Passive Defence
Vol. 17, No.1, Spring 2026, Serial No. 65
ISSN: 2980-8030 , E-ISSN: 2008-6849

Modeling and Designing Physical Barriers for the Safety of Hazardous Material Storage Tanks with a Civil Defense Approach

Hamed Asghari[1], Mahdi Modiri[2*]

[1]Master's degree in crisis management, non-operating engineering and defense university complex, Malik Ashtar University of Technology, Tehran, Iran. Email Address: hasghari767@gmail.com

[2]Correspondence: Professor, Malik Ashtar University of Technology, Tehran, Iran. Email Address: mmodiri@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 12 December 2024

Received in revised form: 29 December 2024

Accepted: 23 February 2025

Available online: 20 May 2026

Keywords:

Shooting Attacks

Storage Tanks

Hazardous Materials

Modeling Physical Barriers

Industrial Security

ABSTRACT

Hazardous material storage and containment equipment in industries are constantly exposed to serious threats due to risks from intentional and malicious attacks. This necessitates serious attention and actions regarding safety and security in these facilities. This research focuses on the assessment and modeling of safety distances for pressurized storage equipment against shooting threats. In this context, threats from small arms were first identified, and various bullets were categorized based on their physical and mechanical characteristics. Subsequently, using bullet penetration models, the projectile's critical velocity and maximum stand-off distance were calculated. The results indicate that safe distances depend on the type of weapon and the characteristics of the target, with stand-off distances averaging less than 11 meters for handguns and varying up to 1135 meters for rifle projectiles. Additionally, a Monte Carlo analysis examined the impact of the shooter's offset angle on safety distances, revealing that this effect is particularly significant when shooting at small targets. These findings serve as a basis for designing protective barriers and security measures in hazardous material storage facilities. Ultimately, this research emphasizes the importance of employing civil defense approaches and training personnel to enhance the resilience and safety of these facilities.

Cite this article: H. Asghari and M. Modiri, "Modeling and Designing Physical Barriers for the Safety of Hazardous Material Storage Tanks with a Civil Defense Approach," Journal of Passive Defence, vol. 17, no. 1, pp. 1-18, 2026.
DOI: https://doi.org/10.47176/pd.2026.1496

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein University.

Introduction

In recent decades, the security of industrial equipment and facilities, particularly hazardous material storage tanks, has become a major concern in the chemical and process industries. These tanks, which are commonly used for storing flammable, toxic, or pressurized substances, can cause severe consequences for personnel, the environment, infrastructure, and even regional economies if damaged. In addition to operational hazards and industrial accidents, intentional threats such as sabotage and armed attacks have emerged as potential risk scenarios. Such threats may result in the release of hazardous substances, the escalation of secondary incidents, and significant economic and environmental losses. Therefore, increasing attention has been directed toward the physical protection of these facilities and the assessment of their vulnerability against different attack scenarios, making this subject an important issue in industrial safety and risk management.

Historically, early studies on structural resistance against projectiles and ballistic impacts mainly focused on high-resistance materials such as armored steels and special alloys. These investigations were largely conducted within military and defense-related fields with the objective of improving the penetration resistance and durability of structures. However, a considerable portion of industrial equipment, including conventional storage tanks, is constructed from materials with lower mechanical resistance, and their behavior under ballistic impact has received comparatively limited attention. In recent years, growing concerns regarding security threats and deliberate attacks on industrial infrastructures have led to the development of new research approaches. These approaches extend beyond the mechanical properties of materials and focus on vulnerability assessment, safe distance determination, protective barrier design, and the development of predictive damage models. Such studies are often conducted within the framework of passive defense principles and security risk management strategies.

Considering these challenges, the present study aims to examine and frame the issue of hazardous material storage tank vulnerability under shooting attack scenarios and to provide a coherent perspective on the factors influencing the extent of damage and possible mitigation measures. In this regard, the study reviews previous research and analyzes existing approaches related to penetration modeling, safety distances, and protective measures in order to enhance understanding of the risks associated with such threats. The findings of this study can contribute to the development of effective strategies for improving equipment safety, reducing the vulnerability of industrial facilities, and enhancing preparedness against security-related threats.

