستانی که با ذوب شدن یخ‌های دائمی همراه است یا بارندگی که باعث افزایش ناگهانی محتوای آب سنگ‌ها و خاک‌های اطراف می‌گردد، می‌توانند سبب لغزش گل و روانگرایی زمین گردند. این تغییر در ثبات سنگ اطراف ناشی از آب و هوا و منطقه جغرافیایی، معمولاً منبع اصلی خطر ایمنی در ساخت تونل است [40]. احتمال حوادث در شرایط آب و هوایی نامناسب برای اپراتورهای دستگاه‌های ساخت و حفر تونل بالا است. یکی از عوامل بسیار مهم که روند عملیات اجرایی تونل را دچار مشکل می‌کند، وجود گازهای خطرناک زیرزمینی است که با انجام عملیات حفر تونل این گازها می‌توانند باعث خفگی پرسنل عملیات اجرایی و تکنسین‌های فنی در حال انجام کار گردد. گاهی این گازهای منتشر شده قابلیت اشتعال و انفجار دارند که بی‌توجهی به آن‌ها نیز می‌تواند باعث رخداد فاجعه در پروژه گردد [41]. پس بطور کلی شرایط طبیعی و محیطی نامناسب می‌تواند بر حوادث ساخت تونل و مدیریت فنی تأثیر منفی داشته باشد.

۵. نتیجه‌گیری

ساخت تونل یک تلاش چالش برانگیز و پرخطر است که به درک جامعی از عوامل خطر مختلف مؤثر بر ایمنی نیاز دارد. در این مقاله بررسی کاملی از عوامل زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی، زیست‌محیطی، فنی، سازمانی و انسانی که بر ایمنی ساخت تونل تأثیر می‌گذارند، ارائه شده است و با مقایسه بین این عوامل به ترتیب نزولی، شرایط طبیعی، شرایط زمین‌شناسی، عوامل انسانی،

عوامل مدیریتی و سازمانی، عوامل فنی و عوامل ماشین‌آلات و ابزار ساخت بیشترین سهم را در حوادث ساخت تونل به خود اختصاص داده‌اند. تصادفات ساخت تونل به راحتی تحت تاثیر شرایط طبیعی و زمین‌شناسی و همچنین عوامل انسانی قرار می‌گیرند، بنابراین باید توجه ویژه‌ای به قطع ارتباط بین آنها داشته باشیم. پیچیدگی زمین‌شناسی را می‌توان به طور موثر از نقشه برداری زمین‌شناسی تشخیص داد. پس روشن است که با توجه به آخرین تحولات در روش‌های نقشه برداری (اصول اساسی و تکنیک‌های جدید موجود)، ارزش مرحله بررسی جغرافیایی منطقی باید به تدریج بیشتر و بیشتر افزایش یابد. می‌توان بررسی زمین‌شناسی را تنها پایه‌ای دانست که بر اساس آن می‌توان تفسیر نتایج حاصل از کل گروه تحقیق را انجام داد. پس بطور کلی، خطرات موجود در محیط طبیعی از طریق بررسی و طراحی قابل‌شناسایی هستند که لازم است یک سیستم آموزشی علمی و عملی بلند مدت برای بهبود آگاهی ایمنی و مهارت‌های حرفه‌ای متخصصان ساخت تونل ایجاد شود تا با شناخت و تجزیه و تحلیل این عوامل خطر، مدیران، سازمان‌ها و ذینفعان می‌توانند استراتژی‌های مدیریتی لازم را برای کاهش خطرات احتمالی و اطمینان از تکمیل موفقیت آمیز و ایمن پروژه‌های تونل ایجاد کنند. از این رو تحقیقات مستمر، همکاری و به اشتراک‌گذاری دانش برای پیشبرد ایمنی تونل و به حداقل رساندن وقوع حوادث در آینده امری ضروری است که باید هر چه بیشتر مورد توجه مدیران و مسئولین قرار گیرد.

