

## EXTENDED ABSTRACT

# Design of Underground Structure According to Fragility Curves Based on Far and Near Explosions

Seyed Mostafa Mirtabaei<sup>a,\*</sup>, Behzad Mohammadi Miveroud<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Imam Ali University (AIU), Tehran, Iran

<sup>b</sup> Masters Degree in Geotechnical Civil Engineering, Shahid Madani University of Azerbaijan, Tabriz, Iran

**Received:** 08 October 2024; **Reviewed:** 21 February 2025; **Accepted:** 08 September 2025

### Keywords:

Fragility curve, Underground structures, Finite element modeling, Far and near explosions, Structural failure.

## 1. Introduction

This study examines the application of fragility curves as a tool for designing underground shelters resilient to both distant and close-range explosions. Fragility curves serve as an effective method for identifying structural characteristics and resistance, crucial due to the relative vulnerability of structures to explosions across various organizations. To design the structure and obtain its fragility curve under such blasts, ABAQUS finite element software was utilized. The results indicate that fragility curves effectively determine the resistance and vulnerability of underground structures under explosion conditions. Notably, if an explosion occurs more than 12 meters from the structure's center, the likelihood of structural failure is approximately 5% or less; however, this probability increases significantly with proximity to the structure reaching about 60% at a distance of 8 meters and exceeds 98% at the central surface point. The findings highlight that soil-structure interaction plays a pivotal role in mitigating blast-induced damage. Furthermore, it is demonstrated that the proposed fragility model can be employed as a tool for assessing other underground structures' vulnerability; comparisons with previous studies show that this approach offers higher accuracy in estimating potential damage probabilities.

## 2. Methodology

This study investigates the structural resilience of underground shelters subjected to blast loads at various distances, using fragility curves as a key assessment tool. The methodology consists of three primary steps: model creation, simulation, and analysis. The steps are described in detail below.

### 2.1. Model creation

The underground shelter was modeled using finite element analysis software, ABAQUS, to simulate real-world structural behavior under blast conditions. The shelter design was based on typical underground bunker dimensions and construction materials, including reinforced concrete for structural integrity. The surrounding soil was also modeled to accurately reflect soil-structure interaction during blast events. Both the shelter and soil were assigned material properties such as density, Young's modulus, Poisson's ratio, and strength

characteristics, sourced from relevant engineering databases and literature. The shelter was designed to resist varying degrees of blast pressure, ranging from near-field to far-field explosion scenarios.

## 2.2. Blast simulation

Blast loads were simulated using predefined pressure-time histories derived from explosion models in ABAQUS. These blast loads were applied at multiple distances from the underground shelter to capture the effects of both near and distant explosions. To ensure accuracy, the simulation incorporated nonlinear dynamic analysis, accounting for the rapid application of loads and the subsequent structural response. The interaction between the underground shelter and surrounding soil was modeled using a coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) approach, allowing for the consideration of large deformations in the soil and potential damage to the shelter.

## 2.3. Fragility curve development

Once the blast simulations were completed, the results were used to develop fragility curves for the underground shelter. Fragility curves express the probability of structural failure as a function of increasing blast load intensity. Data from multiple simulations, including stress, strain, and displacement values, were extracted and analyzed. The failure criteria were based on key structural performance indicators, such as cracking, yielding, and total collapse. These indicators were then used to assign failure probabilities to specific blast intensities and distances. Statistical analysis was conducted to fit a lognormal distribution to the failure data, creating fragility curves that represent the likelihood of failure at different blast loads.

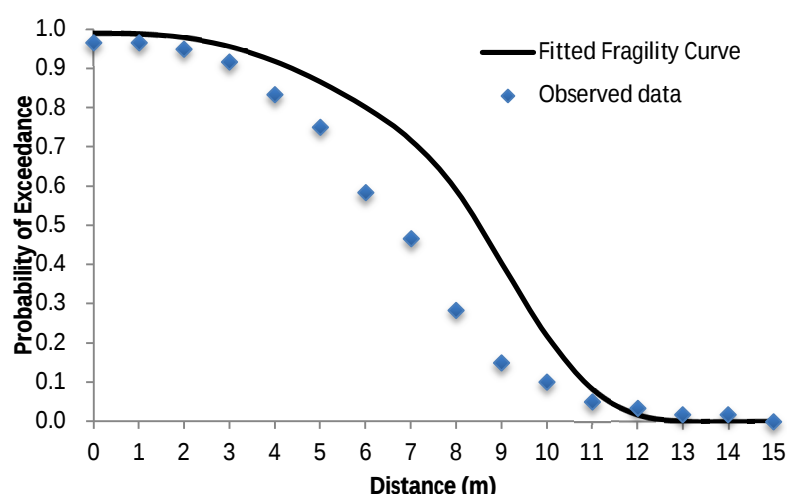


Fig. 1. Developed fragility curve of the underground structure

## 3. Results and discussion

The results from the simulations conducted in this study offer valuable insights into the performance of underground shelters subjected to blast loads at varying distances. This section presents a detailed analysis of the structural behavior of the shelter under different blast conditions, followed by a discussion on the derived fragility curves and their implications for the design of resilient underground structures. Key trends, failure mechanisms, and the implications of material properties and structural configuration are discussed. The results also highlight critical vulnerabilities in the shelter's design and propose potential improvements based on the findings.

### 3.1. Structural response to blast Loads

The initial simulations focused on understanding the shelter's structural response to varying blast intensities. These responses were categorized based on the proximity of the blast to the shelter namely, near-field, mid-field, and far-field explosion scenarios. In the near-field scenario, where the explosion was close to the shelter, the structure experienced extreme loading conditions, leading to significant deformations. The

outer walls of the shelter showed the highest stress concentrations, with cracking and yielding observed in the reinforced concrete. The soil surrounding the shelter also deformed significantly, which contributed to additional pressure on the shelter walls, especially in regions where the soil-structure interaction was strongest.

In the mid-field scenario, the shelter still experienced notable stresses, though these were reduced compared to the near-field case. Here, structural deformation was less severe, but localized failures, such as the spalling of concrete and minor cracking, were still present. In the far-field scenario, the blast effects were further mitigated by the surrounding soil, and the shelter remained largely intact, experiencing only minor vibrations and displacements. No significant structural damage was observed at these distances, demonstrating that the shelter is more resilient to distant blasts.

### *3.2. Fragility curves: probability of failure*

The development of fragility curves played a central role in quantifying the probability of failure at different blast intensities. These curves provide a probabilistic measure of the shelter's ability to resist blast loads and serve as a key tool in assessing the overall resilience of the structure.

The fragility curves were generated by plotting the probability of failure against blast intensity, measured in terms of pressure. The curves revealed that the likelihood of failure increased significantly as the blast intensity approached the near-field scenario. For blasts occurring within close proximity to the shelter, the probability of failure exceeded 90%, indicating that the structure was highly vulnerable to near-field blasts. The high probability of failure in these cases is attributed to the overwhelming forces exerted on the structure, which surpassed the yield strength of the reinforced concrete and caused major cracking and potential collapse.

In the mid-field blast scenarios, the fragility curves indicated a moderate probability of failure, typically ranging from 30% to 60%, depending on the specific blast intensity and material properties of the shelter. The primary failure modes in these scenarios included cracking of the outer walls and minor structural damage that, while significant, did not lead to complete collapse. The shelter's reinforced concrete appeared to withstand most mid-field blast loads without catastrophic failure, suggesting that with some design modifications, the structure could be further fortified to resist these types of blasts.

In the far-field scenarios, the fragility curves showed a low probability of failure, typically below 10%, even at the highest blast intensities considered. This finding highlights the inherent strength of the underground shelter when subjected to distant blasts, with the surrounding soil effectively dissipating much of the blast energy before it reached the structure. The low likelihood of failure in far-field scenarios suggests that the current shelter design is sufficient for protecting against distant explosions, though improvements could be made to further decrease vulnerability in extreme cases.

### *3.3. Key trends and failure mechanisms*

The analysis of simulation data revealed several key trends regarding the shelter's performance under different blast conditions. One of the most significant findings was the role of soil-structure interaction in mitigating blast effects. In all scenarios, the soil played a critical role in absorbing and redistributing blast energy, particularly in the far-field and mid-field explosions. The denser the surrounding soil, the more effectively it dampened the blast wave, reducing the forces transmitted to the shelter. However, in near-field blasts, the rapid deformation of the soil adjacent to the shelter added to the overall load, exacerbating structural damage.

Another important observation was the distribution of stress within the shelter. The corners and edges of the shelter's walls consistently exhibited the highest stress concentrations, making them the most vulnerable to cracking and failure. This finding suggests that reinforcing these critical areas could significantly improve the structure's ability to withstand higher blast loads. Additionally, the shelter's roof was found to be more susceptible to damage than the walls, particularly in near-field scenarios, due to its exposure to both direct blast forces and the upward thrust of deformed soil.

The failure mechanisms observed in the simulations were primarily related to the yielding of the reinforced concrete and cracking, particularly in high-stress regions. In cases where the blast loads exceeded the yield strength of the concrete, the structure experienced irreversible damage, leading to partial or complete collapse in severe cases. The spalling of concrete, where surface layers of material broke away due to intense pressure, was also noted as a common failure mode, especially in mid-field and near-field scenarios. These findings underscore the importance of using high-strength materials and optimizing reinforcement placement in future shelter designs.

### *3.4. Influence of material properties*

The material properties of both the shelter and the surrounding soil had a profound impact on the overall structural performance. Simulations showed that shelters constructed with higher-grade concrete and reinforced with more resilient materials, such as steel with a higher yield strength, exhibited a lower probability of failure across all blast scenarios. In contrast, shelters built with lower-grade materials were more susceptible to cracking and collapse, particularly in the near-field and mid-field blast scenarios.

The type of soil surrounding the shelter also influenced the structural response. Dense soils, such as clay and compacted sand, were more effective at dampening blast waves than loose or saturated soils. In simulations where the shelter was surrounded by loose soil, the blast energy was transferred more directly to the structure, increasing the probability of failure. This suggests that, in addition to enhancing the shelter's material properties, improving the compaction and composition of the surrounding soil could further reduce the risk of failure during blast events.

