Military Science and Tactics
https://www.qjmst.ir/

The impact of climate change consequences on the design, construction and maintenance of defense tunnels

Hasan Rezaei[1]✉

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received
23 December 2024
Received in revised form
2 March 2025
Accepted
25 October 2025
Published online
17 December 2025

Keywords:
Climate change, defense tunnels, design, construction, maintenance.

Abstract

Background and Objective: Global climate change represents one of the most pressing challenges of the 21st century, with profound implications for engineering infrastructure, particularly defensive tunnels.

Methodology: This research adopts a mixed-methods approach. In the qualitative phase, thematic analysis was employed to extract key concepts related to the impacts of climate change on defensive tunnels from documents published between 2010 and 2024. The statistical population of the study includes experts, university professors, and engineers associated with the defense sector within the armed forces, with purposive sampling utilized in the quantitative phase. For data analysis, structural equation modeling (SEM) was conducted using the Smart PLS software.

Findings: The findings reveal that 13 climatic factors significantly influence the design, construction, and maintenance of defensive tunnels. The coefficients of determination for the impact of climate change components on the design, construction, and maintenance of defensive tunnels are 0. 792, 0. 756, and 0. 759, respectively. This indicates that 79%, 75%, and 75% of the variations in the design, construction, and maintenance of defensive tunnels are explained by climate change components.

Conclusion: The study concludes that climate change poses significant risks to the stability of defensive tunnels. To mitigate these risks, it is essential to incorporate climate-resilient design principles, such as using more durable materials, enhancing drainage systems, and conducting thorough environmental assessments. Future tunnel design and maintenance strategies must consider these climate factors to ensure the long-term integrity of defensive infrastructure.

Cite this article: Rezaei, Hassan (1404). The impact of climate change consequences on the design, construction and maintenance of defense tunnels. Quarterly Journal of Military Sciences and Technologies, 21 (73), 133-155.

DOI: http//doi. org/ 10. 22034/qjmst. 2025. 2048797. 2141

Publisher: AJA University of Command and Staff, https: //www. qjmst. ir

© "Authors retain the copyright and full publishing rights. "

DOI: 10. 22034/qjmst. 2025. 2048797. 2141

1. Assistant Professor of Climatology, Department of Geography, Imam Ali Military University, Iran. E-mail: rezaei_h@iamu. ac. ir

Military Science and Tactics
https://www.qjmst.ir/

تاثیر پیامدهای تغییر اقلیم بر طراحی و ساخت و نگهداری تونل‌های دفاعی

حسن رضائی[1] ✉

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۳/۱۰/۰۳

تاریخ بازنگری:
۱۴۰۳/۱۲/۱۸

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴/۰۸/۰۳

تاریخ انتشار:
۱۴۰۴/۰۹/۲۶

کلیدواژه‌ها:
تغییر اقلیم، تونل‌های دفاعی، طراحی، ساخت، نگهداری..

چکیده

زمینه و هدف: تغییرات جهانی آب‌وهوایی یکی از چالش‌های بسیار جدی قرن بیست‌ویکم محسوب می‌شود که پیامدهای عمیقی بر زیرساخت‌های مهندسی، به‌ویژه تونل‌های دفاعی، دارد.

روش کار: پژوهش دارای رویکرد ترکیبی است. دربخش کیفی، از روش تحلیل مضمون برای استخراج مفاهیم کلیدی مرتبط با تأثیرات تغییر اقلیم بر تونل‌های دفاعی از اسناد منتشر شده بین سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۲۴ استفاده شد. جامعه آماری این پژوهش شامل متخصصان، استادان دانشگاه‌ها، مهندسان مرتبط با حوزه دفاعی در نیروهای مسلح انتخاب شد و روش نمونه گیری دربخش کمی هدفمند می‌باشد. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از معادلات ساختاری با نرم افزار Smart PLS استفاده شده است.

یافته‌ها: یافته‌ها نشان می‌دهند که ۱۳ عامل تغییر اقلیم بر طراحی، ساخت و نگهداری تونل‌های دفاعی تاثیرگذار می‌باشد. ضریب تعیین مولفه‌های تاثیرگذار تغییراقلیم بر طراحی، ساخت و نگهداری تونل دفاعی به ترتیب برابر با ۰/۷۹۲، ۰/۷۵۶ و ۰/۷۵۹ می‌باشد که بیانگر این است که ۷۹، ۷۵ و ۷۵درصد تغییرات در طراحی، ساخت و نگهداری تونل دفاعی توسط مولفه‌های تغییر اقلیم تبیین می‌شود

نتیجه‌گیری: برای مقابله با این تهدیدات، ضروری است که طراحی تونل‌ها با اصول مقاوم در برابر تغییر اقلیم مانند استفاده از مواد بادوام‌تر و تقویت سیستم‌های زهکشی انجام شود.

استناد: رضائی، حسن (۱۴۰۴). تاثیر پیامدهای تغییر اقلیم بر طراحی و ساخت و نگهداری تونل‌های دفاعی. *علوم و فنون نظامی*، ۲۱(۷۳)، ۱۳۳ -۱۵۵. DOI: http//doi. org/10. 22034/qjmst. 2025. 2048797. 2141

ناشر: دانشگاه فرماندهی و ستاد ارتش جمهوری اسلامی ایران، https: //www. qjmst. ir

© «حق نشر (کپی رایت) و کلیه حقوق انتشار برای نویسندگان محفوظ است.»

DOI: 10. 22034/qjmst. 2025. 2048797. 2141

۱. نویسنده مسئول، استادیار اقلیم‌شناسی گروه جغرافیا، دانشکده علوم پایه، دانشگاه افسری امام علی (ع)، تهران، ایران. رایانامه: rezaei _h@iamu. ac. ir

Military Science and Tactics
https://www.qjmst.ir/

Factors Influencing Climate Change on the Design, Construction, and Maintenance of Defensive Tunnels

Extended Abstract

Background and Objective:
The increasing impacts of global climate change have raised significant concerns regarding the stability and functionality of infrastructure (IPCC, 2021), particularly underground structures such as defensive tunnels (Peng et al, 2019, Zhao et al, 2023). These tunnels, which are critical for national security and emergency response, are increasingly exposed to climatic stressors including fluctuating temperatures, freeze-thaw cycles, heavy rainfall, and thawing of permafrost (Andersland & Ladanyi, 2003). Defensive tunnels are typically built to withstand external threats, but the rapid rate of climate change has introduced new (Collings, 2024), unpredictable challenges that threaten their structural integrity (Jiang & Tan, 2022). The goal of this paper is to assess how global climate change, particularly in the context of temperature variations, freeze-thaw cycles, heavy rainfall, and permafrost thawing, affects the durability and maintenance of defensive tunnels. As the environmental conditions around these tunnels evolve, understanding these impacts and integrating them into the design, construction, and maintenance of these tunnels is paramount. This research examines the existing body of literature from 2010 to 2024, identifying the key factors that affect the stability of defensive tunnels under climate change conditions. Furthermore, this paper proposes strategies to mitigate these challenges and ensure the resilience of defensive tunnel infrastructure.

Methodology:
This research adopts a mixed-methods approach. In the qualitative phase, thematic analysis was employed to extract key concepts related to the impacts of climate change on defensive tunnels from documents published between 2010 and 2024. The statistical population of the study includes experts, university professors, and engineers associated with the defense sector within the armed forces, with purposive sampling utilized in the quantitative phase. For data analysis, structural equation modeling (SEM) was conducted using the Smart PLS software.