منابع

- [1] Labour Department. Occupational Safety and Health Statistics Bulletin. Available online: <http://www.labour.gov.hk/eng/osh/pdf/Bulletin2016.pdf> (accessed on 25 January 2019).
- [2] Liu, P.; Li, Q.; Bian, J.; Song, L.; Xiahou, X. Using interpretative structural modeling to identify critical success factors for safety management in subway construction: A china study. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2018**, *15*, 1359.
- [3] Wu, X.; Li, Y.; Yao, Y.; Luo, X.; He, X.; Yin, W. Development of construction workers job stress scale to study and the relationship between job stress and safety behavior: An empirical study in Beijing. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2018**, *15*, 2409.
- [4] Li, H.; Lu, M.; Hsu, S.C.; Gray, M.; Huang, T. Proactive behavior-based safety management for construction safety improvement. *Saf. Sci.* **2015**, *75*, 107–117.
- [5] Ou, L., Chen, Y., Zhang, J. and Ma, C., 2022. Dematel-ISM-based study of the impact of safety factors on urban rail tunnel construction projects. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022.
- [6] Langford, D., Rowlinson, S., & Sawacha, E. (2000). Safety behaviour and safety management: its influence on the attitudes of workers in the UK construction industry. *Engineering, Construction and Architectural Management*, *7*(2), 133-140.
- [7] Namian, M., Albert, A., Zuluaga, C. M., & Behm, M. (2016). Role of safety training: Impact on hazard recognition and safety risk perception. *Journal of construction engineering and management*, *142*(12), 04016073.
- [8] Kath, L. M., Marks, K. M., & Ranney, J. (2010). Safety climate dimensions, leader–member exchange, and organizational support as predictors of upward safety communication in a sample of rail industry workers. *Safety Science*, *48*(5), 643-650.
- [9] Flin, R., Mearns, K., O'Connor, P., & Bryden, R. (2000). Measuring safety climate: identifying the common features. *Safety science*, *34*(1-3), 177-192.
- [10] Wang, M., Ding, W., Zhao, D., Liu, D., Wang, L., Zhang, T. and Ling, T., 2022. Blasting Vibration Law and Prediction in the Near-Field of Tunnel. *Shock and Vibration*, 2022.

- [11] Liang, X., Qi, T., Jin, Z., Qin, S. and Chen, P., 2020. Risk assessment system based on fuzzy composite evaluation and a backpropagation neural network for a shield tunnel crossing under a river. *Advances in Civil Engineering*, 2020, pp.1-14.
- [12] Liu, N., Guo, D., Song, Z., Zhong, S. and Hu, R., 2023. BIM-based digital platform and risk management system for mountain tunnel construction. *Scientific Reports*, 13(1), p.7585.
- [13] Zhang, G.H., Jiao, Y.Y., Chen, L.B., Wang, H. and Li, S.C., 2015. Analytical model for assessing collapse risk during mountain tunnel construction. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(2), pp.326-342.
- [14] Sihombing, O.D.M., Purba, H.H. and Purba, A., 2021. Risk identification in tunnel construction project: A literature review. *Facta Universitatis, Series: Architecture and Civil Engineering*, pp.261-286.
- [15] Sepehri, M. (3113). *Organizational Processes Reengineering*, Tehran, Tadbir Scientific-Educational Monthly. (Persian)
- [16] Fang, D.P., Xie, F., Huang, X.Y., L3, it., (3007). Factor analysis-based studies on construction workplace safety management in china. In *ternational journal of project management* 33, pp.71-78.
- [17] Sousa, R.L. and Einstein, H.H., 2012. Risk analysis during tunnel construction using Bayesian Networks: Porto Metro case study. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 27(1), pp.86-100.
- [18] Hassanpour, J., Rostami, J. and Zhao, J., 2011. A new hard rock TBM performance prediction model for project planning. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(5), pp.595-603.
- [19] Wei, M., Song, Y., Wang, X. and Peng, J., 2021. Safety diagnosis of TBM for tunnel excavation and its effect on engineering. *Neural Computing and Applications*, 33, pp.997-1005.
- [20] Griffin, M.A., & Neal, A. (2000). Perceptions of safety at work: A framework for linking safety climate to safety performance, knowledge, and motivation. *Journal of Occupational Health Psychology*, 5, 347-358. doi: 10-1037//1076-8998.5.3.347
- [21] Neal, A., & Griffin, M.A. (2006). A study of the lagged relationships among safety climate, safety motivation, safety behavior, and accidents at the individual and group levels. *Journal of Applied Psychology*, 91, 946-953. doi: 10.1037/00219010.91.4.946
- [22] Frankie .G , "Thinking About Work at Home: Implications for Safety at Work", Ph.D dissertation, Portland State University, 2015.
- [23] Probst, T. M., & Brubaker, T. L. (2001). The effects of job insecurity on employee safety outcomes: Cross-sectional and longitudinal explorations. *Journal of Occupational Health Psychology*, 6, 139–159. doi: 10.1037/1076-8998.6.2.139.
- [24] Hemingway, M. A., & Smith, C. S. (1999). Organizational climate and occupational stressors as predictors of withdrawal behaviors and injuries in nurses. *Journal of Occupational and Organizational Psychology*, 72, 285–299. doi:10.1348/096317999166680.
- [25] Lazarus, R. S., & Folkman, S. (1984). *Stress, appraisal, and coping*. New York, NY: Springer.
- [26] Ismail, Z.; Doostdar, S.; Harun, Z. 2012. Factors influencing the implementation of a safety management system for construction sites. *Safety Science*. 50 (3): 418-423