### *3.5. Implications for shelter design*

The results of this study have important implications for the design of underground shelters intended to withstand blast loads. First, the findings highlight the need to reinforce critical areas of the shelter, such as the corners, edges, and roof, where stress concentrations are highest. By optimizing the placement of reinforcements and using higher-strength materials, shelters can be made more resilient to both near-field and mid-field blasts.

Second, the importance of soil-structure interaction in mitigating blast effects cannot be overstated. Designers should carefully consider the type and density of soil surrounding the shelter, as this plays a crucial role in dissipating blast energy. Where possible, steps should be taken to improve the quality of the surrounding soil, either by compacting it or replacing loose material with denser alternatives.

Finally, the fragility curves generated in this study provide a valuable tool for assessing the likelihood of shelter failure at different blast intensities. These curves can be used to guide future shelter designs, allowing engineers to target specific blast load thresholds and design shelters that meet these performance criteria.

### *3.6. Recommendations for future work*

While the results of this study provide a comprehensive understanding of the structural performance of underground shelters under blast loads, there are several areas where future research could build upon these findings. First, further simulations could explore the effects of varying blast shapes and durations, as these factors can significantly influence the structural response. Additionally, incorporating advanced materials, such as fiber-reinforced concrete or composites, could offer insights into how these materials perform under extreme loading conditions.

Another area of potential research is the role of internal structural components, such as support beams and columns, in enhancing the shelter's resilience. Investigating the performance of different reinforcement configurations could lead to more efficient and cost-effective shelter designs. Finally, experimental validation of the simulation results through physical blast tests would provide further confidence in the findings and help refine the fragility curves for practical applications.

## **4. Conclusions**

This study provides a comprehensive analysis of the structural performance of underground shelters subjected to blast loads, highlighting key findings and implications for future design practices. Through detailed simulations of different blast scenarios, it was observed that the proximity of the explosion significantly influences the shelter's structural integrity. Near-field blasts exert extreme pressures that can lead to substantial damage, while mid-field and far-field blasts present progressively reduced risks. The development of fragility curves has proven essential in quantifying the probability of failure and understanding the impact of varying blast intensities on shelter performance.

The results underscore the importance of reinforcing critical structural elements, such as walls and roofs, to mitigate damage from intense blast loads. Additionally, the study emphasizes the vital role of soil-structure interaction in enhancing the shelter's resilience. Dense surrounding soil effectively dissipates blast energy, thereby reducing the force transmitted to the shelter and improving overall performance.

Material properties also emerged as a crucial factor, with higher-grade concrete and more resilient reinforcements contributing to lower failure probabilities. The findings suggest that future designs should prioritize the use of high-strength materials and optimize soil conditions to maximize blast resistance.

## طراحی سازه زیرزمینی طبق منحنی‌های شکنندگی بر اساس انفجارهای دور و نزدیک

سیدمصطفی میرطبابی<sup>1\*</sup>، بهزاد محمدی میوه‌رود<sup>2</sup>

<sup>1</sup> استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه امام علی<sup>(ع)</sup>

<sup>2</sup> کارشناس ارشد مهندسی عمران ژئوتکنیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

دریافت: 1403/7/17، بازنگری: 1403/12/3، پذیرش: 1404/6/17، نشر آنلاین: 1404/6/17

### چکیده

این تحقیق به بررسی منحنی شکنندگی به‌عنوان ابزاری برای طراحی پناهگاه‌های زیرزمینی مقاوم در برابر انفجارهای دور و نزدیک می‌پردازد. منحنی شکنندگی روشی مؤثر برای شناسایی ویژگی‌ها و مقاومت سازه در برابر خطرات است و به‌دلیل آسیب‌پذیری نسبی سازه‌ها در برابر انفجار برای سازمان‌های مختلف حیاتی است. در این تحقیق، برای طراحی سازه و به‌دست‌آوردن منحنی شکنندگی سازه تحت انفجارهای دور و نزدیک، به‌ترتیب از نرم‌افزارهای ایتبس (ETABS) و نرم‌افزار المان محدود ABAQUS استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده براساس منحنی شکنندگی نشان می‌دهد که اگر انفجار در فاصله بیش از 12 متری از مرکز سازه رخ دهد، احتمال شکست سازه تقریباً 5% یا کمتر است. اما با نزدیک شدن محل انفجار به سازه، احتمال شکست به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که در صورت انفجار بر روی سطح خاک در فاصله 8 متری از مرکز سازه به حدود 60 درصد می‌رسد و سرانجام، در نقطه مرکزی سطح سازه، احتمال شکست بیش از 98% خواهد بود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اندرکنش خاک و سازه نقش کلیدی در کاهش آسیب‌های ناشی از انفجار سطحی خصوصاً در فواصل دورتر از 5 متر دارد. همچنین مشخص شد که مدل شکنندگی پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای ارزیابی آسیب‌پذیری سایر سازه‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد. مقایسه این مدل با تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که روش ارائه‌شده دقت بالاتری در تخمین احتمال خرابی دارد.

**کلیدواژه‌ها:** منحنی شکنندگی، سازه‌های زیرزمینی، مدل‌سازی اجزای محدود، انفجارهای دور و نزدیک، شکست سازه‌ای.

### 1- مقدمه

هستند که در زیر زمین ساخته شده‌اند. چالش‌های ساخت سازه‌های زیرزمینی باعث نوآوری در زمینه‌هایی مانند مهندسی عمران، معماری، زمین‌شناسی و طراحی روشنایی شده است. با افزایش مقیاس و پیچیدگی پروژه‌ها، طراحی، توسعه، بهره‌برداری و نگهداری تأسیسات زیرزمینی نیاز به رویکردی چندرشته‌ای دارد و مشکلات فنی منحصر به‌فردی را ارائه می‌دهد. با این حال، همان‌طور که منابع نشان می‌دهند، زمانی که ساخت‌وساز زیرزمینی به‌صورت مهندسی ساخته شود، می‌تواند نیازهای اجتماعی برای حمل‌ونقل، حفاظت و استفاده از منابع را برای نسل‌ها تأمین کند. طراحی و مقاوم‌سازی سازه‌های زیرزمینی برای ایجاد محیط‌های امن و انعطاف‌پذیر در هنگام بلایای طبیعی و تهدیدات خارجی بسیار مهم است.

در این تحقیق ایجاد منحنی‌های شکنندگی سازه زیرزمینی به‌منظور ارزیابی آسیب‌پذیری آن به‌طور جامع آورده شده است.

سازه‌های زیرزمینی برای تأمین سرپناه، حفاظت از منابع و تسهیل حمل‌ونقل در طول تاریخ بسیار مهم بوده‌اند. تأسیسات زیرزمینی از زمان‌های ماقبل تاریخ، سرپناه، انبار، حمل‌ونقل و حفاظت از آذوقه‌ها را فراهم کرده‌اند. سازه‌های زیرزمینی شامل تونل‌ها، معادن، غارها، پناهگاه‌ها، طاق‌ها، زیرزمین‌ها و ساخت‌وسازهای زیرزمینی مانند سیستم‌های مترو هستند. سنگرها و طاق‌های زیرزمینی نیز برای حفاظت از منابع و تضمین تداوم عملیات حیاتی در شرایط نامطلوب بسیار مهم بوده‌اند. تأسیسات زیرزمینی قابل اطمینان‌ترین سازه‌ها را برای محافظت از مردم، دارایی‌ها و زیرساخت‌های حیاتی در برابر حوادثی مانند زلزله، طوفان، سیل، انفجار و سایر بلایا فراهم می‌کنند. انبارهای ذخیره‌سازی برای نگهداری آرشیه‌های فیزیکی و دیجیتالی، مراکز فرماندهی و انبارهای تدارکات، نمونه‌هایی از تأسیسات کلیدی



نقش حیاتی رویکردهای میان رشته‌ای و شیوه‌های پایدار را در دستیابی به اهداف توسعه پایدار برجسته می‌کند.

Liu و همکاران (2021) تحلیل عمیقی از فضای زیرزمینی شهری (UUS)<sup>2</sup> و نقش آن در پایداری شهری ارائه دادند. این مقاله مزایای مختلف UUS از جمله پیشگیری از بلایا را که اغلب در تحلیل هزینه- فایده نادیده گرفته شده است را برجسته کرد. نویسندگان استدلال می‌کنند که فرآیند پیشگیری از بلایا و مزایای UUS را می‌توان از طریق دریچه شهری که بر توانایی شهرها برای مقاومت و بازیابی از شوک‌ها و تنش‌های ناشی از بلایای طبیعی یا اقدامات انسانی تأکید می‌کند، بهتر درک کرد.

Anas و همکاران (2022) تأثیر سیستم‌های سیاسی ضعیف در کشورهای در حال توسعه که منجر به محیط‌های جنگی می‌شود و نیاز به استفاده از مواد پیشرفته برای مقاومت در برابر شوک‌ها را بحث کردند.

Chernogor و همکاران (2018) ویژگی‌های سیگنال‌های مادون صوت تولید شده توسط انفجارهای متعدد در انبار مهمات را در طول یک فاجعه سازه‌ای ارزیابی کردند. Hu و همکاران (2018) از یک مدل سبب‌دی به نام D-LSM برای شبیه‌سازی انتشار و تضعیف موج انفجار در غارهای سنگی زیرزمینی موجود استفاده کردند.

Anas و همکاران (2022) بارهای دینامیکی ناشی از انفجارهای تصادفی و قابل توجه انسانی در سازه‌ها را بررسی کرده و چندین رابط تجربی موجود پیشنهاد شده توسط محققان مختلف را مقایسه کردند. مقاله نوشته شده توسط Alam و همکاران (2021) در مورد افزایش حساسیت سازه‌ها به تهدیدات مستقیم وابسته به بارهای انفجاری در نتیجه حملات تروریستی در سراسر جهان، صحبت می‌کند. بناهای بتن مسلح ممکن است در مقابل بارهای انفجار دچار فروپاشی خاص، سوراخ شدن (پانچینگ)، خردشدگی، دچار شکست موضعی نظیر خراشیدگی، شکست ارتعاشی، برشی - خمشی و شکست خمشی شوند. در این مقاله، صدمات در بررسی‌های آزمایشگاهی از سطوح بالای مقطع بتنی و حالات مختلف خرابی برای آن در معرض انفجار نزدیک با بمب، بررسی شده است.