Results and Discussion

The results of the projectile penetration analysis indicate a direct relationship between the effective target thickness (TE) and the ballistic limit velocity required for perforation. As the target thickness increases, the projectile must possess a higher impact velocity to achieve penetration. The analysis of different projectile types showed that handgun projectiles such as FB2 and FB4 are only capable of penetrating targets with thicknesses below approximately 4.6 mm, and their penetration capability decreases significantly beyond this value. In contrast, rifle projectiles with higher kinetic energy, particularly FB7,

are capable of perforating surfaces with thicknesses up to approximately 19.5 mm. These findings demonstrate that weapon type and projectile ballistic characteristics play a critical role in penetration performance, and that rifle-based threats are considerably more severe than handgun threats.

The analysis of the maximum effective projectile stand-off distance (SOD0) also revealed substantial differences among weapon categories. According to the obtained data, for a target with an effective thickness of 3 mm, FB2 and FB4 projectiles are capable of penetration only up to distances of approximately 11 m and 134 m, respectively. In contrast, rifle projectiles exhibit significantly greater effective ranges; FB5, FB6, and FB7 projectiles can penetrate targets from maximum distances of approximately 542 m, 871 m, and 1412 m, respectively. Furthermore, for targets with an effective shell thickness of approximately 11.5 mm, the stand-off distance for the FB7 projectile was estimated at around 402 m. These results indicate that, under certain conditions, storage tanks and similar facilities may remain vulnerable to attacks originating from outside the physical boundaries of the facility.

By integrating the results related to ballistic limit velocity and maximum stand-off distance, a more comprehensive assessment of the vulnerability of different storage tank types was achieved. The findings showed that many atmospheric storage tanks possess an inherent level of resistance against handgun attacks due to their structural characteristics, whereas pressurized storage tanks, because of their thicker walls, provide greater protection against a wider range of weapons. Nevertheless, the analysis of stand-off distances demonstrated that, in some scenarios, these tanks may still be successfully targeted from considerable distances. Accordingly, reference stand-off distance values were calculated and summarized for different tank configurations to support the design of protective systems, determination of safety distances, and development of preventive security strategies.

Conclusion

The results of this study include the development of a modeling framework for evaluating projectile penetration and designing physical protective barriers for cylindrical atmospheric and pressurized steel storage tanks under shooting attack scenarios. Numerical findings indicate that the stand-off distances for small-arms projectiles vary significantly depending on projectile type, ranging from less than 11 m for handgun projectiles to approximately 682 m for soft-core rifle bullets (lead core with a steel penetrator), and up to about 1135 m for hard-core projectiles (steel core with a copper jacket). In addition, Monte Carlo analysis was used to evaluate the influence of the shooter’s initial offset angle, and the results showed that this parameter produces noticeable variations mainly when small targets are considered. The developed approach provides a useful framework for assessing the vulnerability of hazardous material storage tanks and for supporting the design of protective barriers within physical protection systems. The findings highlight the importance of incorporating passive defense strategies to reduce the risk of projectile attacks and improve the resilience of industrial facilities. Future research should focus on expanding experimental datasets, conducting field tests to validate the models, and developing more advanced simulation tools for analyzing different attack scenarios, which can further enhance protective system design and risk mitigation strategies in industrial environments.

پدافند غیرعامل

سال هفدهم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، (پیاپی ۶۵): صص ۱۸-۱

شاپای چاپی: ۶۹۴۹-۲۰۰۸ | شاپای الکترونیکی: ۸۰۳۰-۲۹۸۰

مدل‌سازی و طراحی موانع فیزیکی برای ایمنی مخازن ذخیره‌سازی مواد خطرناک با رویکرد پدافند غیرعامل

حامد اصغری[۱]، مهدی مدیری[۲*]

[۱] کارشناسی ارشد مدیریت بحران مجتمع دانشگاهی مهندسی و پدافند غیر عامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران. رایانامه: hasghari767@gmail.com

[۲] استاد دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران(نویسنده مسئول). رایانامه: mmodiri@ut.ac.ir