- [27] Sanindigo R, Zheo.P.,(3033)Political skill for developing construction safety climate. *Journal of Engineering and management*.
- [28] K.A. Brown, P.G. Willis, G.E. Prussia, Predicting safe employee behavior in the steel industry: development and test of a sociotechnical model, *J. Oper. Manag.* 18 (4) (2000) 445–465.
- [29] D. Langford, S. Rowlinson, E. Sawacha, *Safety Behaviour and Safety Management: its Influence on the Attitudes of Workers in the UK Construction Industry*, Engineering, Construction and Architectural Management, 2000.
- [30] R.A. Haslam, S.A. Hide, A.G. Gibb, D.E. Gyi, T. Pavitt, S. Atkinson, A.R. Duff, Contributing factors in construction accidents, *Appl. Ergon.* 36 (4) (2005) 401–415.
- [31] A. Kumar Mishra, P. Aithal, Job safety analysis during tunnel construction, *Int. J. Appl. Eng. Manag. Lett. (IJAEML)* 5 (1) (2021) 80–96.
- [32] S. Mohamed, Safety climate in construction site environments, *J. Construct. Eng. Manag.* 128 (5) (2002) 375–384.
- [33] Cao, J., Zhao, R., Hu, L., Liang, Q. and Tang, Z., 2022. Application of Internet of things based on wireless sensor in tunnel construction monitoring. *Journal of Sensors*, 2022.
- [34] A. Riella, M. Vendramini, A. Eusebio, L. Soldo, The design geological and geotechnical model (DGGM) for long and deep tunnels, in: *Engineering Geology for Society and Territory* 6, 2015, pp. 991–994.
- [35] L. Soldo, M. Vendramini, A. Eusebio, Tunnels design and geological studies, *Tunn. Undergr. Space Technol.* 84 (2019) 82–98.
- [36] J.-s. Wang, L. Wang, Y. Li, Y.-x. Zhang, Z.-g. Cao, C.-l. Li, Tectonic evolution and the analysis of unfavorable geology in a tunnel, *J. Coal Sci. Eng.* 15 (4) (2009) 374–381.
- [37] V. Komolvilas, W. Tanapalungkorn, P. Latcharote, S. Likitlersuang, Failure analysis on a heavy rainfall-induced landslide in Huay Khab mountain in Northern Thailand, *J. Mt. Sci.* 18 (10) (2021) 2580–2596.
- [38] Z. Xu, W. Wang, P. Lin, L. Nie, J. Wu, Z. Li, Hard-rock TBM jamming subject to adverse geological conditions: influencing factor, hazard mode and a case study of Gaoligongshan Tunnel, *Tunn. Undergr. Space Technol.* 108 (2021), 103683.
- [39] L. Ding, L. Zhang, X. Wu, M.J. Skibniewski, Y. Qunzhou, Safety management in tunnel construction: case study of Wuhan metro construction in China, *Saf. Sci.* 62 (2014) 8–15.
- [40] A. Aalianvari, H. Katibeh, M. Sharifzadeh, Application of fuzzy Delphi AHP method for the estimation and classification of Ghomrud tunnel from groundwater flow hazard, *Arabian J. Geosci.* 5 (2) (2012) 275–284.
- [41] Yang, Y., Wang, Y., Easa, S.M. and Yan, X., 2023. Risk factors influencing tunnel construction safety: Structural equation model approach. *Heliyon*, 9(1).