Findings:
variations in the maintenance of defensive tunnels are explained by climate change components. Overall, in this research, the coefficient of determination for most components was above 0. 7, suggesting that independent variables strongly explain the dependent variable.

The path coefficient indicates the presence of a linear causal relationship and the strength and direction of this relationship between two latent variables. Essentially, it is the standardized regression coefficient. As observed in the model, the path coefficients are close to 1, indicating a strong linear causal relationship between the variables. The T-values were used to assess the structural model fit, with coefficients required to be above 1. 96 to confirm their significance at a 95% confidence level. As observed, all components of climate change affecting the design, construction, and maintenance of defensive tunnels were above 1. 96. Therefore, with 95% confidence, it can be concluded that all identified indicators in this model are effective in the design, construction, and maintenance of defensive tunnels.

Conclusion:
The objective of this study is to investigate the factors influencing climate change on the

design, construction, and maintenance of defensive tunnels based on a structural equation modeling approach. Initially, a qualitative content analysis was conducted, resulting in the identification of 13 subcategories through thematic analysis. A comparison with other studies indicates that most research emphasizes the direct impact of climatic factors on tunnel stability, and the findings of this study are consistent and corroborated by similar research. The comparison of this study's results with other research on the impact of climate on tunnels reveals that many of these findings align with similar results reported in other studies. For instance, a study by Hosseini and Khodayari (2020) examined the effects of freeze-thaw cycles on the strength and lithological parameters of rocks in Iran. This study demonstrated that freeze-thaw cycles reduce the compressive strength of rocks and increase their brittleness. The results indicated that for the construction of tunnels and other structures in cold regions, the impact of freeze-thaw cycles must be considered in engineering designs, which aligns with the findings of this study.

Based on the results of this study and its comparison with other research, several recommendations are proposed to improve the design and maintenance of defensive tunnels in the face of climate change:

1. Updating Design Standards: Given the significant impact of climate change on tunnel design, it is recommended that the design standards for defensive tunnels be updated to fully incorporate climatic factors such as temperature increases, changes in precipitation patterns, and droughts.
2. Use of Climate-Resistant Materials: During the construction phase, the use of materials that are more resistant to temperature fluctuations, humidity, and soil pressure can enhance the durability and stability of tunnels.
3. Preventive Maintenance Planning: Considering the impact of climate change on tunnel maintenance, it is suggested that preventive maintenance programs be implemented regularly, taking into account current and future climatic conditions.
4. Continuous Climate Monitoring: Establishing continuous climate monitoring systems around tunnels can help quickly identify changes and take necessary actions to mitigate adverse effects.
5. Further Research: Conducting additional research on the impact of climate change on defensive tunnels, particularly in regions with specific climatic conditions (such as cold and coastal areas), can lead to a better understanding and more effective solutions.
6. International Collaboration: Exchanging information and experiences with countries and international organizations working on the impact of climate change on infrastructure can help improve methods and standards for the design, construction, and maintenance of defensive tunnels.

Keywords: *Climate change, defense tunnels, design, construction, maintenance.*

مقدمه

افزایش جمعیت کره زمین که باعث تغییرکاربری زمین، تخریب جنگل‌ها، افزایش فعالیت‌های کشاورزی و دامداری و تولید ضایعات جامد و مایع شده، تبعات مختلفی به همراه داشته است که پدیده تغییراقلیم یکی از آنهاست (رضایان رقیه‌باشی و همکاران، ۱۳۲: ۱۳۹۶). تغییر اقلیم جهانی به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های قرن حاضر، تأثیرات گسترده‌ای بر زیرساخت‌های مهندسی دارد. افزایش دما، تغییر در الگوهای بارش، افزایش فراوانی رخدادهای شدید جوی، و ذوب یخ‌های دائمی در مناطق سردسیر از جمله پیامدهای اصلی این تغییرات هستند (IPCC, 2021). تونل‌های دفاعی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های زیرزمینی در کاربردهای نظامی و امنیتی، در برابر این تغییرات آسیب‌پذیر هستند. طراحی، ساخت، و نگهداری این تونل‌ها باید به گونه‌ای باشد که در برابر تغییرات پیش‌بینی‌نشده اقلیمی، دوام و پایداری خود را حفظ کنند (Pal et al. , 2023: 682).

یکی از مهم‌ترین اثرات تغییر اقلیم، افزایش چرخه‌های یخبندان-ذوب است که می‌تواند منجر به ترک‌خوردگی پوشش تونل، کاهش مقاومت سازه‌ای، و نشت آب در مناطق سردسیر شود (Peng et al, 2019). همچنین، افزایش بارش‌ها و شدت سیلاب‌ها می‌تواند به اشباع خاک اطراف تونل‌ها، افزایش فشار آب حفره‌ای، و کاهش پایداری سازه‌ای منجر شود (Zhao et al. , 2023:3). تغییرات دمایی شدید نیز تنش‌های حرارتی قابل‌توجهی ایجاد می‌کند که می‌تواند منجر به کاهش طول عمر مواد سازه‌ای مانند بتن و فولاد شود (Pimentel et al, 2012: 59).

این مسائل به‌ویژه در مناطقی که تونل‌های دفاعی تحت شرایط اقلیمی خاصی طراحی شده‌اند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند. به‌عنوان مثال، در مناطق پرمافراست[۱]، ذوب یخ‌های دائمی به دلیل افزایش دمای زمین می‌تواند منجر به ناپایداری سازه‌ها و نشست زمین شود (Andersland & Ladanyi, 2004). در اقلیم‌های گرم و خشک نیز افزایش دما و کاهش رطوبت خاک می‌تواند به ترک‌های ساختاری و کاهش عملکرد عایق‌های حرارتی منجر شود (Pal et al. , 2023: 683).

---

[۱] . مناطق پرمافراست به نواحی گفته می‌شود که در آنها لایه‌ای از خاک به‌طور دائمی یخزده باقی می‌ماند. این لایه‌ها معمولاً در نواحی قطبی و نیمه‌قطبی یافت می‌شوند و به‌طور کلی، اگر خاک یک منطقه برای دو سال یا بیشتر در حالت یخ‌بسته باقی بماند، به آن خاک منجمد یا پرمافراست گفته می‌شود.

اگرچه تحقیقات مختلفی در زمینهٔ اثرات تغییر اقلیم بر زیرساخت‌های حمل‌ونقل انجام شده است، مطالعات جامع در زمینهٔ تونل‌های دفاعی که دارای حساسیت‌های امنیتی و استراتژیک هستند، بسیار محدود است. این کمبود اطلاعات علمی می‌تواند منجر به طراحی ناکارآمد و افزایش هزینه‌های نگهداری در بلندمدت شود. همچنین، ارزیابی دقیق اثرات اقلیمی و توسعه راهکارهای مناسب برای کاهش آسیب‌پذیری این سازه‌ها از نظر اقتصادی و امنیتی حیاتی است (Zhong et al. , 2020: 190).

طراحان و برنامه ریزان مسائل استراتژیک که توجه خود را به ماه یا سال بعد و یا آینده نامعلوم معطوف می‌دارند استفاده کنندگان اصلی اقلیم شناسایی می‌باشند واقلیم‌شناسی برای نیروهای مسلح که خود را برای انجام مأموریت درسرزمین ناشناخته آماده می‌کنند، اهمیت دارد (محمدی و قاضی، ۱۴۰۱: ۱۶۲). با توجه به اهمیت موضوع، این مقاله به بررسی عوامل تأثیرگذار تغییر اقلیم بر طراحی، ساخت، و نگهداری تونل‌های دفاعی می‌پردازد. نتایج این تحقیق می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای طراحی نسل جدید تونل‌های دفاعی مقاوم در برابر تغییر اقلیم و بهبود سیاست‌های نگهداری این سازه‌ها در سطوح ملی و بین‌المللی به کار گرفته شود. به همین دلیل، پرداختن به این مسئله نه‌تنها از نظر علمی، بلکه از منظر راهبردی و اقتصادی نیز اهمیت دارد.