چکیده

تجهیزات ذخیره‌سازی و حاوی مواد خطرناک در صنایع به دلیل خطرات ناشی از حملات عمدی و خرابکارانه، همواره در معرض تهدیدات جدی قرار دارند. این امر ضرورت توجه و اقدامات جدی در زمینه ایمنی و امنیت را در این تأسیسات ایجاب می‌کند. این تحقیق به بررسی و مدل‌سازی فاصله‌های ایمنی تجهیزات ذخیره‌سازی تحت فشار در برابر تهدیدات تیراندازی می‌پردازد. در این راستا، ابتدا تهدیدات ناشی از سلاح‌های سبک، شناسایی و گلوله‌های مختلف بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن‌ها دسته‌بندی شدند. سپس، با استفاده از مدل‌های نفوذ گلوله، سرعت حد پرتابه و حداکثر فاصله ایستادگی محاسبه گردید. نتایج نشان می‌دهد که فاصله‌های ایمن به نوع سلاح و ویژگی‌های هدف وابسته است و برای پرتابه‌های تفنگ دستی، فاصله‌های ایستادگی به‌طور میانگین کمتر از ۱۱ متر و برای پرتابه‌های تفنگی تا ۱۱۳۵ متر متغیر است. همچنین، تحلیل مونت کارلو تأثیر زاویه افست تیرانداز را بر فاصله‌های ایمنی مورد بررسی قرار داد و نشان داد که این تأثیر به‌ویژه در تیراندازی به اهداف کوچک قابل توجه است. این یافته‌ها به‌عنوان مبنایی برای طراحی موانع حفاظتی و تدابیر امنیتی در تأسیسات ذخیره‌سازی مواد خطرناک به کار می‌روند. در نهایت، این تحقیق بر اهمیت به‌کارگیری رویکردهای پدافند غیرعامل و آموزش کارکنان در افزایش تاب‌آوری و ایمنی تأسیسات تأکید می‌کند.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۲

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۰۹

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۵

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۲/۳۰

کلیدواژه‌ها:

حملات خرابکارانه

مخازن ذخیره‌سازی

مواد خطرناک

مدل‌سازی موانع فیزیکی

امنیت صنعتی

استناد: اصغری، حامد، مدیری، مهدی، " مدل‌سازی و طراحی موانع فیزیکی برای ایمنی مخازن ذخیره‌سازی مواد خطرناک با رویکرد پدافند غیرعامل"، نشریه پدافند غیرعامل، دوره ۱۷، شماره۱، صفحات ۱۸-۱، ۱۴۰۵. DOI: https://doi.org/10.47176/pd.2026.1496

© نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.

OPEN ACCESS

ناشر: دانشگاه جام امام حسین(ع).

۱- مقدمه

تجهیزات تحت فشار که مواد خطرناک (مانند مواد قابل احتراق و سمی) را ذخیره می‌کنند، ممکن است هدف حملات عمدی و خرابکارانه قرار گیرند [۱] که هدف آن‌ها آزاد شدن مواد خطرناک، اتلاف انرژی و افزایش آسیب‌پذیری است و این موضوع می‌تواند پیامد جدی برای کارگران، جمعیت، دارایی‌ها، محیط زیست و اعتبار شرکت/سازمان به همراه داشته باشد. شواهد قبلی نشان می‌دهد که ابزارهای ساده‌ای مانند دستگاه‌های آتش‌زا و انفجاری و همچنین تیراندازی با سلاح‌های سبک (مانند کلت و تفنگ) و سلاح‌های سنگین (مانند موشک‌ها) در حملات عمدی به تأسیسات شیمیایی و فرآیندی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲]. اگرچه قوانین مربوط به امنیت تأسیسات ذخیره‌سازی و پردازش مواد خطرناک در سراسر جهان متفاوت است، اما خطرات ناشی از حملات عمدی معمولاً با استفاده از روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری امنیتی[1] (SVA) یا ارزیابی ریسک امنیتی[2] (SRA) بررسی می‌شود تا کفایت تدابیر امنیتی موجود و سطح واقعی ریسک امنیتی یک تأسیسات تعیین گردد. این روش‌ها شامل رویکردهای کیفی یا نیمه‌کمی (مانند روش CCPS[3]، VAM-CF[4] و غیره) و همچنین رویکردهای کمی، مانند شبکه‌های بیزی ایستا و پویا و نظریه بازی‌ها، متغیر است. حملات تیراندازی به عنوان یکی از حالت‌های ممکن حمله در نظر گرفته می‌شود و می‌تواند توسط دشمنان با استفاده از روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری و مخاطرات امنیتی ذکر شده انجام شود، زیرا این حملات حتی از فواصل طولانی نیز می‌توانند به تجهیزات صنعتی و مخازن ذخیره آسیب برسانند [۳-۵]. در این راستا، پیاده‌سازی تدابیر امنیتی مناسب، از جمله طراحی ساختاری ضد گلوله و تعیین فاصله‌های ایمنی، می‌تواند به کاهش ریسک‌های حملات تهدیدآمیز و افزایش تاب‌آوری تأسیسات کمک کند. همچنین، ایجاد فرهنگ آمادگی و آموزش کارکنان در مواجهه با حالات اضطراری به‌ویژه در زمان وقوع حملات، از اصول پدافند غیرعامل به شمار می‌آید که به تقویت امنیت سازمان‌ها و محافظت از زیرساخت‌های حیاتی کمک می‌کند. به‌طور کلی، این رویکردها نه تنها به محافظت فیزیکی از تأسیسات کمک می‌کنند، بلکه موجب افزایش اعتماد عمومی به ایمنی و اعتبار شرکت‌ها و سازمان‌ها نیز خواهند شد.