در سال 2022، Han و همکاران (2022) با انجام آزمایش انفجاری روی روسازی باند هواپیما در مقابل یک واحد مهمات خوشه‌ای (CBU)<sup>3</sup>، توانایی حفاظتی بتن مسیر فرودگاه را بررسی کرده‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که طول و عمق گودال ناشی از انفجار به ترتیب 67/6 سانتی‌متر و 67 سانتی‌متر بوده و ارتفاع این گودال 12 سانتی‌متر است که باید با حذف و برداشت قطعه

منحنی‌های شکنندگی با استفاده از طراحی سازه در نرم‌افزارهای ETABS و Abaqus (ver.2022) با در نظر گرفتن ویژگی‌های خاص سازه زیرزمینی و موقعیت آن، به دست آمده است. این منحنی‌ها اندازه‌گیری کمی احتمال فراگذشت از سطوح مختلف آسیب تحت انفجار موشک و عملکرد سازه تحت سناریوهای مختلف انفجار دور و نزدیک از سازه را فراهم می‌کنند. ناگفته نماند که اندرکنش خاک و سازه به دلیل نقش اساسی در طراحی سازه‌های زیرزمینی در مدل‌سازی لحاظ شده است زیرا رفتار خاک می‌تواند به طور قابل توجهی بر پایداری و ایمنی سازه تأثیر بگذارد. خاک می‌تواند فشار جانبی و نیروهای بالابرنده را بر سازه وارد کند و باعث تغییر شکل یا شکست شود. بنابراین، درک جامع از رفتار آن با سازه برای توسعه منحنی شکنندگی برای یک سازه زیرزمینی ضروری است.

سازه‌ای که در این تحقیق در نظر گرفته شده، سازه زیرزمینی می‌باشد که در 5 متری سطح زمین قرار دارد. رفتار سازه تحت اثر نیروی انفجار خارجی مورد بررسی قرار گرفته است. نوآوری این پژوهش در ارائه منحنی‌های شکنندگی سازه‌های زیرزمینی تحت انفجارهای دور و نزدیک با استفاده از تحلیل دینامیکی نموی (IDA)<sup>1</sup> و شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار ABAQUS است. برخلاف مطالعات قبلی که عمدتاً به بررسی سازه‌های سطحی پرداخته‌اند، این پژوهش تأثیر اندرکنش خاک و سازه و شرایط مختلف انفجار را در محیط زیرزمینی تحلیل کرده است. این پژوهش، علاوه بر تحلیل عددی منحنی شکنندگی، به بررسی تأثیر اندرکنش خاک و سازه در کاهش آسیب‌پذیری ناشی از انفجار می‌پردازد. همچنین مدل پیشنهادی قابلیت تعمیم به انواع دیگر پناهگاه‌های زیرزمینی را دارد که در شرایط مختلف بارگذاری انفجاری قرار می‌گیرند.

## 2- مروری بر سازه‌های زیرزمینی و طراحی آن‌ها

Erdem و همکاران (2025) مروری بر وضعیت تاریخی و معاصر استفاده از فضای زیرزمینی را ارائه دادند و پتانسیل فضای زیرزمینی را برای ارائه راه‌حل‌های نوآورانه برای چالش‌های توسعه شهری برجسته کردند.

Goel و همکاران (2012) با تأکید بر رویکرد بین رشته‌ای و ملاحظات پایداری، راهنمایی‌های فنی در مورد برنامه‌ریزی، طراحی و ساخت زیرساخت‌های زیرزمینی ارائه دادند.

Philips و همکاران (2021) به تحلیل همگرایی فناوری‌های پایدار و بیان طراحی در معماری معاصر پرداختند.

Madryas و همکاران (2012) مجموعه‌ای از مطالعات موردی مرتبط با توسعه پایدار و مدیریت زیست‌محیطی را ارائه دادند که

بتنی به اندازه  $1/8$  در  $1/8$  متر و سپس فلزکاری و بازسازی طبقه - های بتنی خرد شده و نصب بتن سریع گیر جبران شود.

Peng و همکاران (2023) بر ضرورت انجام شبیه سازی های دقیق تر و گسترده تر به منظور تحلیل رفتار دینامیکی سازه های بتن مسلح تحت شرایط بارگذاری شدید، از جمله ضربه و انفجار، تأکید کردند. این پژوهشگران از طریق بررسی عددی تعاملات دینامیکی بین میلگرد و بتن، مدل رفتاری بتن و پارامترهای مرتبط با آن را با استفاده از فرمول های تجربی و داده های آزمایشگاهی مقایسه کرده اند. همچنین با نرم افزار LS-DYNA، صحت پارامترهای مورد استفاده را از طریق شبیه سازی آزمایش های کشش و کرنش مورد ارزیابی و تأیید قرار داده اند. در ادامه، نتایج شبیه سازی های انجام شده برای چهار سناریوی بارگذاری مختلف، شامل ضربه با سرعت پایین، ضربه با سرعت بالا، انفجار با مدت زمان کوتاه و انفجار با مدت زمان طولانی، بررسی و تحلیل شده است. یافته های این پژوهش می تواند به عنوان مرجعی معتبر برای تحلیل عددی و طراحی سازه های مقاوم در برابر بارهای ضربه ای و انفجاری مورد استفاده قرار گیرد.

Lai و همکاران (2020) مطالعه ای را برای بررسی تأثیر اندازه و محل منافذ دریچه و همچنین ضخامت و استحکام دیوارهای بتنی در برابر فشار انفجار داخلی یک انبار مهمات را انجام داد. این مطالعه با استفاده از نرم افزار ANSYS/LS-DYNA شبیه سازی شده است. نتایج نشان داد که این نرم افزار می تواند برای شبیه سازی انفجارهای داخلی استفاده شود و مقدار فشار مشابه با مشخصات UFC3-340-02 است. این مطالعه نشان داد که اندازه دهانه دریچه بر فشار تأثیر دارد و روش ارزیابی فعلی مشخصات UFC3-340-02 نزدیک به مقدار شبیه سازی رایانه ای است و آن را در طراحی قابل اجرا می کند. محل باز شدن دریچه نیز بر فشار تأثیر دارد و شبیه سازی کامپیوتری زمانی قابل اجرا است که نقطه انفجار فراتر از محدوده باز شدن دریچه باشد.

### 3- منحنی های شکنندگی و آسیب پذیری سازه ها

مطالعه Valoto (2015) بر تعیین آسیب پذیری لرزه ای ساختمان های خوشه ای در مرکز تاریخی تیمیشوارا با تحلیل داده های هندسی و ایجاد منحنی های شکنندگی متمرکز است. این مطالعه نتیجه می گیرد که روش پیشنهادی می تواند برای ترسیم منحنی شکنندگی سازه تحت یک ارزیابی کیفی و اولیه از آسیب پذیری بلوک بر اساس داده های نظرسنجی استفاده شود.

Andreotti و همکاران (2019) روشی را برای ساخت منحنی های شکنندگی برای تونل های کوهستانی تحت بارگذاری لرزه ای برای ارزیابی احتمال آسیب لرزه ای چندین تونل و بهینه سازی انتخاب تکیه گاه های تونل در فازهای پس از لرزه ای پیشنهاد می کنند.

Cosentini در سال (2019) هدف توسعه ابزارهای عملیاتی برای ارزیابی آسیب لرزه ای سازه های نگهدارنده زمین واقع در امتداد شبکه راه ها کشور ایتالیا می باشد که با انجام شبیه سازی های عددی پیشرفته و با استفاده از شتاب سنج های واقعی به عنوان ورودی لرزه ای و شناسایی اندازه گیری های شدت (IMS) بررسی کرده است. یافته های این مطالعه پیامدهای قابل توجهی برای مقاومت لرزه ای شبکه راه ایتالیا دارد. منحنی های شکنندگی آزمایشگاهی و تحلیلی برای پل ها و دیوارهای سازه ای بتن مسلح در مطالعات مختلف ارائه شده است.

Mohammadpour و همکاران (2001) مدل های تغییر شکل و ظرفیت دیوارهای سازه ای بتن مسلح را برای سطح آسیب ایمنی جانی با استفاده از روش پارامتر بی زی ارائه می کنند.

Palermo و همکاران (2003) به بررسی عملکرد سدهای بتنی وزین با استفاده از روش های شکنندگی و معرفی مدل سازی از نظر شکنندگی برای ارزیابی احتمال شکست ناشی از فشار هیدرولیکی بالا در این نوع سدها می پردازند.

Alinezhad و همکاران (2022) در پژوهشی به ارزیابی لرزه ای سازه های هسته ای پرداختند. آن ها با در نظر گرفتن مودهای مختلف خرابی، منحنی های شکنندگی لرزه ای را برای پوشش ایمنی راکتورهای هسته ای تحت فشار تعیین کردند.

Zhang و همکاران (2024) در مطالعه ای با عنوان ارزیابی شکنندگی تونل های کم عمق مدفون در برابر انفجار با استفاده از مدل اجزای محدود غیرخطی، رفتار دینامیکی تونل ها تحت بارگذاری انفجاری را شبیه سازی و بررسی کردند. نتایج نشان داد که تحلیل دقیق این رفتار می تواند به بهبود ایمنی زیرساخت های زیرزمینی کمک کند.

Pan و همکاران (2024) در پژوهش تحلیل شکنندگی سد قوسی بلند در برابر انفجار زیرآبی، اثر انفجار زیرآبی دوردست بر یک سد 300 متری را با در نظر گرفتن تأثیر درزهای انقباضی بررسی کردند. یافته ها نشان داد که این درزها نقش کلیدی در پاسخ دینامیکی سد به انفجار دارند و باید در طراحی ایمنی سدهای قوسی بلند مورد توجه قرار گیرند.

Hua و همکاران (2025) در تحقیق تحلیل شکنندگی تونل های جاده ای در برابر آتش سوزی، میزان آسیب پذیری تونل های جاده ای را با استفاده از منحنی های شکنندگی ارزیابی کرده و بر اساس آن، طبقه بندی خسارت و راهکارهایی برای بهبود ایمنی این سازه ها ارائه دادند.