مبانی نظری و پیشینه‌های پژوهش

مبانی نظری

تغییر اقلیم به‌عنوان یکی از پدیده‌های پیچیده جهانی، تأثیرات عمده‌ای بر محیط‌زیست و زیرساخت‌های انسانی گذاشته است. این تغییرات که عمدتاً ناشی از فعالیت‌های انسانی مانند افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای هستند، شامل افزایش دمای میانگین جهانی، تغییر در الگوهای بارش، و افزایش فراوانی رخدادهای شدید اقلیمی مانند سیلاب‌ها و طوفان‌ها می‌شوند (IPCC, 2021). این پدیده‌ها چالش‌های زیادی را برای طراحی، ساخت، و نگهداری زیرساخت‌های مهندسی از جمله تونل‌های دفاعی به وجود آورده‌اند.

تونل‌های دفاعی به دلیل ماهیت زیرزمینی و استراتژیک خود، در برابر تغییر اقلیم آسیب‌پذیر هستند. عوامل کلیدی تأثیرگذار بر این سازه‌ها شامل چرخه‌های یخبندان-ذوب، تغییرات ناگهانی دما، و افزایش میزان و شدت بارش‌ها می‌باشد. این عوامل می‌توانند به ترک‌خوردگی سازه‌ای، کاهش مقاومت مصالح، و افزایش هزینه‌های نگهداری منجر شوند (Peng et al, 2019: 4). مبانی نظری مرتبط با این موضوع شامل

اصول مکانیک خاک و سنگ، پایداری سازه‌ای، و تحلیل‌های ترمودینامیکی در محیط‌های زیرزمینی است.

به‌ویژه در مناطق سردسیر، چرخه‌های یخبندان-ذوب به دلیل انبساط و انقباض مکرر آب در ترک‌ها، می‌توانند به فرسایش و کاهش عمر مفید تونل‌ها منجر شوند (Zhang et al. , 2004: 297, Peng et al, 2020). در مناطق گرم و خشک نیز افزایش دما می‌تواند موجب ترک‌های حرارتی و تخریب مصالح پوششی شود (Zhao et al. , 2023: 3) . علاوه بر این، تغییر اقلیم منجر به تغییر رفتار هیدرولوژیکی زمین می‌شوند که می‌تواند باعث افزایش فشار آب حفره‌ای و کاهش پایداری دیواره‌های تونل گردد.

پیشینه‌های پژوهش

پیشینه تحقیقات نشان می‌دهد که تأثیرات تغییر اقلیم بر پایداری و طراحی تونل‌های دفاعی همچنان در حال بررسی است و پژوهش‌های انجام‌شده پس از ۲۰۱۰ به‌ویژه در ارتباط با اثرات چرخه‌های یخبندان-ذوب، تغییرات دمایی و بارش‌های شدید در مناطقی با شرایط آب و هوایی مختلف گسترش یافته‌اند. در این‌بخش به مهم‌ترین پژوهش‌ها در زمینه تغییر اقلیم و تأثیر آن بر تونل‌ها پرداخته شده است.

جدول (۱) پیشینه تحقیقات انجام شده

نویسندگان	هدف	کشور	افق زمانی	روش‌شناسی	خلاصه نتایج
اندیرسلند و لاندری[1] (۲۰۰۳)	بررسی مهندسی زمین‌های یخزده	جهانی	2003	مروری و تحلیلی	ارائه اصول و روش‌های مهندسی برای کار در زمین‌های یخزده و تأثیر تغییرات دما بر رفتار خاک.
کولینگز[2] (۲۰۲۴)	بررسی تأثیرات تغییرات اقلیمی بر پل‌ها و تونل‌ها	بریتانیا	2024	مطالعه موردی و تحلیل داده‌ها	تغییرات اقلیمی باعث افزایش فشار بر پل‌ها و تونل‌ها شده و نیاز به طراحی مقاوم‌تر را نشان می‌دهد.
چانگ و همکاران[3] (۲۰۲۲)	بررسی میدان دمایی تونل‌های	چین	2022	پایش و تحلیل	تأثیر ترافیک بر میدان دمایی تونل و نیاز به

[1] Andersland, & Ladanyi
[2] Collings
[3] Chang et al.

نویسندگان	هدف	کشور	افق زمانی	روش‌شناسی	خلاصه نتایج
	جاده‌ای در مناطق سردسیر			داده‌های دمایی	سیستم‌های تهویه بهتر.
چو[1] (۲۰۲۴)	طراحی بهینه تونل‌های زهکشی برای مقابله با سیلاب‌های شهری	کره جنوبی	2024	مدل‌سازی و بهینه‌سازی	ارائه طرح‌های بهینه برای تونل‌های زهکشی به منظور کاهش سیلاب‌های شهری.
دیو و دو[2] (۲۰۲۱)	بررسی تأثیر دما بر تونل‌های دایره‌ای	فرانسه	2021	مدل‌سازی عددی	افزایش دما باعث تغییر در تنش‌های تونل و نیاز به طراحی مقاوم‌تر می‌شود.
جیانگ و تان[3] (۲۰۲۲)	بررسی خرابی‌های زیرساخت‌های شهری در شرایط زمین‌شناسی پیچیده	چین	2022	تحلیل داده‌های تاریخی	بارش‌های شدید باعث افزایش خرابی‌های زیرساخت‌های شهری شده است.
حسینی و خدایاری[4] (۲۰۱۹)	تأثیر چرخه‌های یخزدگی و ذوب بر مقاومت سنگ	ایران	2019	آزمایش‌های آزمایشگاهی	چرخه‌های یخزدگی و ذوب باعث کاهش مقاومت سنگ می‌شوند.
کانوسکی و همکاران[5] (۲۰۲۲)	بررسی کرایواستراتیگرافی تونل‌های پرمافراست	آلاسکا	2022	بررسی میدانی و تحلیل نمونه‌ها	تغییرات دما باعث تغییر در ساختار پرمافراست و نیاز به پایش مستمر دارد.
لیو و همکاران[6] (۲۰۲۲)	ارزیابی ایمنی ساخت تونل‌های مترو در شرایط بارش شدید	چین	2022	مدل‌سازی و تحلیل ریسک	بارش‌های شدید باعث افزایش خطر در ساخت تونل‌های مترو می‌شود.
لیو و همکاران (۲۰۲۰)	شبیه‌سازی تأثیر دما بر رفتار	چین	2020	شبیه‌سازی عددی	تغییرات دما باعث تغییر در تنش‌های

[1] Cho
[2] Du & Do
[3] Jiang & Tan
[4] Hosseini & Khodayari
[5] Kanevskiy et al
[6] Liu et al.