در دنیای صنعتی امروز، امنیت تجهیزات و تأسیسات ذخیره‌سازی مواد خطرناک به یک چالش جدی تبدیل شده است [۶]. با افزایش تهدیدات ناشی از حملات عمدی، ضرورت ایجاد تدابیر حفاظتی مؤثر و جامع به شدت احساس می‌شود. این تدابیر باید شامل ارزیابی دقیق نقاط ضعف و آسیب‌پذیری‌ها باشد تا از تجهیزات حیاتی و محیط‌های صنعتی در برابر خطرات احتمالی محافظت شود. همچنین، به‌کارگیری فناوری‌های نوین و روش‌های پیشرفته تحلیل داده می‌تواند به شناسایی و پیش‌بینی تهدیدات کمک کرده و امنیت کلی مقرها را بهبود بخشد. در این راستا، آموزش و آگاهی‌بخشی به کارکنان از اهمیت بالایی برخوردار است تا در صورت بروز حادثه، واکنش‌های سریع و مؤثری انجام و از عواقب ناگوار جلوگیری شود. تهدیدات امنیتی و خطرات مربوط به ذخیره‌سازی مواد خطرناک می‌توانند به تبعات جدی و غیرقابل جبرانی منجر شوند، بنابراین صنایع باید به‌طور مستمر و سیستماتیک به ارزیابی و بهبود امنیت خود بپردازند [۷]. طراحی ساختارهای ایمنی مانند دیوارهای حفاظتی و موانع فیزیکی، در کنار استفاده از فناوری‌های پیشرفته مانند سامانه های نظارتی و هشداردهنده، می‌توانند به کاهش خطرات و جلوگیری از حملات بالقوه کمک کند [۸ و ۹]. سازمان‌ها باید روی ایجاد یک رویکرد جامع برای امنیت تمرکز کنند که شامل امنیت فیزیکی، سایبری و آموزشی باشد. برگزاری دوره‌های آموزشی منظم و کارگاه‌های شبیه‌سازی بحران به کارکنان کمک خواهد کرد تا مهارت‌های لازم برای مواجهه با شرایط غیرمنتظره را کسب کنند و توانایی تجزیه و تحلیل سناریوهای تهدید را افزایش دهند. در نتیجه، سرمایه‌گذاری در تحقیقات نوآورانه و استفاده از فناوری‌های پیشرفته می‌تواند بهبود مستمر در راهبردهای امنیتی را به همراه داشته باشد [۱۰-۱۲]. این رویکردهای جامع به تقویت ایمنی تأسیسات صنعتی کمک کرده و سطح آسیب‌پذیری آن‌ها را در برابر تهدیدات کاهش می‌دهد، همچنین بهینه‌سازی محیط‌های کار و افزایش اعتبار سازمان‌ها نیز از دیگر نتایج مثبت این اقدامات خواهد بود.