این مطالعات، اهمیت منحنی های شکنندگی را به عنوان ابزاری مؤثر برای ارزیابی ریسک لرزه ای و توسعه استراتژی های پیشگیری برای زیرساخت های حیاتی را نشان می دهند. منحنی های شکنندگی ارزیابی سریعی از آسیب پذیری لرزه ای ارائه می کنند و می توانند برای بهینه سازی انتخاب تکیه گاه های تونل، بهبود

پایداری است که همه این عوامل در آیین نامه UFC رعایت شده اند و این تحقیق نیز سازه را طبق مفاد این آیین نامه فرض و طراحی کرده است. جهت تعیین ضریب اصلاح پاسخ رفتار سیستم (R) و ضریب تشدید تغییر مکان (Cd) و ضریب اصلاح اضافه مقاومت سیستم از آیین نامه یکسانی برای کلیه مدل ها استفاده شده است. یکی از آیین نامه های معتبری که ضرایب فوق را برای سیستم های دیوار برشی فولادی معرفی می کند، آیین نامه (حداقل بارهای طراحی ساختمان و دیگر سازه ها/ انجمن مهندسان سازه آمریکا)<sup>1</sup> می باشد، با کمک جدول (1) این آیین نامه مقادیر ذیل استخراج شده است.

جدول 1- مشخصات سازه های مدل سازی شده در ایتبس

| سیستم | طبقات | T     | دریافت مجاز | A | Cd  | R | ضریب زلزله |
|-------|-------|-------|-------------|---|-----|---|------------|
| بتنی  | 1     | 0/355 | 0/00474     | 3 | 2/5 | 3 | 0/385      |

#### 5-1- ابعاد تیرها و ستون ها

ابعاد تیرها و ستون ها به طور اقتصادی (سعی شد تا حد امکان نسبت های تقاضا به ظرفیت<sup>2</sup> نزدیک به 1 و تیپ بندی نیز جهت عملیات میدانی رعایت شده باشد). سازه در نرم افزار ایتبس طراحی شده است. در جداول (1) ابعاد ستون ها آورده شده است.

جدول 2- سطوح مقطع تیر و ستون در ایتبس

| نام مقطع | ابعاد (متر) | تعداد آرماتورها | قطر آرماتور |
|----------|-------------|-----------------|-------------|
| C50_1    | 0/5×0/5     | 20              | ∅ 16        |
| C50_2    | 0/5×0/6     | 16              | ∅ 18        |
| C60_1    | 0/6×0/6     | 16              | ∅ 20        |
| C60_2    | 0/6×0/6     | 18              | ∅ 18        |
| C60_3    | 0/6×0/6     | 18              | ∅ 20        |
| C60_4    | 0/6×0/6     | 20              | ∅ 18        |

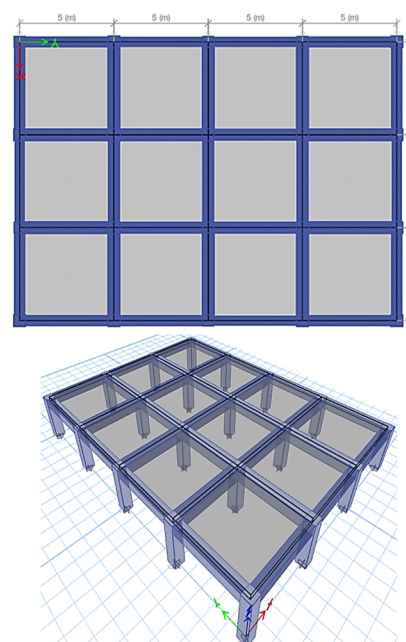
#### 5-2- شبیه سازی عددی

در این مقاله، روش شبیه سازی در نرم افزار ABAQUS بر اساس مقررات و استانداردها انجام یافته است (Goel و همکاران، 2012). اولین قدم در شبیه سازی سازه پناهگاه در نرم افزار آباکوس، ایجاد مدل هندسی سازه است که این شامل تعیین ابعاد و شکل سازه از جمله ارتفاع، عرض و طول سازه است. پس از تعریف خواص مواد مرحله بعدی تولید مش المان است که جزئیات سازه را به تصویر کشد. فرآیند تولید مش باید با دقت طراحی شود تا اطمینان حاصل شود که شبیه سازی به طور دقیق رفتار سازه را نشان می دهد اما نه آنقدر خوب که از نظر محاسباتی خیلی زمان بر شود.

طراحی سازه های نگهدارنده زمین و افزایش ایمنی سازه ها در طول رویدادهای لرزه ای مورد استفاده قرار گیرند.

#### 4- مشخصات سازه مدل سازی

سازه زیرزمینی مورد نظر ابتدا در نرم افزار ETABS طراحی شد. سازه در نظر گرفته شده، سازه ای با عرض 15 متر و طول 20 متر است. ارتفاع این سازه 3 متر است که فضای سر کافی را برای ساکنین فراهم می کند. در جهت X دارای سه دهانه و در جهت Y دارای 5 دهانه که ابعاد هر کدام 5 در 5 متر است. چیدمان پناهگاه در پلان شکل (1) ارائه شده است. این سازه، به خوبی برای ایجاد اسکان راحتی و امنیت کافی برای تعداد زیادی از افراد در مواقع اضطراری یا فاجعه به عنوان پناهگاه انسانی مناسب است. برای سهولت مدل سازی و صرفه جویی در زمان تحلیل ها، از مدل سازی راهروها، بازشوها و هواکش صرف نظر شده است.



شکل 1- پلان پناهگاه و نمای کلی از سازه در ایتبس

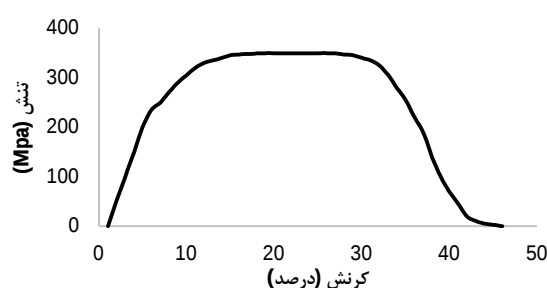
#### 5- مشخصات مقاطع در طراحی سازه

در طراحی سازه با استفاده از ETABS، مقاطع مستطیلی به دلیل تطبیق پذیری و سهولت ساخت، انتخاب شدند. انتخاب مقاطع مستطیلی به عوامل متعددی مانند بار مورد نیاز، طول دهانه، الزامات ساختاری، محدودیت های ساخت و ساز و هزینه بستگی دارد. این عوامل باید به دقت در نظر گرفته شوند تا اطمینان حاصل شود که سطح مقطع انتخاب شده برای کاربرد خاص مناسب است و قادر به ارائه سطح مورد نیاز از استحکام و

الاستیسیته (ضریب ارتجاعی) مصالح فولادی E مساوی  $2/1 \times 10^{10}$  کیلوگرم بر مترمربع یا  $2/05 \times 10^5$  نیوتن بر میلی‌متر مربع فرض می‌شود. ضریب پواسون مصالح فولادی برابر با 0/3 فرض می‌شود. مشخصات فولاد استفاده در تاندون‌ها در جدول زیر قابل مشاهده است. در شکل (4) نمودار تنش کرنش فولاد مدل‌سازی شده در این پژوهش نشان داده شده است.

جدول 4- مشخصات مصالح بتن

| ویژگی           | مقدار     |
|-----------------|-----------|
| مدول الاستیسیته | 26970 MPa |
| مقاومت فشاری    | 45 MPa    |
| مقاومت کششی     | 5/45 MPa  |
| ضریب پواسون     | 0/17      |



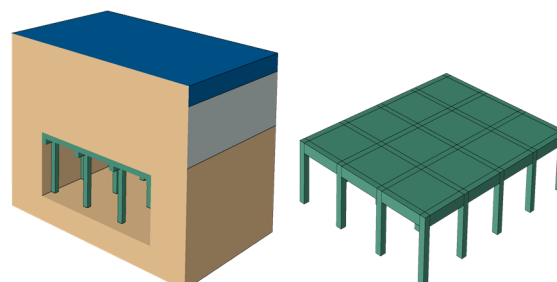
شکل 4- نمودار تنش - کرنش فولاد

## 5-5- مشخصات خاک

برای برآورد مشخصات خاک حفاری یک عدد گمانه ماشینی با عمق 15 متر در دستور کار قرار گرفت. براساس بررسی‌ها، تراز آب زیرزمینی در زمان حفاری و انجام مطالعات صحرایی تا عمق 15 متر از سطح زمین مشاهده نشد. البته برای اطمینان از عدم وجود سفره‌های آب معلق، توصیه می‌شود با بررسی و شناسایی‌های بیشتر و حتی حفر چاهک دستی تا عمق مورد نظر، نسبت به بررسی تکمیلی سطح آب زیرزمینی و رطوبت خاک اقدام شود. جهت شناسایی لایه‌های خاک و تعیین پارامترهای فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی خاک حین عملیات حفاری، از قشرهای مختلف خاک به فواصل سه متری نمونه‌گیری صورت گرفت. جهت حفظ رطوبت نمونه‌ها حین انتقال به آزمایشگاه، از کیسه‌های پلاستیکی استفاده شد. در جدول (5) مشخصات کلی گمانه ماشینی حفاری شده ارائه شده است.

جدول 5- مشخصات گمانه ماشینی

| ضخامت خاک دستی | تراز فوقانی | عمق (متر) | شماره گمانه |
|----------------|-------------|-----------|-------------|
| 1              | صفر         | 15        | BH1         |



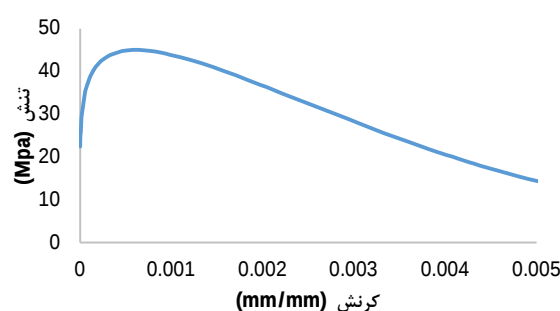
شکل 2- مدل‌سازی سازه، لایه خاک، مش‌بندی و شرایط مرزی

## 5-3- مصالح بتن مدل‌سازی شده در این پژوهش

رفتار بتن با استفاده از مدل شکل‌پذیری بتن آسیب دیده<sup>1</sup> (CDP) به‌کار رفته است که بر اساس تنش کششی پلاستیک دیده ایزوتروپیک همراه رفتار کششی برشی انعطاف‌پذیری ایزوتروپیک است. مقاومت فشاری بتن برابر با 45 کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع فرض می‌شود. تنش جاری شدن آرماتورهای طولی تقریباً برابر با  $F_y=4500$  کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع (فولاد نوع SD390). وزن واحد حجم بتن برابر با 2400 کیلوگرم بر مترمکعب فرض می‌شود. مدول الاستیسیته E بتن تقریباً  $2/8 \times 10^9$  کیلوگرم بر مترمربع فرض می‌شود. ضریب پواسون بتن برابر با 0/18 فرض می‌شود. مشخصات مصالح بتنی در جدول (3) خلاصه شده است و شکل (3) منحنی تنش - کرنش بتن در حالت فشاری و کششی را نشان می‌دهد.