نویسندگان	هدف	کشور	افق زمانی	روش‌شناسی	خلاصه نتایج
	مکانیکی تونل‌های راه‌آهن				تونل و نیاز به طراحی مقاوم‌تر می‌شود.
کاکونوکی و همکاران[1] (۲۰۲۱)	بررسی آسیب‌های ژئوتکنیکی ناشی از بارش‌های شدید	ژاپن	2021	بررسی میدانی و تحلیل داده‌ها	بارش‌های شدید باعث افزایش آسیب‌های ژئوتکنیکی به زیرساخت‌ها می‌شود.
پال و همکاران[2] (۲۰۲۳)	بررسی خطرات تغییرات اقلیمی بر زیرساخت‌های ساحلی	هند	2023	مروری و تحلیلی	تغییرات اقلیمی باعث افزایش خطر برای زیرساخت‌های ساحلی می‌شود.
پنگ و همکاران[3] (۲۰۱۹)	تأثیر چرخه‌های یخزدگی و ذوب بر خاک‌های شور	چین	2019	آزمایش‌های آزمایشگاهی	چرخه‌های یخزدگی و ذوب باعث تغییر در خواص مکانیکی خاک‌های شور می‌شوند.
پنگ و همکاران (۲۰۲۰)	بررسی چرخه‌های یخزدگی و ذوب در تونل‌های مناطق سردسیر	چین	2020	آزمایش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی	چرخه‌های یخزدگی و ذوب باعث کاهش پایداری تونل‌ها می‌شوند.
پیمینتیل و همکاران[4] (۲۰۱۲)	تفسیر عددی توزیع دما در کاربردهای انجماد زمین در تونل‌سازی شهری	یونان	2012	مدل‌سازی عددی	انجماد زمین باعث تغییر در توزیع دما و نیاز به پایش دقیق دارد.
ساییمزاک و همکاران[5] (۲۰۲۲)	بررسی تأثیر بارش‌های شدید بر زیرساخت‌های راه‌آهن	آلمان	2022	مطالعه موردی و تحلیل داده‌ها	بارش‌های شدید باعث افزایش آسیب‌های زیرساخت‌های راه‌آهن می‌شود.
سان و همکاران[6] (۲۰۲۴)	بررسی تغییرات هیدروترمال و	چین	2024	مدل‌سازی و تحلیل داده‌ها	چرخه‌های یخزدگی و ذوب باعث تغییر در

[1] Mukunoki et al
[2] Pal et al
[3] Peng et al
[4] Pimentel et al
[5] Szymczak et al.
[6] Sun et al.

نویسندگان	هدف	کشور	افق زمانی	روش‌شناسی	خلاصه نتایج
	خواص مکانیکی تونل‌ها در مناطق سردسیر				خواص مکانیکی تونل‌ها می‌شوند.
وانگ و همکاران[1] (۲۰۱۹)	تحلیل تنش‌های حرارتی بتن در طول ساخت تونل	چین	2019	مدل‌سازی عددی	تغییرات دما باعث ایجاد تنش‌های حرارتی در بتن و نیاز به طراحی مقاوم‌تر می‌شود.
ژاو و همکاران[2] (۲۰۲۳)	مدیریت بارش‌های شدید و سیلاب‌ها: مطالعه موردی سیل ژوئیه ۲۰۲۱ ژنگژو	چین	2023	مطالعه موردی و تحلیل داده‌ها	بارش‌های شدید باعث افزایش خطر سیلاب و نیاز به سیستم‌های مدیریت بهتر دارد.
ژونگ و همکاران[3] (۲۰۲۰)	جذب رقابتی کبالت و نیکل توسط کامپوزیت‌های مغناطیسی	چین	2020	آزمایش‌های آزمایشگاهی	کامپوزیت‌های مغناطیسی برای جذب فلزات سنگین مؤثر هستند.
ژونگ و همکاران (۲۰۲۳)	تحلیل روش‌های عایق‌کاری تونل‌ها در مناطق سردسیر	چین	2023	مدل‌سازی و تحلیل داده‌ها	عایق‌کاری مناسب باعث کاهش تأثیر چرخه‌های یخزدگی و ذوب بر تونل‌ها می‌شود.
ژانگ و همکاران[4] (2004)	بررسی آسیب‌های سنگ اطراف تونل در شرایط چرخه‌های یخزدگی و ذوب	چین	2004	آزمایش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی	چرخه‌های یخزدگی و ذوب باعث افزایش آسیب‌های سنگ اطراف تونل می‌شوند.
ژانگ و همکاران (2023)	بررسی تغییر شکل سنگ‌های اطراف تونل در شرایط	چین	2023	مدل‌سازی عددی	ذوب پرمافراست باعث تغییر شکل سنگ‌های اطراف تونل و نیاز به

[1] Wang et al.
[2] Zhao et al
[3] Zhong et al
[4] Zhang et al

نویسندگان	هدف	کشور	افق زمانی	روش‌شناسی	خلاصه نتایج
	ذوب پرمافراست				طراحی مقاوم‌تر می‌شود.

روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش با هدف تأثیر تغییر اقلیم جهانی بر ساخت و نگهداری تونل‌های دفاعی طراحی شده است و از یک رویکرد ترکیبی[1] بهره می‌برد که شامل مراحل کیفی و کمی است. دربخش کیفی، اطلاعات و داده‌های اولیه از طریق مرور ادبیات گردآوری می‌شود. سپس این داده‌ها مبنای طراحی پرسشنامه‌ای ساختاریافته برای جمع‌آوری داده‌های کمی قرار می‌گیرد.

مرحله اول: استخراج به روش کیفی

دربخش کیفی، از روش تحلیل مضمون[2] برای استخراج مفاهیم کلیدی مرتبط با تأثیرات تغییر اقلیم بر تونل‌های دفاعی از اسناد منتشر شده بین سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۲۴ استفاده شد. این مرحله شامل موارد زیر است:

۱. مرور ادبیات پژوهش: مرور منابع علمی معتبر از پایگاه‌هایی مانند Scopus، Web of Science، و Google Scholar با استفاده از کلیدواژه‌هایی مانند climate change, defensive tunnels, freeze-thaw cycles, underground structures. مطالعات مرتبط از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۴ انتخاب و تحلیل می‌شوند تا چارچوب نظری پژوهش شکل گیرد.

مرحله دوم: طراحی پرسشنامه و جمع آوری داده‌های کمی

پس از تحلیل داده‌های کیفی، پرسشنامه‌ای ساختاریافته برای‌بخش کمی پژوهش طراحی می‌شود.

۱. طراحی پرسشنامه: پرسشنامه شامل‌بخش‌های زیر است:

- عوامل کلیدی شناسایی‌شده: سوالات مبتنی بر عواملی که در مرحله کیفی استخراج شده‌اند
- مقیاس‌ها: استفاده از طیف لیکرت پنج‌گزینه‌ای (۱=کاملاً مخالف تا ۵=کاملاً موافق) برای ارزیابی شدت تأثیر هر عامل.

[1] Mixed Method
[2] Thematic Analysis

۲. جامعه آماری و نمونه‌گیری

- جامعه آماری: متخصصان، استادان دانشگاه‌ها، مهندسان مرتبط با حوزه دفاعی در نیروهای مسلح انتخاب شد.
- روش نمونه‌گیری: از نمونه‌گیری هدفمند براساس تخصص که شامل ۴۳ نفر انتخاب شد.

مرحله سوم: تحلیل داده‌های کمی

داده‌های گردآوری‌شده از پرسشنامه با استفاده از نرم‌افزار آماری (SPSS) و PLS تحلیل می‌شوند. مراحل تحلیل شامل:

تحلیل توصیفی: برای بررسی توزیع پاسخ‌ها و ویژگی‌های جمعیت‌شناختی.