این رویکرد جامع نه‌تنها به پیشگیری از حملات کمک می‌کند، بلکه به بهبود پاسخگویی نیز می‌انجامد [۱۳]. به‌عنوان مثال، استفاده از نرم‌افزارهای پیشرفته برای تجزیه و تحلیل داده‌ها و شناسایی الگوهای غیرعادی می‌تواند نشانه‌های تهدید را

[1] Security Vulnerability Assessment
[2] Security Risk Assessment
[3] Center for Chemical Process Safety
[4] Vulnerability Assessment Methodology-Consequence Framework

قبل از وقوع شناسایی کند [۱۴]. این ابزارها می‌توانند به‌عنوان سپری برای زیرساخت‌های حیاتی عمل کرده و از وقوع بحران‌ها جلوگیری نمایند. همچنین، ارتباط مستمر و مستند بین تیم‌های امنیتی و عملیاتی درون سازمان، به هماهنگی بهتر در زمان بروز حوادث کمک خواهد کرد [۱۵]. در نهایت، تعهد به فرهنگ امنیتی از بالا به پایین در سازمان‌ها، باعث می‌شود تا امنیت به یک اولویت استراتژیک تبدیل شود و تمام کارکنان، از مدیران ارشد تا کارمندان، در این فرآیند مشارکت داشته باشند [۱۶]. این رویکرد نه‌تنها به افزایش ایمنی و کاهش خطرات می‌انجامد، بلکه موجب افزایش اعتماد مشتریان و ذینفعان به توانمندی‌های سازمان خواهد شد و در نتیجه، قابلیت‌های پدافند غیرعامل و تاب‌آوری سازمان را نیز تقویت می‌کند.

با توجه به افزایش تهدیدات امنیتی، به‌ویژه حملات تیراندازی به تأسیسات صنعتی، ضرورت ارزیابی آسیب‌پذیری مخازن ذخیره‌سازی اتمسفری و تحت فشار که مواد خطرناک را نگهداری می‌کنند، به وضوح احساس می‌شود [۱۷]. این مخازن ممکن است هدف تیراندازی قرار گیرند که عواقب جدی برای ایمنی کارکنان، محیط زیست و اقتصاد به همراه دارد. بنابراین، تحقیق و توسعه مدل‌های معتبر برای پیش‌بینی دقیق‌تر آسیب‌های احتمالی ناشی از برخورد پروژه‌های سلاح‌های سبک ضروری است. به‌علاوه، تعیین فاصله‌های ایمنی مناسب و طراحی پروتکل‌های پاسخ به وضعیت اضطراری می‌تواند نقشی حیاتی در کاهش اثرات این حملات ایفا کند [۱۸]. این رویکرد با تأکید بر اصول پدافند غیرعامل، نه تنها به بهبود ایمنی تجهیزات کمک می‌کند، بلکه آمادگی کارمندان را نیز در مواقع بحرانی افزایش می‌دهد و بدین‌ترتیب، سطح آسیب‌پذیری تأسیسات از تهدیدات امنیتی را کاهش می‌دهد. به کارگیری طرح‌های حفاظتی، از مقیاس فنی تا ساختاری، به کاهش تأثیرات منفی ناشی از این نوع تهدیدات کمک می‌کند و در نهایت به ارتقاء تاب‌آوری کلی سازمان در برابر حوادث و بحران‌ها منجر خواهد شد.