جدول 3- مشخصات مصالح سازه مورد مطالعه

| مصالح | E (N/m <sup>2</sup> ) | $\rho$ (k/m <sup>3</sup> ) | $\nu$ | $f_c$ (N/m <sup>2</sup> ) |
|-------|-----------------------|----------------------------|-------|---------------------------|
| بتن   | $2/74 \times 10^{10}$ | 2400                       | 0/18  | $4/0 \times 10^7$         |



شکل 3- منحنی تنش - کرنش فشاری بتن در این تحقیق

## 5-4- مصالح فولاد تعریف شده در مدل‌سازی

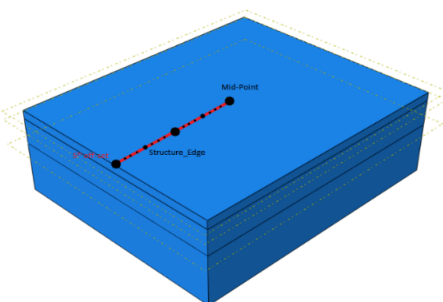
نوع فولاد مصرفی در المان صفحه فولادی از نوع A36 با تنش تسلیم  $F_y=2400$  کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و تنش نهایی برابر  $F_u=3600$  کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع فرض می‌شود. مدول



شکل 5- (الف) کروزر آمریکایی، (ب) کالیبر روسی

برای ترسیم منحنی شکنندگی، شعاع انفجار موشک از نقطه وسط مدل روی زمین تا 5 متر از لبه سازه روی زمین در نظر گرفته شده است. این شعاع انفجار برای شبیه سازی اثرات ضربه انفجاری بر سازه و خاک اطراف آن استفاده خواهد شد. در این مطالعه، برای مدل سازی بارگذاری انفجاری در نرم افزار ABAQUS از روش CONWEP استفاده شده است. CONWEP یک مدل تجربی مبتنی بر کد TM 5-855-1 ارتش ایالات متحده است که برای شبیه سازی اثرات موج انفجار در محیط های مختلف توسعه یافته است. این مدل بر اساس داده های آزمایشگاهی گسترده، انتشار موج انفجار را در محیط های همگن محاسبه کرده و فشار، سرعت، و جابه جایی ناشی از انفجار را بر روی سطوح سازه های اعمال می کند.

در ABAQUS، روش CONWEP در قالب یک بار سطحی وابسته به زمان (Incident Wave Interaction) پیاده سازی می شود. این روش با استفاده از معادلات تجربی، مشخصات موج انفجاری از جمله فشار بیشینه، مدت زمان بارگذاری و تغییرات آن در طول زمان را تعیین می کند. مزیت اصلی CONWEP، سادگی و سرعت بالای آن در شبیه سازی است اما در عین حال، این روش محدودیت هایی نیز دارد، از جمله فرض همگن بودن محیط و عدم در نظر گرفتن اثرات پیچیده ای مانند بازتاب موج انفجار در محیط های غیرهمگن یا تعامل آن با مایعات و جامدات چندفازی. با وجود این محدودیت ها، در بسیاری از مطالعات مهندسی، استفاده از CONWEP برای تحلیل اولیه پاسخ سازه ها به انفجار به دلیل دقت مناسب و کارایی محاسباتی، یک روش پذیرفته شده و رایج محسوب می شود. شکل (6) محل اصابت موشک (محل انفجار) شبیه سازی شده در مدل سازی را نشان می دهد.



شکل 6- نقاط محل اصابت موشک در مدل سازی

خاک منطقه مورد مطالعه عمدتاً از ماسه و صخره هایی با رطوبت متوسط، با تراکم نسبی بسیار متراکم به طور متوسط در اعماق مختلف تشکیل شده است. حداقل و حداکثر درصد رطوبت به ترتیب تقریباً 12 درصد و 17 درصد و ضریب نفوذپذیری بیش از یک میلی متر در ثانیه است. مدول الاستیسیته خاک به طور متوسط تا عمق تقریبی اثر بار پی حدود 400 کیلوگرم بر سانتی مترمربع تخمین زده می شود. نتایج آزمایش خاک منطقه مورد مطالعه طبق جدول (6) می باشد. از این نتایج می توان در محاسبه ظرفیت باربری پی های تک، نواری و عریض استفاده کرد. برای مدل رفتار خاک، از مدل رفتار الاستوپلاستیک در نرم افزار ABAQUS استفاده شده است. پارامترهای مورد استفاده برای تعریف اندرکنش خاک-سازه شامل سختی، ضریب اصطکاک و رفتار فشاری خاک استخراج شده اند.

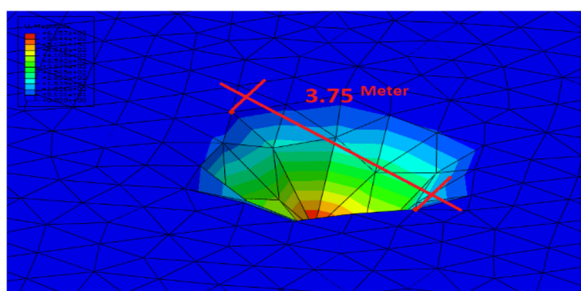
جدول 6- خلاصه نتایج آزمایش برش مستقیم

| نحوه انجام آزمایش | چسبندگی (Kg/CM <sup>2</sup> ) | زاویه اصطکاک داخلی | وضعیت خاک | عمق (متر) | نام گمانه       |
|-------------------|-------------------------------|--------------------|-----------|-----------|-----------------|
|                   |                               | 37                 | دارای     | 1         |                 |
|                   |                               | 34                 | رطوبت     | 4         | BH <sub>1</sub> |
|                   |                               | 39                 | طبیعی     | 7         |                 |
| تند               | 0/02                          |                    |           |           |                 |

## 6- بارگذاری انفجار موشک

AGM<sup>1</sup> مخفف «موشک هوا به زمین» است و برخی از نمونه های متداول AGM که توسط ارتش ایالات متحده استفاده می شود عبارتند از AGM-65 Maverick، AGM-114 Hellfire و در ارتش روسیه نیز پرکاربردترین موشک آن ها از نوع Kh-29 است. توجه به این نکته ضروری است که استفاده از موشک ها و تجهیزات نظامی به عوامل و شرایط مختلفی بستگی دارد که می تواند در طول زمان تغییر کند Cordesman و همکاران (2014) در این تحقیق از موشک کروزر Tomahawk به دلیل قدرت انفجار بالای آن استفاده شده است.

تاماهاک از نوع موشک های دوربرد است که قابلیت پرتاب و استفاده در همه شرایط آب و هوایی و جوی را دارد. موشک مدنظر معادل 540 کیلوگرم TNT است که برای مدل سازی انتخاب شده است. موشک روسی که بیشترین شباهت را به موشک کروزر آمریکایی تاماهاک دارد، موشک کروزر کالیبر است که در نسخه ضد کشتی آن M-543 و در نسخه حمله زمینی آن M-143 نیز شناخته می شود (Athas و همکاران، 2006).



شکل 9- شعاع تأثیر موج انفجار

## 7- ترسیم منحنی شکنندگی

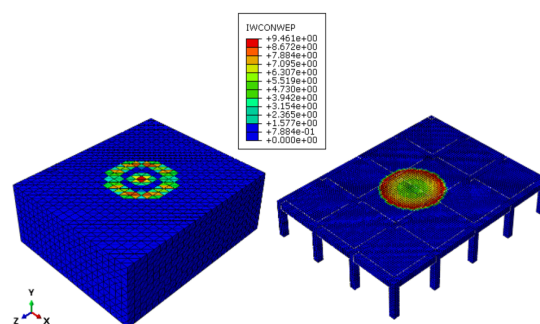
توابع شکنندگی توابع احتمالاتی هستند که احتمال آن که سازه آسیبی بزرگتر (یا کمتر) از یک سطح خاص را تجربه نماید را نشان می‌دهند. در این تحقیق منحنی شکنندگی به معنی احتمال رسیدن پاسخ سازه به سطح خرابی تعریف شده و یا تجاوز از آن حد، به ازای فواصل مختلف انفجار از مرکز سازه می‌باشد به منظور برآورد میزان آسیب‌های وارده منحنی‌های شکنندگی با استفاده از تعریف محل اصابت موشک در فواصل مختلف تعیین می‌شود. برای این منظور پارامترهای توزیع لاگنرمال سازه در فواصل مختلف انفجار به دست آمده و با استفاده از روابط در نرم‌افزار متلب منحنی‌های شکنندگی ترسیم می‌شوند، که می‌توان در یک نمودار با محور افقی معادل فاصله مشخصه از مرکز و محور قائم احتمال خرابی سازه است، نشان داد. برای انجام IDA، ابتدا مدل‌سازی عددی سازه در نرم‌افزار ABAQUS انجام شده و سازه تحت بارگذاری‌های افزایشی ناشی از انفجار قرار گرفته است. پارامترهای شدت (IM)<sup>1</sup> شامل بیشینه تنش ناشی از بار انفجار و مهندسی (EDP)<sup>2</sup> شامل تغییرمکان نسبی سازه و کرنش‌های پلاستیک در نقاط بحرانی اندازه‌گیری شده‌اند. در ادامه، منحنی‌های شکنندگی بر اساس توزیع لاگنرمال<sup>3</sup> به دست آمده و احتمال فراگذشت از حالات حدی مختلف محاسبه شده است. برای ترسیم منحنی‌های شکنندگی گام‌های زیر طی شده‌اند:

## 7-1 گام اول: استخراج بیشینه تنش سازه تحت اثر انفجار فاصله

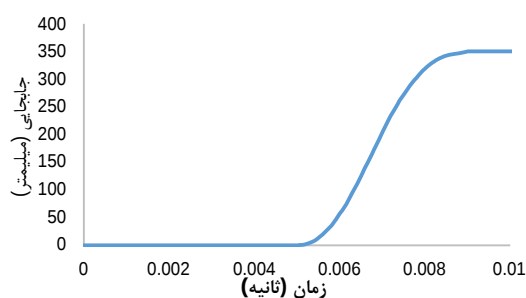
برای این کار، می‌بایست ابتدا فواصل را مشخص کنیم که در این تحقیق، 12/5 سانتی‌متر می‌باشد. یعنی برای ترسیم منحنی شکنندگی بر اساس فاصله، می‌بایست سازه مدل‌سازی شده تحت اصابت موشک در فواصل 12/5 سانتی‌متری از مرکز سازه بر روی سطح زمین تا لبه خاک مدل‌سازی شده (که 5 متر از لبه سازه

## 6-1 موج انفجار و جابه‌جایی خاک روی سازه

در شکل (7)، اثر موج انفجار بر روی خاک نشان داده شده است. موج به سمت سازه حرکت می‌کند که اثر موج بر روی سازه نیز نشان داده شده است. شکل (7) نمودار مقدار جابه‌جایی خاک روی سطح زمین را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار بیشینه خاکی که جابه‌جا شده است، 35 سانتی‌متر می‌باشد. این بدین معنی می‌باشد که انفجار موشک گودالی به عمق 35 سانتی‌متر جا گذاشته است.



شکل 7- اثر موج انفجار



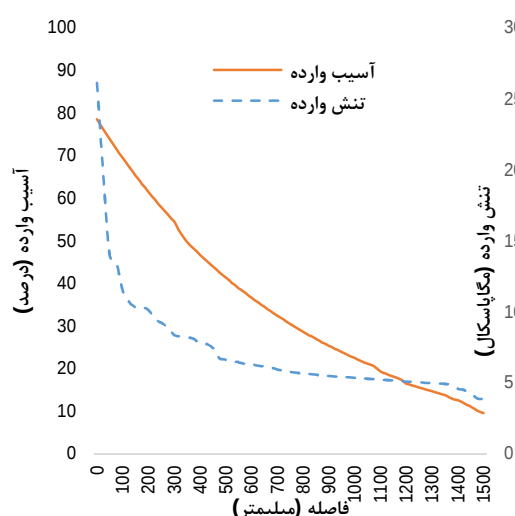
شکل 8- نمودار تغییرات و جابه‌جایی خاک روی سطح زمین

## 6-2 شعاع تأثیر موج انفجار

این پارامتر، شعاع ضربه موج انفجار، نشان‌دهنده فاصله‌ای است که اثرات موج انفجار بر خاک و در نتیجه بر سازه‌های زیرزمینی احساس می‌شود. به عبارت دیگر اگر شعاع تأثیر موج انفجار حدود دو متر باشد به این معناست که در صورت برخورد موج انفجار به سازه، آسیب‌های ناشی از آن تا فاصله دو متری از نقطه برخورد قابل توجه خواهد بود. این موضوع بر ایمنی و امنیت سازه‌های زیرزمینی در برابر حمله‌های موشکی تأثیر مستقیمی دارد؛ چرا که مهندسان باید در طراحی این سازه‌ها، میزان تحمل سازه در برابر ضربه موج انفجار را در نظر گرفته و اقدامات تقویتی لازم را اعمال کنند تا سازه حتی در مواجهه با انفجارها، از آسیب‌های جدی محافظت شود.

اگرچه این میزان خرابی را در خود نرم افزار تعریف کرده ایم تا در نتایج در اختیار ما قرار دهد.

طبق تحقیق Dog و همکاران (2016) میزان درصد از خرابی سازه بتنی که شامل سطوح حدی IO و LS می شود، حدود 45 درصد از خرابی مقطع بتنی می شود. چرا که در این حالت ترک های ایجاد شده سازه پناهگاه زیرزمینی را از عملکرد حفظ ایمنی جانی افراد ساکن داخل پناهگاه از دست می دهد و سازه غیر قابل استفاده می شود.



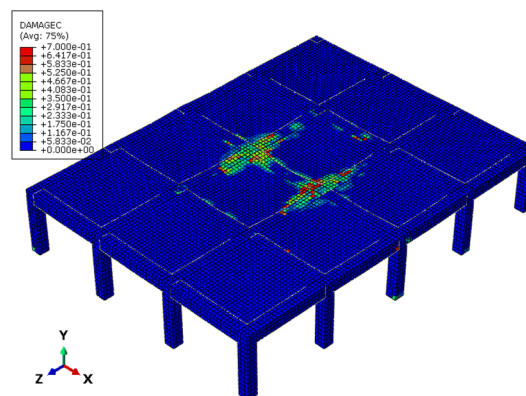
شکل 11- نمودار میانگین تنش وارده و آسیب وارد شده به سازه

شکل (11) نموداری است که میانگین تنش های وارده به سازه و آسیب های ناشی از بارگذاری دینامیکی را بر اساس نتایج تحلیل IDA نشان می دهد؛ در این تحلیل، ابتدا سازه تحت بارگذاری دینامیکی افزایشی انفجار قرار می گیرد و در هر مرحله تنش های وارد شده به بخش های مختلف سازه (مانند تیرها، ستون ها و سقف ها) و آسیب هایی مانند ترک ها و تغییر شکل ها ثبت می شوند، سپس میانگین این داده ها محاسبه و در نموداری با محور افقی نشان دهنده شدت بارگذاری و محور عمودی نشان دهنده میزان تنش یا آسیب وارده ترسیم می شود.

### 3-7 گام سوم: محاسبه پارامتر تابع توزیع تجمعی توزیع نرمال

همان طور که بیان شد برای رسم منحنی شکنندگی جابه جایی نسبی طبقات از توزیع نرمال استفاده شده است. براساس تئوری احتمالات، احتمال رخ ندادن یک واقعه برابر است با یک منهای احتمال رخداد آن. همچنین برای سادگی و تسریع در انجام

فاصله دارد) مورد تحلیل قرار گیرد. به همین دلیل می بایست 121 مدل از کل سیستم به طور جداگانه مورد بررسی قرار گیرد. سپس بعد از اتمام تمام مدل سازی ها، بیشینه تنش وارده به سازه استخراج شده است. در این مدل ها بایستی بحرانی ترین نقاط را طبق شکل (10) (که نشان دهنده بحرانی ترین نقاط سازه هست) و طبق منابع شامل نقاطی از سقف و تیرهای میانی هستند مورد بررسی قرار داده شده تا منحنی شکنندگی به دست آید.



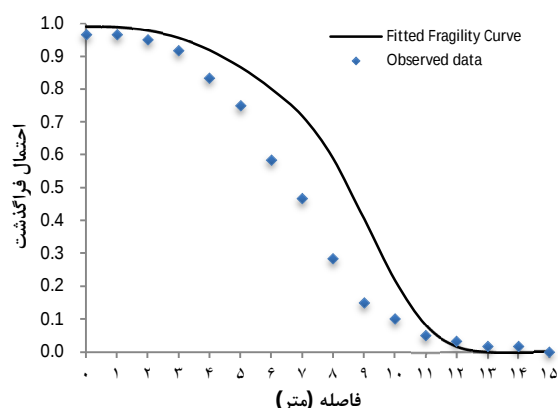
شکل 10- بحرانی ترین نقاط سازه (به رنگ قرمز)

### 2-7 گام دوم: انتخاب پارامتر AC (شرایط قابل قبول در حالات حدی)

برای ترسیم منحنی شکنندگی نیاز است شرایط قابل قبولی را که به دنبال احتمال تجاوز از آن هستیم را معرفی کنیم. با این تفسیر، سه حالت حدی مربوط به سطوح عملکرد بهره برداری بی وقفه (IO)<sup>1</sup>، تأمین ایمنی جانی (LS)<sup>2</sup> و آستانه فرو ریزش (CP)<sup>3</sup> به عنوان حالات حدی شرایط قابل قبول در نظر گرفته شده است. میزان آسیبی که در سازه بتنی با رسیدن به حالت حدی IO LS CP رخ می دهد می تواند به طور قابل توجهی متفاوت باشد. در برخی موارد، آسیب ممکن است حداقل و به راحتی قابل تعمیر باشد در حالی که در موارد دیگر آسیب ممکن است شدیدتر باشد و نیاز به تعمیرات قابل توجه یا حتی تعویض سازه داشته باشد.

$$AC = \begin{cases} 0.005 & IO \\ 0.015 & LS \\ 0.02 & CP \end{cases} \quad (1)$$

طبق ACI، برای سازه های بتن مسلح، حالت حدی IO LS CP معمولاً در سطح تنش 0/6 تا 0/7 برابر مقاومت فشاری بتن به دست می آید. برای بتن با تنش تسلیم 45 مگاپاسکال، این با محدوده تنش تقریباً 31/5-27 مگاپاسکال مطابقت دارد. در این تحقیق،



شکل 12- منحنی شکنندگی سازه پناهگاه زیرزمینی

همچنین، منحنی شکنندگی نشان‌دهنده منحنی شکنندگی برازش شده است که معمولاً با استفاده از یک تابع آماری یا احتمالی (در اینجا توزیع لاگنرمال) مدل‌سازی می‌شود تا روند کلی داده‌های مشاهده شده را نمایش دهد. در فواصل کم (1 تا 3 متر)، احتمال خرابی تقریباً 100 درصد (1/0) است که نشان می‌دهد در نزدیکی محل انفجار، ساختار تقریباً به‌طور حتمی دچار خرابی خواهد شد. با افزایش فاصله، احتمال خرابی به تدریج کاهش می‌یابد که این کاهش نشان‌دهنده تأثیر جذب انرژی توسط محیط اطراف و مقاومت سازه در برابر بارگذاری انفجاری است.