تحلیل استنباطی: بعد از شناسایی مولفه‌های تاثیرگذار تغییر اقلیم بر تونل دفاعی است، نتیجه نهایی این مرحله، مشخص شدن ۳ بعد و ۱۳ مولفه و با استفاده از معادلات ساختاری و نرم افزار Smart PLS مدل پژوهش مورد برازش قرار گرفت. جهت اعتباریابی مدل ساختاری مولفه‌های تاثیرگذار تغییر اقلیم بر تونل دفاعی در اختیار گروهی از متخصصان قرار گرفت.

آزمون‌های پایایی مدل اندازه‌گیری

برای سنجش پایایی مدل اندازه‌گیری از سه شاخص اصلی استفاده شده است:

آلفای کرونباخ[1]: این شاخص قابلیت اعتماد (پایایی) سازه‌های پژوهش را ارزیابی می‌کند. مقدار قابل قبول برای آن ۰. ۷ یا بالاتر است (Sarstedt et al. , 2021) .

پایایی اشتراکی[2]: نشان‌دهنده هماهنگی درونی بین گویه‌های هر سازه است و مقدار مطلوب آن ۰. ۵ یا بیشتر در نظر گرفته می‌شود (Fornell & Larcker, 1981).

پایایی درونی سازه‌ها[3]: مشابه آلفای کرونباخ عمل می‌کند، اما برای مدل‌های معادلات ساختاری مناسب‌تر است و مقدار ۰. ۷ یا بالاتر نشان‌دهنده پایایی مطلوب است (Caraka et al, 2021).

معیار برازش کلی مدل (GOF)[1]

[1] Cronbach's Alpha
[2] Composite Reliability
[3] Dillon-Goldstein's Rho

برای ارزیابی برازش کلی مدل از شاخص GOF استفاده شده است که ترکیبی از تناسب مدل ساختاری و اندازه‌گیری است. این شاخص با فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$GOF = \sqrt{average(comunality) * R2}$$

مقادیر ۰. ۰۱ تا ۰. ۲۵ ضعیف، ۰. ۲۵ تا ۰. ۳۶ متوسط، و بالاتر از ۰. ۳۶ مطلوب در نظر گرفته می‌شوند(Henseler & Sarstedt, 2013) .

معیارهای SRMR وNFI

شاخص ریشه میانگین مربعات باقی‌مانده استاندارد[۲] : این شاخص اختلاف بین ماتریس همبستگی مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده را می‌سنجد. مقادیر کمتر از ۰. ۰۸ نشان‌دهنده برازش خوب مدل هستند.

شاخص نرم‌شده برازشNFI : NFI مقایسه‌ای بین مدل پیشنهادی و مدل پایه انجام می‌دهد. مقدار ۰. ۹ یا بالاتر نشان‌دهنده برازش مطلوب می‌باشد (Hu & Bentler, 1999).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

الگوریتم‌ها تحلیل داده‌ها در روش شامل دوبخش کلی برازش مدل و آزمودن فرضیه‌ها است. تحلیل عاملی، پایایی، روایی و ضریب معناداری دربخش برازش مدل صورت می‌گیرد. چیدمان الگو شامل ابعاد و مولفه‌های آن به همراه ضرایب بارهای عاملی در محیط در شکل زیر نشان داده است.

برای پاسخ به سوال پژوهش از پرسشنامه اصلی مشتمل بر ۲۱ مولفه که از طریق جستجو در پایگاه داده‌ها استخراج گردید و نتایج جهت اعتبارسنجی مدل پژوهش با Smart Pls مورد تحلیل قرار گرفت که در نهایت مدل پژوهش به صورت شکل (۱) که نشان دهنده مدل اندازه گیری اولیه پژوهش همراه با ضرایب بارهای عاملی است ارائه گردید. برای مناسب بودن ضرایب بارهای عاملی، مقدار ملاک برابر و یا بیشتر ۰/۴ در نظر گرفته می‌شود. در پرسشنامه توزیع شده، تمامی مولفه‌ها دارای بار عاملی بیشتر از ۰/۴ بوده و در نتیجه هیچ سوالی از مدل حذف نمی‌گردد. شاخصی که بار عاملی بالاتری داشته باشد، سهم بیشتری را در مولفه‌های تغییراقلیم بر طراحی، ساخت و نگهداری تونل دفاعی دارد، که با توجه به شکل (۱) و جدول (۲)کلیه شاخص‌های پژوهش تأیید شدند.

[1] Goodness of Fit
[2] Root Mean Square Residual

جدول (۲) بار عاملی مولفه‌های استخراج شده عوامل تاثیرگذار تغییراقلیم بر طراحی، ساخت و نگهداری تونل دفاعی.

ردیف	مولفه	بار عاملی		
		طراحی(X)	ساخت (M)	نگهداری (N)
۱	افزایش دما و گرمایش جهانی	۰/۴۴۶	۰/۶۲۹	۰/۷۲۷
۲	تغییرات در الگوهای بارش	۰/۶۲۸	۰/۶۱۶	۰/۶۶۵
۳	افزایش سطح آب دریاها (مناطق ساحلی)	۰/۶۳۴	۰/۷۱۳	۰/۶۴۸
۴	تغییرات در الگوهای باد و طوفان	۰/۵۲۲	۰/۴۸۳	۰/۵۳۰
۵	تغییرات در رطوبت و نم	۰/۵۱۸	۰/۶۵۴	۰/۵۲۱
۶	تغییرات در یخبندان و ذوب یخ (مناطق سردسیر)	۰/۶۸۵	۰/۴۱۶	۰/۵۷۰
۷	تغییرات در اکوسیستم‌ها	۰/۵۴۶	۰/۴۱۹	۰/۵۱۵
۸	تغییرات در زمین‌لرزه‌ها	۰/۶۲۱	۰/۴۴۴	۰/۵۲۷
۹	خشکسالی	۰/۷۸۳	۰/۸۰۳	۰/۸۳۴
۱۰	افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای	۰/۵۲۶	۰/۴۱۰	۰/۷۲۸
۱۱	تغییرات در pH آب و خاک	۰/۶۳۳	۰/۴۲۷	۰/۵۲۲
۱۲	تغییرات در فشار و رطوبت خاک	۰/۵۹۹	۰/۸۵۳	۰/۷۱۷
۱۳	افزایش فرکانس امواج گرمایی	۰/۸۲۸	۰/۵۰۰	۰/۴۷۰

شکل (۱) مدل معادلات ساختاری اولیه پژوهش همراه با ضرایب بارهای عاملی.

جدول (۳) ضریب تعیین، ضرایب مسیر، ضرایب Z، سطح معناداری را نشان می‌دهد، ضریب تعیین، بیان کننده درصد تغییرات متغیر وابسته به وسیله متغیرهای مستقل می‌باشد. با توجه به شکل مدل ساختاری برازش شده تحقیق (شکل ۱)، ضریب تعیین مولفه‌های تاثیرگذار تغییراقلیم بر طراحی تونل دفاعی، برابر با ۰/۷۹۲ می‌باشد که بیانگر این است که ۷۹ درصد تغییرات در طراحی تونل دفاعی توسط مولفه‌های تغییر اقلیم تبیین می‌شود و ضریب تعیین تعیین مولفه تغییراقلیم بر ساخت تونل دفاعی، برابر ۰/۷۵۶ می‌باشد که ۷۵ درصد تغییرات در طراحی تونل دفاعی، توسط مولفه تغییراقلیم تبیین می‌شود. ضریب تعیین تعیین مولفه تغییراقلیم بر نگهداری تونل دفاعی برابر ۰/۷۵۹ می‌باشد که ۷۵ درصد تغییرات نگهداری تونل دفاعی توسط مولفه‌های تغییراقلیم، تبیین می‌شود. بطور کلی در این پژوهش ضریب تعیین بیشتر مولفه‌های از ۰/۷ است که متغیرهای مستقل با مقدار قوی متغیر وابسته را تبیین می‌کند(جدول ۳). ضریب مسیر بیان کننده وجود رابطه علی خطی و شدت و جهت این رابطه بین دو متغیر مکنون است. در حقیقت همان ضریب رگرسیون در حالت استاندارد است و همان طور که در جدول (۳) مشاهده می‌کنید ضرایب مسیر نزدیک یک می‌باشد که نشان دهنده‌ی رابطه‌ی علی خطی بین متغیرها می‌باشد.