مسئله آسیب‌پذیری مخازن ذخیره‌سازی مواد خطرناک در برابر حملات تیراندازی به یکی از چالش‌های جدی صنایع شیمیایی و فرآیندی تبدیل شده است [۱۹]. مطالعات کنونی عمدتاً بر روی آسیب‌های ناشی از برخورد پروژه‌هایی با ویژگی‌های خاص مانند فولاد زرهی تمرکز داشته‌اند، در حالی که مصالح ساختمانی مرتبه پایین‌تر که در ساخت مخازن ذخیره‌سازی استفاده می‌شوند، به طور کافی مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. این شکاف در دانش علمی و عملی، منجر به عدم وجود مدل‌های معتبر برای پیش‌بینی آسیب‌های ناشی از سلاح‌های سبک می‌شود و اتخاذ تدابیر مؤثر برای حفاظت از این تأسیسات را پیچیده‌تر می‌سازد. علاوه بر این، تعیین فاصله‌های ایمنی مناسب و تحلیل اثر زاویه تیراندازی بر این فاصله‌ها به منظور طراحی موانع فیزیکی و تدابیر حفاظتی، یک چالش کلیدی در این حوزه است. در راستای پدافند غیرعامل، این فرآیندها می‌توانند به شناسایی نقاط ضعف و تقویت سامانه‌های حفاظتی کمک کنند. تا زمانی که برنامه‌های آمادگی و پاسخ به وضعیت اضطراری به طور جامع توسعه نیافته و کارکنان در برابر حملات آموزش نبینند، ریسک‌های ناشی از تیراندازی به مخازن همواره وجود خواهد داشت. بنابراین، نیاز به یک رویکرد جامع برای ارزیابی و بهبود امنیت این تأسیسات حس می‌شود تا با ارائه راهبردهای علمی و عملی، سطح آسیب‌پذیری آن‌ها کاهش یافته و آمادگی در برابر تهدیدات افزایش یابد. این رویکرد باید شامل طراحی موانع مؤثر، به کارگیری فناوری‌های نوین برای شناسایی تهدیدات و همچنین ترویج فرهنگی ایمنی و آمادگی در میان کارکنان باشد. با این اقدامات، می‌توان به بهبود کلی امنیت صنعتی و حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی کمک کرد.

۲- مرور ادبیات و پیشینه تحقیق

۲-۱- تقویت ایمنی مخازن ذخیره‌سازی با رویکرد پدافند غیرعامل

با وجود پیشرفت‌های قابل توجهی که در حوزه مطالعات آسیب‌پذیری تجهیزات صنعتی و بررسی مصالح اولیه مانند فولاد زرهی و آلیاژهای خاص صورت گرفته است، بررسی آسیب‌پذیری مخازن ذخیره‌سازی سنتی به طور شگفت‌انگیزی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. تحقیقات عمدتاً بر جنبه‌های فیزیکی و مکانیکی مواد متمرکز شده‌اند و نتایج این تحقیقات نیز به نحو چشمگیری در ارتقاء مقاومت این مصالح تأثیرگذار بوده است. اما فقدان مطالعات جامع و سیستماتیک در زمینه ارزیابی آسیب‌پذیری مخازن می‌تواند به بروز خطرهای جدی در صنعت منجر شود. این کمبود در تحقیق و بررسی می‌تواند باعث ضعف در درک آسیب‌پذیری تأسیسات نسبت به تهدیدات مختلف، از جمله حملات عمدی، شود. بنابراین، ضروری است که پژوهشگران و متخصصان با رویکرد پدافند غیرعامل، به شناسایی دقیق

آسیب‌پذیری‌های مخازن ذخیره‌سازی پرداخته و روش‌های مؤثرتری را برای بهبود ایمنی آن‌ها بیابند. این نیاز به تحقیق بیشتر نه تنها به افزایش ایمنی تجهیزات کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به بهینه‌سازی طراحی و انتخاب مواد مناسب برای این نوع ساختارها نیز بیانجامد [۲۰]. با توجه به چالش‌های ناشی از حملات احتمالی، پیشنهاد می‌شود که از مواد جدید و مقاوم در برابر آسیب، که قابلیت تحمل فشار و ضربه را دارند، در طراحی مخازن استفاده شود. همچنین، به‌کارگیری فناوری‌های مدرن مانند حسگرها و سامانه‌های نظارتی در کنار نظارت مستمر بر وضعیت مخازن، می‌تواند مانع بروز حوادث ناگوار شود و در نتیجه امنیت و ایمنی این تأسیسات را بهبود بخشد. در نهایت، اتخاذ رویکردهای جامع در مدیریت ایمنی تجهیزات و تأسیسات، به کاهش آسیب‌پذیری و ارتقای تاب‌آوری صنایع کمک خواهد کرد.