در بازه 5 تا 10 متر، افت قابل توجهی در احتمال خرابی مشاهده می‌شود. این بازه معمولاً به عنوان منطقه حد آستانه شناخته می‌شود، جایی که ساختار از یک ناحیه با ریسک خرابی بالا به یک ناحیه مقاوم‌تر منتقل می‌شود. این تغییر می‌تواند به دلیل کاهش شدت موج انفجار و اثرات کاهنده خاک و مصالح اطراف باشد. در فواصل بیشتر از 12 متر، احتمال خرابی تقریباً صفر است، به این معنا که در این فاصله، تأثیر انفجار به حداقل می‌رسد و سازه دچار خرابی قابل توجهی نمی‌شود. مقایسه داده‌های مشاهده شده (نقاط آبی) با منحنی شکنندگی برازش شده (منحنی شکنندگی) نشان می‌دهد که داده‌های واقعی عمدتاً از روند کلی منحنی تبعیت می‌کنند اما در برخی نقاط انحرافات به دلیل ناهنجاری‌های مدل‌سازی عددی، خواص مصالح یا شرایط آزمایشگاهی وجود دارد. منحنی برازش‌شده یک تقریب نرم از احتمال خرابی ارائه می‌دهد که برای تحلیل‌های پیش‌بینی و ارزیابی ریسک سازه‌ای مفید است. این منحنی شکنندگی می‌تواند برای تعیین فاصله ایمن از محل انفجار برای سازه‌های زیرزمینی استفاده شود. مهندسان می‌توانند از این داده‌ها برای بهبود طراحی‌های حفاظتی و مقاوم‌سازی اجزای بحرانی سازه در برابر بارهای انفجاری بهره ببرند. همچنین نتایج نشان‌دهنده اهمیت انتخاب مصالح مناسب و پیکربندی ساختاری کارآمد در کاهش اثرات انفجار است.

محاسبات می‌توان پارامتر توزیع تجمعی توزیع نرمال را محاسبه و با استفاده از جداول مربوطه مقدار توزیع تجمعی توزیع نرمال را استخراج کرد. بنابراین:

$$\sigma_{\perp N} = \sigma_y m_1^2 + \sigma_z n_1^2 + 2\tau_{yz} m_1 n_1 \quad (2)$$

$$P(D > d_{iIM}) = \phi\left(\frac{1}{\beta_i} \ln\left(\frac{IM}{IM_i}\right)\right) \quad (3)$$

حال کافیتست برای هر سطح عملکرد پارامتر  $\theta$  را حساب کنیم و سپس با استفاده از جدول تابع توزیع تجمعی، توزیع نرمال احتمال فراگذشت از رخداد مورد نظر را محاسبه کنیم.

#### 4-7- گام چهارم: محاسبه پارامتر تابع توزیع تجمعی توزیع لاگنرمال

برای رسم منحنی شکنندگی توسط توزیع لاگنرمال، می‌بایست تعداد مدل‌های دچار شکست شده را در هر فاصله تقسیم بر تعداد کل نمونه‌ها کرده و اعداد به‌دست آمده را به‌صورت جدول بر اساس افزایش فاصله مرتب کنیم و پارامترهای تابع تجمعی لاگنرمال را از طریق این اطلاعات به‌دست آورده. در این تحقیق، پارامترهای  $\theta$  و  $\beta$  بتای منحنی شکنندگی به‌صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$\ln \hat{\theta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n IM_i \quad (4)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \ln \left( \frac{IM}{\hat{\theta}} \right) \right)^2} \quad (5)$$

$$Likelihood = \prod \left( \frac{\ln \left( \frac{IM_i}{\hat{\theta}} \right)}{\beta} \right) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \theta &= 7/4584 \\ \beta &= 0/82 \end{aligned}$$

با به‌دست آوردن پارامترهای تابع تجمعی لاگنرمال ( $\theta$  لگاریتم میانگین داده‌ها و  $\beta$  لگاریتم انحراف معیار داده‌ها) می‌توان نقاط به‌دست آمده از تحلیل را به‌صورت یک منحنی شکنندگی برازش کرد و منحنی مناسب را نسبت به نقاط رسم نمود.

نمودار شکل (12) منحنی شکنندگی سازه پناهگاه زیرزمینی را نشان می‌دهد. برای رسم این منحنی، پارامترهای نامعلوم منحنی شکنندگی، میانه و انحراف معیار استاندارد لگاریتمی از تحلیل‌های عددی محاسبه شدند. محور افقی فاصله (بر حسب متر) از محل انفجار را نمایش می‌دهد در حالی که محور عمودی احتمال خرابی (یا تجاوز از حد تحمل سازه) را نشان می‌دهد. نقاط نشان داده شده با الماس‌های آبی بیانگر داده‌های مشاهده شده هستند که از شبیه‌سازی‌های عددی به‌دست آمده‌اند. این نقاط احتمال واقعی خرابی سازه را در فواصل مختلف نشان می‌دهند.

## 8- اعتبارسنجی

اعتبارسنجی در این مقاله با دو روش انجام گرفته است. اعتبارسنجی شبیه سازی را با استفاده از مقایسه تحلیل مودال انجام شده در ABAQUS با روش آگنولیو<sup>1</sup> و نرم افزار SAP2000 با روش LMS<sup>2</sup> انجام شده است. شبیه سازی با استفاده از روش اجزای محدود توسعه داده شد و نتایج نشان داد که بین دو تحلیل کمتر از 5 درصد اختلاف وجود دارد که نشان دهنده دقت مدل سازی است. نتایج در جدول (7) قابل مشاهده هستند.

جدول 7- فرکانس های سازه، برآورد شده

| روش / مطالعه                  | 1    | 2    | 3    | 4     | 5     |
|-------------------------------|------|------|------|-------|-------|
| FEM                           | 1/37 | 2/68 | 5/82 | 11/54 | 25/47 |
| LMS                           | 1/26 | 2/52 | 5/92 | 12/06 | 27/12 |
| مدل ریاضی                     | 1/32 | ND   | ND   | ND    | ND    |
| Constantinou و همکاران (1993) | 1/24 | ND   | ND   | ND    | ND    |
| Ramamoorthy و همکاران (2008)  | 1/64 | ND   | ND   | ND    | ND    |
| Setiawan و همکاران (2022)     | 2/02 | ND   | ND   | ND    | ND    |

همان طور که مشاهده می شود، مد اصلی در هر دو روش اختلافی کمتر از 5 درصد دارند. در صحت سنجی ثانویه، نتایج مدل سازی اعتبارسنجی شدند. برای این منظور، نتایج به دست آمده با مطالعات پیشین در این مورد پرداخته شده است که در این راستا از تغییر در پارامترهای میرایی رایلی خاک استفاده شده است.

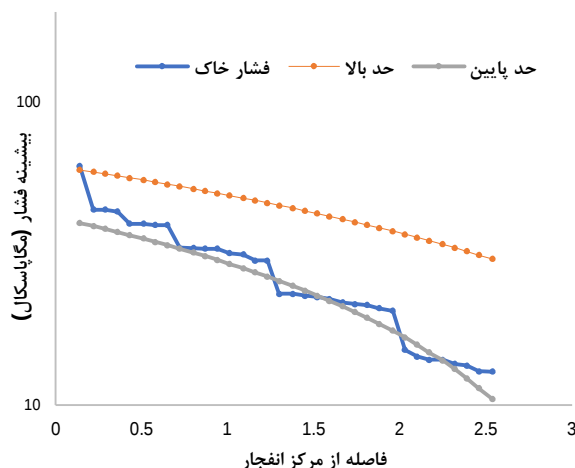
Nagy و همکاران (2010) بررسی تأثیر انفجار سطحی در سازه بتنی زیرزمینی پرداخته و رابطه (7) را برای بیشینه فشار در خاک به دست آوردند. با توجه به این که مشخصات خاک مورد استفاده در این مقاله مشابه خاک در مقاله Nagy و همکاران است، برای صحت سنجی مدل، می توان از نتایج پژوهش این مقاله نیز استفاده کرد.

$$PP = 1.03 \left( \frac{R}{M^{\frac{1}{3}}} \right)^{-2.4797} \quad (7)$$

که  $PP$  بیشینه فشار در خاک (برحسب مگاپاسکال)،  $R$  فاصله نقطه مورد نظر از مرکز انفجار (برحسب متر) و  $M$  جرم ماده منفجره (برحسب کیلوگرم) است. همچنین در پژوهش مذکور، رابطه (8) از آیین نامه ارتش آمریکا مبتنی بر آزمایش های انفجاری در محل استخراج شده است که از آن برای صحت سنجی در بخش حاضر نیز استفاده شده است (Cordesman, 2014).

$$PP = C \left( \frac{R}{M^{\frac{1}{3}}} \right)^{-n} \quad (8)$$

پارامترهای موجود در رابطه (8) مشابه رابطه (7) هستند و  $C$  و  $n$  نیز ضرایب ثابتی هستند و مقادیر آن ها برای حدود بالایی و پایینی رابطه مذکور محاسبه شده است. مقایسه نتایج حاضر از پژوهش با روابط ارائه شده در مطالعات پیشین، همگرایی خوبی نشان داده است (شکل (13)).



شکل 13- مقایسه نتایج مدل صحت سنجی شده با رابطه (2) (مقیاس لگاریتمی)

## 9- نتیجه کلی تحقیق

در این پژوهش، آسیب پذیری سازه های زیرزمینی در برابر انفجارهای دور و نزدیک با استفاده از تحلیل دینامیکی نمود مورد بررسی قرار گرفت. برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً بر رفتار سازه های سطحی یا تحلیل های استاتیکی متمرکز بوده اند، این تحقیق با بهره گیری از شبیه سازی عددی در نرم افزار ABAQUS به تحلیل دقیق اندرکنش خاک و سازه پرداخته است. این تحلیل ها امکان تخمین منحنی های شکنندگی را برای شرایط مختلف بارگذاری انفجاری به صورت بسیار دقیق تر فراهم می آورد.