شکل (۲) مدل ساختاری مولفه‌ها درحالت معناداری ضرایب.

ضرایب Z، این شاخص همان مقادیرT-value را نمایش می‌دهد که جهت برازش مدل ساختاری به کار می‌رود بدین صورت که این ضرایب باید از ۱/۹۶ بالاتر باشند تا بتوان در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار بودن آنها را تایید کرد. همان گونه که مشاهده شد کلیه مولفه‌های تغییراقلیم بر طراحی، ساخت و نگهداری تونل دفاعی بالاتر از ۱/۹۶ می‌باشد. پس

با اطمینان ۹۵ درصد می‌توان گفت که کلیه شاخص‌های شناسایی در این مدل در طراحی، ساخت و نگهداری تونل دفاعی موثر بوده است (شکل ۲).

جدول (۳) معادلات آزمون‌ها و ضرایب مسیر و معناداری آن ها

فرضیات	ضرایب مسیر	p-V	t-v	r^2	تفسیر
عوامل تغییراقلیم -> طراحی تونل دفاعی	۰/۸۹۰	۰/۰۰۰	۲۴/۳۸	۰/۷۹۲	معنادار
عوامل تغییراقلیم -> ساخت تونل دفاعی	۰/۸۶۹	۰/۰۰۰	۱۹/۰۵	۰/۷۵۶	معنادار
عوامل تغییراقلیم -> نگهداری تونل دفاعی	۰/۸۷۱	۰/۰۰۰	۲۳/۹۶	۰/۷۵۹	معنادار

آزمون‌های پایایی مدل اندازه‌گیری

مطابق با یافته‌های جدول ۴ پایایی ترکیبی، ضریب آلفای کرونباخ و پایایی درونی سازه‌ها بدست آمده برای متغیرهای مکنون، نشان می‌دهد که سازگاری درونی در حد مطلوب قرار دارد، لذا می‌توان مناسب بودن وضعیت پایایی پژوهش را تأیید نمود(جدول ۴).

جدول (۴) پایایی شاخص‌های پژوهش

	آلفای کرونباخ	پایایی اشتراکی	پایایی درونی سازه‌ها (ضریب دایلون-گولداشتین)
طراحی تونل دفاعی	۰/۸۴۷	۰/۷۸۹	۰/۸۲۱
ساخت تونل دفاعی	۰/۸۷۷	۰/۸۴۱	۰/۸۰۹
فرماندهی و کنترل	۰/۷۳۸	۰/۷۶۴	۰/۷۶۱
نگهداری تونل دفاعی	۰/۷۸۶	۰/۷۹۸	۰/۷۸۶

آزمون‌های روایی مدل اندازه‌گیری

میانگین واریانس استخراجی[1](AVE)

میانگین واریانس استخراج شده باید بزرگتر یا مساوی ۰/۵ باشد. بدین معنا که متغیر پنهان موردنظر حداقل۵۰ درصد واریانس مشاهده‌پذیرهای خود را تبیین می‌کند. فورنل و لارکر(۱۹۸۱) مقدار بالای ۰/۵را پیشنهاد می‌کنند که به این معناست که بیش از نصف واریانس سازه، به علت شاخص‌هایش است. با توجه به مقادیر موجود در جدول (۵)، مشاهده

[1] Average Variance Extracted (AVE)

می‌شود که تمام عوامل دارای میانگین واریانس استخراجی بالای ۰/۵ هستند بنابراین روایی همگرای داده‌ها مورد تأیید می‌باشد.

جدول (۵) میانگین واریانس استخراجی

متغیر ها	AVE	
طراحی تونل دفاعی	۰/۶۷۹	
ساخت تونل دفاعی	۰/۶۱۵	
نگهداری تونل دفاعی	۰/۵۴۳	

برازش مدل کلی

معیار GOF[1]

نتایج نشان دهنده ۰/۶۸ برای GOF در این پژوهش می‌باشد که نشان از برازش بسیار مناسب مدل دارد و همچنین برازش مدل کلی مولفه‌ها بیشتر ۰/۳۶ می‌باشد که نشان دهنده برازش مدل کلی با توجه به متغییرهای مستقل، قوی می‌باشد(جدول ۷).

$$GOF = \sqrt{average(comunality) * R2}$$

جدول(۷) برازش مدل کلی مولفه‌های مدل اندازه‌گیری

مولفه ها	ضریب تعیین	پایایی اشتراکی	GOF
طراحی تونل دفاعی	۰/۷۹۲	۰/۷۸۹	۰/۷۹۰
ساخت تونل دفاعی	۰/۷۵۶	۰/۸۴۱	۰/۷۹۷
نگهداری تونل دفاعی	۰/۷۵۹	۰/۷۶۴	۰/۷۶۱

معیار SRMR و NFI

بر طبق جدول (۸) چون مقدار (SRMR) حدود ۰/۰۷ و (NFI) حدود یک هستند می‌توان مناسب‌بودن پردازش الگوی مولفه‌های موثر تغییر اقلیم بر طراحی و ساخت و نگهداری تونل‌های دفاعی را تأیید کرد.

جدول (۸) پردازش الگوی مولفه‌های موثر تغیر اقلیم بر طراحی و ساخت و نگهداری تونل‌های دفاعی

	مدل اشباع شده	مدل برآورد شده
SRMR	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵
NFI	۰/۹۲۴	۰/۹۲۴

[1] Goodness of Fit

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

هدف از این مطالعه تاثیر پیامدهای تغییر اقلیم بر طراحی و ساخت و نگهداری تونل‌های دفاعی براساس مدل معادلات ساختاری می‌باشد. ابتدا با انجام تحلیل محتوا کیفی (تحلیل مضمون) ۱۳ زیر طبقه احصاء گردید. با توجه به یافته‌های این مطالعه، تغییر اقلیم به‌عنوان یک پدیده جهانی، تأثیرات عمیق و گسترده‌ای بر طراحی، ساخت و نگهداری تونل‌های دفاعی دارد. ضرایب تعیین به‌دست‌آمده (۷۹٪ برای طراحی، ۷۵٪ برای ساخت و ۷۵٪ برای نگهداری) نشان می‌دهد که تغییر اقلیم سهم قابل توجهی در تغییرات این مراحل ایفا می‌کند. این نتایج حاکی از آن است که تغییر اقلیم نه تنها به‌عنوان یک عامل محیطی، بلکه به‌عنوان یک متغیر کلیدی در مهندسی زیرساخت‌ها باید مورد توجه قرار گیرد.