۲-۲- آسیب‌های غیرمستقیم و پدافند غیرعامل

برخی از مطالعات به بررسی عواقب ناشی از خرابی تجهیزات در پی وقوع حوادث زنجیره‌ای پرداخته‌اند که به تحلیل آسیب‌های غیرمستقیم و اثرات ثانویه این رویدادها می‌پردازند. این تحقیقات عمدتاً به اجزای مختلفی اشاره دارند که تحت تأثیر حوادث دیگر قرار گرفته و دچار آسیب می‌شوند. در رویکرد پدافند غیرعامل، شناسایی و تحلیل این آسیب‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا می‌تواند به کاهش آسیب‌پذیری و افزایش تاب‌آوری زیرساخت‌ها کمک کند. با این حال، به دلیل تفاوت‌های بارز در ابعاد، وزن و سرعت این اجزا در مقایسه با سلاح‌های سبک، این تحقیقات قادر نیستند به طور جامع بر نیازهای امنیتی مربوط به حفاظت از مخازن ذخیره‌سازی تمرکز کنند. این شکاف در تحقیقات می‌تواند منجر به نادیده گرفتن مهم‌ترین الزامات حفاظتی شود و ضرورت انجام مطالعات تخصصی و هدفمند در این زمینه را بیشتر نمایان می‌کند [۲۱ و ۲۲].

۲-۳- مدل‌سازی سوراخ‌شدگی در پدافند غیرعامل

مدل‌سازی فرآیند سوراخ‌شدگی در پروژه‌ها به عنوان یکی از حوزه‌های حیاتی در پدافند غیرعامل مطرح می‌شود. تحقیقات اخیر در این زمینه موفق به شناسایی و اعتبارسنجی معتبرترین مدل‌ها برای شبیه‌سازی سوراخ‌شدگی در اشیای دارای هسته نرم و سخت شده‌اند. این مدل‌ها می‌توانند به عنوان ابزارهای کلیدی در پیش‌بینی نوع و شدت آسیب‌هایی که در اثر برخورد سلاح‌های سبک به مخازن ذخیره‌سازی ایجاد می‌شود، عمل کنند. با این حال، برای به کارگیری مؤثر این مدل‌ها در صنعت شیمیایی، نیاز به پژوهش‌های عمیق‌تر و دقیق‌تر همچنان احساس می‌شود. تلاش برای تطبیق این مدل‌ها با ویژگی‌های خاص و نیازهای صنایع شیمیایی می‌تواند به ارتقای ایمنی و کاهش خطرات ناشی از حوادث مرتبط با تجهیزات کمک کند [۲۳]. این رویکرد نه تنها به بهبود تاب‌آوری زیرساخت‌ها کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به کاهش آسیب‌پذیری در برابر تهدیدات ناشی از سلاح‌های سبک نیز منجر شود.

۲-۴- فاصله ایمن

پژوهش‌ها در حوزه تعیین فاصله‌های ایمنی در پدافند غیرعامل، بیشتر بر تأثیر انواع سلاح‌ها و قدرت آن‌ها بر میزان آسیب ناشی از تیراندازی متمرکز شده‌اند. این تحقیقات نقش حیاتی در طراحی موانع فیزیکی و راهکارهای حفاظتی برای کاهش آسیب‌پذیری تأسیسات و تجهیزات ایفا می‌کنند. همچنین، بررسی تأثیرات زاویه تیراندازی و دقت سلاح‌ها از طریق مدل‌سازی‌های پیچیده، به محققان این امکان را می‌دهد که به‌طور بهتری خطرات مرتبط با حملات تیراندازی را شناسایی کنند. این تحلیل‌ها می‌توانند به بهینه‌سازی استراتژی‌های دفاعی و ارتقای ایمنی زیرساخت‌ها منجر شوند، عاملی که در برابر تهدیدات روزافزون امنیتی حائز اهمیت است [۲۴ و ۲۵].

۲-۵- آمادگی در مدیریت بحران با رویکرد پدافند غیرعامل

در عرصه مدیریت بحران، توجه به برنامه‌های آمادگی و پاسخ به شرایط اضطراری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۲۶]. تحقیقات نشان داده‌اند که سرمایه‌گذاری در آموزش کارکنان و تدوین پروتکل‌های مؤثر برای واکنش به حوادث اضطراری می‌تواند به‌طور چشمگیری ریسک‌های مرتبط با تهدیدات امنیتی را کاهش دهد [۲۸-۳۰]. این اقدامات نه تنها به بهبود ایمنی کلی تجهیزات و زیرساخت‌ها کمک می‌کنند، بلکه می‌توانند سطح آمادگی سازمان‌ها را در مواجهه با شرایط بحرانی افزایش دهند. بنابراین، ایجاد یک چارچوب جامع برای آموزش و آماده‌سازی به‌عنوان یک استراتژی پیشگیرانه مهم در حفاظت از زیرساخت‌ها و نیروی انسانی در برابر تهدیدات مختلف، به ویژه در رویکرد پدافند غیرعامل، تلقی می‌شود.