## 9-1- خلاصه نتایج به دست آمده

نتایج نشان داد که احتمال خرابی سازه به شدت به فاصله انفجار از مرکز سازه وابسته است. منحنی های شکنندگی استخراج شده نشان دادند که در فاصله بیش از 12 متری، احتمال خرابی سازه کمتر از 5 درصد است اما با نزدیک شدن انفجار به 8 متری مرکز سازه، این احتمال به حدود 60 درصد افزایش می یابد. در فواصل کمتر از 4 متری از مرکز سازه، احتمال خرابی به بیش از 90 درصد می رسد.

بر پاسخ دینامیکی سازه، می‌تواند به بهبود دقت پیش‌بینی‌ها و افزایش کاربردپذیری این روش در پروژه‌های مهندسی واقعی منجر شود.

## 10- مراجع

- Alinezhad M, Saberi R, Zeinalzadeh H, "Determination of the seismic fragility curve of the containment in pressurized water reactors by considering different failure modes", *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2022, 9 (10), 196-211. <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.293405.248>
- Anas S, Alam M, "Comparison of existing empirical equations for blast peak positive overpressure from spherical free air and hemispherical surface bursts", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2022, 46 (2), 965-984. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00718-4>
- Anas S, Alam M, Umair M, editors, "Experimental and numerical investigations on performance of reinforced concrete slabs under explosive-induced air-blast loading", *A State of the Art Review Structures*, 2021, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.102>
- Andreotti G, Lai CG, "Use of fragility curves to assess the seismic vulnerability in the risk analysis of mountain tunnels", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 91, 103008. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103008>
- Athas I, "Battles highlight Sea Tigers' capabilities", *Jane's defence weekly*, 2006 (SEP.). <https://doi.org/10.123/ju.2006.0121>
- Constantinou M, Symans M, "Experimental study of seismic response of buildings with supplemental fluid dampers", *The Structural Design of Tall Buildings*, 1993, 2 (2), 93-132. <https://doi.org/10.1002/tal.4320020203>
- Chernogor L, Liashchuk O, Shevelev M, "Parameters of infrasonic signals generated in the atmosphere by multiple explosions at an ammunition depot", *Radio Physics and Radio Astronomy*, 2018, 23 (4), 280. <https://doi.org/10.3103/S0884591318030030>
- Cosentini R, Bozzoni F, Conca D, Lai C, "Developing fragility curves for earth-retaining walls along the Italian roadway network", *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions: CRC Press*, 2019, 1878-1886. <https://doi.org/10.325/s.8594.125>
- Cordesman A, Gold B, "The gulf military balance volume II", *The Missile and Nuclear Dimensions, Center for Strategic & International Studies*, 2014 (s 28). <https://doi.org/10.228/2014.23.9854>
- Dong W, Zhou X, Wu Z, Xu B, "Investigating crack initiation and propagation of concrete in restrained shrinkage circular/elliptical ring test", *Materials and Structures*, 2016, 50 (1), 73.
- Height, *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134, 4, 639650. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0942-1>
- Engineers ASOC, editor, "Minimum design loads and associated criteria for buildings and other

همچنین بررسی‌ها نشان داد که بحرانی‌ترین قسمت‌هایی که در طی اصابت موج انفجار تحت بیشترین تنش و کرنش قرار دارند، المان‌های تیر و سقف سازه پناهگاه زیرزمینی و محل اتصال تیر به دال هستند. نتایج IDA بیانگر آن است که در محدوده 8 تا 10 متری، کاهش شدید احتمال خرابی سازه مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از اندرکنش خاک و جذب بخشی از انرژی انفجار توسط آن باشد. علاوه بر این، بررسی مدل عددی نشان داد که نوع خاک تأثیر مستقیمی بر میزان جذب انرژی انفجار و کاهش اثرات مخرب آن بر سازه دارد.

## 9-2- دستاوردهای علمی و نوآوری پژوهش

این تحقیق چندین دستاورد علمی مهم دارد:

- ارائه منحنی شکنندگی به‌عنوان معیاری برای طراحی مقاوم‌سازی سازه‌های زیرزمینی که به مهندسان این امکان را می‌دهد تا حد آستانه تخریب را مشخص کرده و پناهگاه‌های زیرزمینی را بهینه‌سازی کنند.
- این پژوهش تحلیل اندرکنش خاک-سازه تحت بار انفجاری را مورد بررسی قرار داده است. نتایج نشان داد که نوع و مشخصات خاک، به‌ویژه چسبندگی و تراکم آن، تأثیر مستقیمی بر کاهش شدت خرابی سازه دارد.
- اعتبارسنجی مدل عددی با داده‌های تجربی و روابط تحلیلی، دقت بالای شبیه‌سازی‌ها را تأیید کرده است. مقایسه نتایج مدل عددی با روابط استخراج شده از مطالعات قبلی نشان داد که تطابق مناسبی بین آن‌ها وجود دارد.

## 9-3- کاربردهای عملی و پیشنهادها پژوهشی آینده

یافته‌های این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنای طراحی و مقاوم‌سازی پناهگاه‌های زیرزمینی نظامی و غیرنظامی مورد استفاده قرار گیرد. به‌طور خاص، منحنی‌های شکنندگی استخراج شده از این تحقیق می‌توانند به‌عنوان راهنمایی برای ارزیابی آسیب‌پذیری پناهگاه‌های موجود و طراحی بهینه پناهگاه‌های جدید به‌کار گرفته شوند.

پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، تأثیر پارامترهای هندسی سازه مانند ضخامت دیوارها، آرایش ستون‌ها و نوع مصالح به‌طور گسترده‌تر بررسی شود تا ارتباط بین این پارامترها و مقاومت سازه در برابر بارهای انفجاری مشخص گردد.

همچنین استفاده از مواد کامپوزیتی یا بتن‌های پیشرفته به‌عنوان جایگزین برای مصالح سنتی می‌تواند در افزایش مقاومت سازه در برابر انفجار مؤثر باشد. پیشنهاد می‌شود که تحقیقات آینده، رفتار این مصالح را تحت بارگذاری‌های مختلف مورد بررسی قرار دهند. علاوه بر این، توسعه مدل پیشنهادی برای سازه‌های زیرزمینی در اعماق مختلف و بررسی تأثیر شرایط لایه‌بندی خاک

- Regehr C, Carey M, Wagner S, Alden LE, Buys N, Phillips A, Corneil W, "Prevalence of PTSD, depression and anxiety disorders in correctional officers", *A Systematic Review Corrections*, 2021, 6 (3), 229-241.  
[https://doi.org/10.1080/23774657.2019.1641765?urlappend=%3Futm\\_source%3Dresearchgate.net%26utm\\_medium%3Darticle](https://doi.org/10.1080/23774657.2019.1641765?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle)
- Ramamoorthy S, Gardoni P, Bracci J, "Seismic fragility and confidence bounds for gravity load designed reinforced concrete frames of varying", *https://doi.org/10.1061/(asce)07339445(2008)134:4(639)*
- Setiawan B, "Natural frequency measurement of modest dwelling houses", *Aceh International Journal of Science and Technology*, 2022, 11 (3), 190-196.  
<https://doi.org/10.13170/aijst.11.3.28765>
- Valotto C, "Seismic vulnerability assessment of clustere buildings in the historical center of Timisoara", *Fragility Curves for in-Plane Local Mechanisms of Collapse*, 2015. <https://doi.org/10.1201/b21889-308>
- Zhang C, Zhang D, Huang D, Lei C, Zhang C, Huang H, "Fragility assessment of shallow buried tunnels under explosive hazards", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2024, 152, 105-120. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105909>
- structures", *American Society of Civil Engineers*, 2017. <https://doi.org/10.1617/s115270945>
- Erdem S, Solak T, "Underground space use analysis of the past and lessons for the future", *Two Volume Set: Proceedings of the International World Tunnel Congress and the 31st ITA General Assembly*, Istanbul, Turkey, 7-12 May 2005, CRC Press, 2005. <https://doi.org/10.161/2005.27094>
- Goel RK, Singh B, Zhao J, "Underground infrastructures", *Planning, Design, and Construction: Butterworth-Heinemann*, 2012. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-397168-5.00004-3>
- Hu X-D, Zhao G-F, Deng X-F, Hao Y-F, Fan L-F, Ma G-W, Zhao J, "Application of the four-dimensional lattice spring model for blasting wave propagation around the underground rock cavern", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 23 (4), 135-47. <https://doi.org/10.16/j.tust.2018.08.006>
- Han J, Kim S, Hwang I, "Numerical assessment and repair method of runway pavement damage due to cbu penetration and blast loading", *Applied Sciences*, 2022, 12 (6), 2888.  
<https://doi.org/10.3390/app12062888>
- Huo J, Wang M, Lu M, Zhou Z, Guo X, Yu L, "Damage classification and recommendations for highway operating tunnels under fire conditions based on fragility curves", *Structural Engineering International*, 1-13, 2025.  
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10168664.2025.2449962>
- Lai H-h, "Applicability of a design assessment and management for the current ammunition depots in Taiwan", *Applied Sciences*, 2020, 10 (3), 1041.  
<https://doi.org/10.3390/app10031041>
- Madryas C, Kolonko A, Nienartowicz B, Szot A, Press C, "Underground infrastructure of urban areas 2 underground infrastructure of urban areas 2", *CRC Press*, 2012, CRC Press.  
<https://doi.org/10.1201/9781003023135>
- Mansour M, Lee J-Y, Hsu TT, "Cyclic stress-strain curves of concrete and steel bars in membrane elements", *Journal of Structural Engineering*, 2001, 127 (12), 140-155.  
<https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2016.12.017>
- Nagy N, Mohamed M, Boot J, "Nonlinear numerical modelling for the effects of surface explosions on buried reinforced concrete structures", *Geomechanics and Engineering*, 2010, 2 (1), 1.  
<https://doi.org/10.12989/gae.2010.2.1.001>
- Peng Q, Wu H, Jia PC, Ma LL, Fang Q, "Numerical studies on rebar-concrete interactions of RC members under impact and explosion", *Structures*. 2023, 47, 63-80.  
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.11.063>
- Pan H, Wang G, Lu W, Qi Z, Chen M, Yan P, "Fragility analysis of high arch dam against far-field underwater blast", *Engineering Structures*, 2024, 316, 118-130.  
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118568>
- Palermo D, Vecchio FJ, "Compression field modeling of reinforced concrete subjected to reversed loading: formulation", *Structura Journal*, 2003, 100 (5), 616-625. <https://doi.org/10.14359/12803>