مقایسه نتایج این پژوهش با دیگر مطالعات انجام‌شده در زمینه تأثیر اقلیم بر تونل‌ها نشان می‌دهد که بسیاری از این یافته‌ها هم‌راستا با نتایج مشابهی هستند که در سایر مطالعات نیز گزارش شده‌اند. در مطالعه‌ای که توسط (Hosseini & Khodayari, 2020) انجام شد، تأثیر چرخه‌های یخ‌زدگی-ذوب‌شدن بر مقاومت و پارامترهای سنگ‌شناسی در ایران مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعه نشان داد که چرخه‌های یخ‌زدگی-ذوب‌شدن باعث کاهش استحکام فشاری سنگ‌ها و افزایش شکنندگی سنگ‌ها می‌شود. نتایج این تحقیق نشان داد که برای ساخت تونل‌ها و سایر سازه‌ها در مناطق سردسیر، تأثیر چرخه‌های یخ‌زدگی-ذوب‌شدن باید در طراحی‌های مهندسی مدنظر قرار گیرد. که این نتیجه با یافته‌های این پژوهش نیز همخوانی دارد.

تغییرات در PH آب و خاک یکی از عوامل تاثیرگذار تغییر اقلیم بر تونل دفاعی است. با نتایج محمدی (۱۴۰۳) همخوانی دارد. در پژوهش محمدی (۱۴۰۳)، پیامدهای نظامی تغییر اقلیم در ایران را بررسی کرد و نتایج مطالعات نشان می‌دهد که تغییر اقلیم بر تمام ارکان فعالیت‌های نظامی تأثیرگذار است و پیامدهای نظامی تغییرات دما در حوزه نیروی انسانی، آماد و پشتیبانی و تجهیزات، و پیامدهای نظامی تغییرات بارش در حوزه مهندسی، عملیات، نیروی انسانی، آماد و پشتیبانی و تجهیزات شناسایی و این پیامدها در حوزه‌های یادشده بیشتر و تأثیرگذارتر از سایر ارکان نظامی است.

افزایش دما و گرمایش جهانی یکی از عوامل تاثیرگذار تغییر اقلیم بر تونل دفاعی است. که با نتایج حنفی (۱۴۰۳) همخوانی دارد. حنفی در پژوهشی با عنوان: بررسی تاثیر تغییر اقلیم آینده بر فعالیت‌های نظامی در منطقه امامزاده هاشم براساس مدل‌های CMIP6 پرداخت و

نتایج نشان داد که افزایش دمای هوا و به دنبال آن تغییر الگوهای بارش از برف به باران باعث ایجاد مجدودیت‌هایی برای برنامه‌های نظامی و آموزش‌های رزم در کوهستان و رزم در برف تا انتهای قرن حاضر خواهد شد.

همچنین، در تحقیقی که توسط (Liu et al. , 2022: 3875) در مورد ارزیابی ایمنی ساخت تونل مترو تحت شرایط آب و هوای بارندگی شدید با استفاده از مدل ترکیب وزن‌دهی-جفت‌سازی انجام شد، نتایج نشان داد که که بارش‌های شدید می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر ایمنی تونل‌ها داشته باشند. به ویژه، بارش‌های ناگهانی موجب افزایش خطرات در نقاط حساس مانند ورودی‌ها و خروجی‌های تونل‌ها می‌شوند. این یافته‌ها مشابه با نتایج این پژوهش است که تأکید زیادی بر تأثیر بارش‌های سنگین بر کاهش پایداری تونل‌ها دارد.

علاوه بر این، (Collings. , 2025: 220) در پژوهشی مشابه به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر زیرساخت‌های پل‌ها و تونل‌ها پرداختند و به این نتیجه رسیدند که تغییرات اقلیمی، به‌ویژه افزایش دما و تغییر الگوهای بارش، می‌تواند بر استحکام و دوام سازه‌های تونل و پل تأثیر منفی بگذارد این نتیجه با یافته‌های این پژوهش در ارتباط با تأثیر تغییرات دمایی شدید بر پایداری تونل‌ها مطابقت دارد.

مقایسه با سایر پژوهش‌ها نشان می‌دهد که اکثر تحقیقات بر تأثیر مستقیم عوامل اقلیمی بر پایداری تونل‌ها تأکید دارند و یافته‌های این تحقیق در مقایسه با دیگر مطالعات نیز هم‌راستا و قابل تأسیس است. به‌ویژه، تأثیر بارش‌های سنگین و چرخه‌های یخبندان-ذوب که در اکثر مطالعات به‌عنوان دو عامل کلیدی در آسیب به سازه‌های زیرزمینی معرفی شده‌اند، در این پژوهش نیز تأکید شده است. در عین حال، این مطالعه نشان داده است که تغییرات دمایی شدید نیز عامل دیگری است که باید به‌طور خاص در طراحی و نگهداری تونل‌های دفاعی مورد توجه قرار گیرد.

پیشنهادها

براساس نتایج این پژوهش و مقایسه آن با دیگر تحقیقات، چندین پیشنهاد برای بهبود طراحی و نگهداری تونل‌های دفاعی در برابر تغییر اقلیم ارائه می‌شود:

۱-به‌روزرسانی استانداردهای طراحی: با توجه به تأثیر قابل توجه تغییر اقلیم بر طراحی تونل‌ها، پیشنهاد می‌شود استانداردهای طراحی تونل‌های دفاعی به‌روزرسانی شوند تا عوامل اقلیمی مانند افزایش دما، تغییرات در الگوهای بارش و خشکسالی به‌طور کامل در نظر گرفته شوند.

۲-استفاده از مصالح مقاوم به شرایط اقلیمی: در مرحله ساخت، استفاده از مصالحی که مقاومت بیشتری در برابر تغییرات دما، رطوبت و فشار خاک دارند، می‌تواند به افزایش دوام و پایداری تونل‌ها کمک کند.

۳-برنامه‌ریزی برای نگهداری پیشگیرانه: با توجه به تأثیر تغییر اقلیم بر نگهداری تونل‌ها، پیشنهاد می‌شود برنامه‌های نگهداری پیشگیرانه به‌طور منظم و با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی فعلی و آینده اجرا شوند.

۴-پایش مستمر شرایط اقلیمی: ایجاد سیستم‌های پایش مستمر شرایط اقلیمی در اطراف تونل‌ها می‌تواند به شناسایی سریع تغییرات و اتخاذ اقدامات لازم برای کاهش تأثیرات منفی کمک کند.

۵-تحقیقات بیشتر: انجام تحقیقات بیشتر در زمینه تأثیر تغییر اقلیم بر تونل‌های دفاعی، به‌ویژه در مناطق با شرایط اقلیمی خاص (مانند مناطق سردسیر و ساحلی)، می‌تواند به درک بهتر و ارائه راهکارهای مؤثرتر منجر شود.

۶-همکاری بین‌المللی: تبادل اطلاعات و تجربیات با کشورها و سازمان‌های بین‌المللی که در زمینه تأثیر تغییر اقلیم بر زیرساخت‌ها فعالیت می‌کنند، می‌تواند به بهبود روش‌ها و استانداردهای طراحی، ساخت و نگهداری تونل‌های دفاعی کمک کند.

قدردانی

از کلیهٔ اساتید و پژوهشگرانی که در طول این پژوهش ما را یاری نموده و موجب به ثمر رسیدن آن را فراهم نموده‌اند، صمیمانه تشکر می‌نمایم.

منابع

حنفی, علی. (۱۴۰۳). بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی آینده بر فعالیت‌های نظامی در منطقه امامزاده هاشم براساس مدل‌های CMIP6. *فصلنامه مدیریت نظامی*, ۲۴(۹۵): ۱-۲۶.

رضایان قیه‌باشی, احد , پورعزت, علی‌اصغر و حافظ نیا, محمدرضا. (۱۳۹۶). آینده‌پژوهی تهدیدهای نظامی – امنیتی ناشی از تغییر اقلیم در ایران؛ با استفاده از روش چرخ آینده. *آینده‌پژوهی دفاعی*, ۲(۴): ۱۴۱-۱۶۶.

محمدی, محمد و خشتان, بهرمان. (۱۴۰۳). پیامدهای نظامی تغییرات اقلیمی در ایران. *فصلنامه مدیریت نظامی*, ۲۵(۹۷): ۱۷۰-۱۵۱.

محمدی, محمد و قاضی, حسن. (۱۴۰۱). واکاوی زمانی و مکانی تنش گرمایی مؤثر بر نیروی انسانی یگان‌های نظامی مستقر در استان خوزستان با استفاده از شاخص دمای معادل فیزیولوژیک. آینده‌پژوهی دفاعی, ۷(۲۴): ۱۳۱-۱۵۰.

Andersland, O. B. , & Ladanyi, B. (2003). *Frozen ground engineering*. John Wiley & Sons.

Caraka, R. E. , Chen, R. C. , Lee, Y. , Gio, P. U. , Budiarto, A. , & Pardamean, B. (2021). Latent regression and ordination risk of infectious disease and climate. *Procedia Computer Science*, *179*, 25-32.

Chang, H. , Ren, R. , Yang, S. , & Wang, Y. (2022). Monitoring and analysis of the temperature field of a cold-region highway tunnel considering the traffic-induced thermal effect. *Case Studies in Thermal Engineering*, 40, 102482.

Cho, Y. J. (2024). Optimal design of deep stormwater drainage tunnels to address urban flooding in Korea. *Scientific Reports*, *14*(1), 24896.

Collings, D. (2024). Investigating climate change effects on bridges and tunnels. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Bridge Engineering* (pp. 1-9). Emerald Publishing Limited. 178 (3): 220–228.

Du, D. , Dias, D. , & Do, N. -A. (2021). A Simplified Way to Evaluate the Effect of Temperature on a Circular Tunnel. *Geotechnics*, *1*(2), 385-401. https: //doi. org/10. 3390/geotechnics1020018

Henseler, J. , & Sarstedt, M. (2013). Goodness-of-fit indices for partial least squares path modeling. *Computational statistics*, *28*(2), 565-580.

Hosseini, M. , & Khodayari, A. R. (2019). Effect of freeze-thaw cycle on strength and rock strength parameters (A Lushan sandstone case study). *Journal of Mining and Environment*, *10*(1), 257-270.

Hu, L. T. , & Bentler, P. M. (1998). Fit indices in covariance structure modeling: Sensitivity to underparameterized model misspecification. *Psychological methods*, *3*(4), 424.

Jiang, W. , & Tan, Y. (2022). Overview on failures of urban underground infrastructures in complex geological conditions due to

heavy rainfall in China during 1994–2018. *Sustainable Cities and Society*, *76*, 103509.

Kanevskiy, M. , Shur, Y. , Bigelow, N. H. , Bjella, K. L. , Douglas, T. A. , Fortier, D. ,... & Jorgenson, M. T. (2022). Yedoma cryostratigraphy of recently excavated sections of the CRREL permafrost tunnel near Fairbanks, Alaska. *Frontiers in Earth Science*, 9, 758800.

Liu, P. , Wang, Y. , Han, T. , Xu, J. , & Li, Q. (2022). Safety Evaluation of Subway Tunnel Construction under Extreme Rainfall Weather Conditions Based on Combination Weighting–Set Pair Analysis Model. *Sustainability*, *14*(16), 9886.

Liu, S. , Fu, J. , Yang, J. , & Feng, H. (2020). Numerical simulation of temperature effects on mechanical behavior of the railway tunnel in tibet. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *24*(12), 3875-3883.

Mukunoki, T. , Suetsugu, D. , Sako, K. , Murakami, S. , Fukubayashi, Y. , Ishikura, R. ,... & Koyama, A. (2021). Reconnaissance report on geotechnical damage caused by a localized torrential downpour with emergency warning level in Kyushu, Japan. *Soils and Foundations*, 61(2), 600-620.

Pal, I. , Kumar, A. , & Mukhopadhyay, A. (2023). Risks to coastal critical infrastructure from climate change. *Annual Review of Environment and Resources*, *48*(1), 681-712.

Peng, W. , Wang, Q. , Liu, Y. , Sun, X. , Chen, Y. , & Han, M. (2019). The influence of freeze-thaw cycles on the mechanical properties and parameters of the Duncan-chang constitutive model of remolded saline soil in Nong'an County, Jilin Province, Northeastern China. *Applied Sciences*, *9*(22), 2-18.

Peng, X. , Yimin, W. , Zijian, W. , & Le, H. (2020). Distribution laws of freeze-thaw cycles and unsaturated concrete experiments in cold-region tunnels. *Cold Regions Science and Technology*, *172*, 102985.

Pimentel, E. , Papakonstantinou, S. , & Anagnostou, G. E. O. R. G. (2012). Numerical interpretation of temperature distributions from three ground freezing applications in urban tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 28, 57-69.

Sarstedt, M. , Hair, J. F. , Pick, M. , Liengaard, B. D. , Radomir, L. , & Ringle, C. M. (2022). Progress in partial least squares structural

equation modeling use in marketing research in the last decade. *Psychology & Marketing*, 39(5), 1035-1064.

Sun, K. , Jia, J. , Xiong, Z. , Wu, J. , Liu, Y. , & Wei, Y. (2024). Investigation of hydro-thermal variations and mechanical properties in cold region tunnels under long-term freeze–thaw cycles. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *143*, 105469.

Szymczak, S. , Backendorf, F. , Bott, F. , Fricke, K. , Junghänel, T. , & Walawender, E. (2022). Impacts of heavy and persistent precipitation on railroad infrastructure in July 2021: a case study from the Ahr Valley, Rhineland-Palatinate, Germany. *Atmosphere*, *13*(7), 1118.

Wang, X. , Chen, Q. , Tao, J. , Han, R. , Ding, X. , Xing, F. , & Han, N. (2019). Concrete thermal stress analysis during tunnel construction. *Advances in Mechanical Engineering*, *11*(6), 1687814019852232.

Zhang, M. , Wang, T. , Wang, X. , Wu, W. and Guo, J. (2023) "Analysis on the laying method and thermal insulation effect of tunnel insulation layer in high-altitude cold regions", *Electronic Journal of Structural Engineering*, 23(4), 66–74. doi: 10. 56748/ejse. 23376.

Zhang, S. , Lai, Y. , Zhang, X. , Pu, Y. , & Yu, W. (2004). Study on the damage propagation of surrounding rock from a cold-region tunnel under freeze–thaw cycle condition. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *19*(3), 295-302.

Zhao, X. , Li, H. , Cai, Q. , Pan, Y. , & Qi, Y. (2023). Managing Extreme Rainfall and Flooding Events: A Case Study of the 20 July 2021 Zhengzhou Flood in China. *Climate*, *11*(11), 2-18.

Zhong, Q. Q. , Zhao, Y. Q. , Shen, L. , Hao, B. , Xu, X. , Gao, B. Y. ,... & Yue, Q. Y. (2020). Single and binary competitive adsorption of cobalt and nickel onto novel magnetic composites derived from green macroalgae. *Environmental Engineering Science*, *37*(3), 188-200.

Zhang, J. , Zhou, W. , & Meng, Z. (2023). Deformation of Thawed Surrounding Rock During Tunneling in Permafrost. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 59(6), 565-575.