۲-۶- پیشینه تحقیق

تحقیقات درباره آسیب‌پذیری تجهیزات صنعتی، به ویژه مخازن ذخیره‌سازی مواد خطرناک، از گذشته‌های دور تا کنون همواره در کانون توجه قرار داشته است. در دهه‌های گذشته، تمرکز اصلی بر روی تأثیرات مواد زرهی و آلیاژهای خاص مانند فولاد زرهی بوده و مطالعاتی در زمینه خواص مکانیکی و فیزیکی این مواد انجام شده است که نشاندهنده قابلیت‌های آن‌ها در برابر آسیب‌های ناشی از سلاح‌ها بود [۳۱]. با این حال، در این دوره توجه چندانی به مخازن ذخیره‌سازی معمولی، که از مصالح کم‌مقاوم‌تری ساخته شده‌اند، نشده بود. این کمبود در تحقیقات به تدریج با افزایش نگرانی‌ها در مورد تهدیدات امنیتی و حملات عمدی به تاسیسات صنعتی جبران شد. از اوایل دهه ۲۰۰۰ به بعد، مطالعات متعددی به بررسی رویدادهای زنجیره‌ای و تأثیر آن‌ها بر آسیب‌های ناشی از خرابی‌های سیستماتیک پرداخته‌اند، به‌ویژه در زمینه صنایع شیمیایی [۳۲]. همچنین، مدل‌سازی سوراخ‌شدگی و پیش‌بینی آسیب‌های ناشی از برخورد سلاح‌های سبک نیز به اوج خود رسید و تلاش‌هایی برای اعتبارسنجی مدل‌ها با استفاده از داده‌های تجربی صورت گرفت [۳۳]. در سال‌های اخیر، با تأکید بر اهمیت فاصله‌های ایمنی و تحلیل دقت تیراندازی، مطالعات متعددی ارائه شده که هدف آن‌ها کاهش آسیب‌پذیری تجهیزات ذخیره‌سازی از طریق طراحی موانع حفاظتی و توسعه پروتکل‌های واکنش در برابر حملات بوده است [۳۳]. نهایتاً، ایجاد برنامه‌های آمادگی برای کارکنان و شناسایی تدابیر پیشگیرانه به یکی از ارکان اصلی تحقیقات اخیر تبدیل شده است. به‌این‌ترتیب، مسیر تحقیقاتی در این حوزه از بررسی‌های اولیه بر مواد زرهی به سوی تحلیل جامع‌تر آسیب‌پذیری و امنیت تجهیزات حاضر تغییر کرده است.

از دهه ۲۰۱۰ به بعد، رویکردها به‌طور قابل توجهی پیشرفته‌تر شدند و پژوهشگران به‌طور فزاینده‌ای به استفاده از تکنیک‌های مدرن مانند شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای و تحلیل‌های داده کلان برای پیش‌بینی آسیب‌ها و ارزیابی خطرات میل کردند. این دوره شاهد افزایش همکاری بین بخش‌های مختلف علمی و صنعتی بود که به توسعه راهکارهای جدید برای ایمن‌سازی تجهیزات ذخیره‌سازی کمک کرده است. به‌عنوان مثال، پژوهش‌ها بر روی مواد جدید و ترکیبات مرکب به‌منظور افزایش مقاومت مخازن در برابر آسیب‌ها و تحلیل‌های مبتنی بر مدلسازی عددی و تجربی برای درک بهتر رفتار مواد زیر بارهای شبیه‌سازی شده ناشی از تیراندازی متمرکز شده‌اند [۳۴].

علاوه بر این، تأکید بر رویکردهای جامع متناسب با طراحی و ارتقای سیستم‌های ایمنی به‌خوبی مشخص است. در این راستا، پروتکل‌های امنیتی و تدابیر حفاظتی که شامل ارزیابی‌های دوره‌ای و اطلاعات توزیع یافته هستند، به‌منظور تضمین واکنش سریع و مؤثر در برابر تهدیدات توسعه یافته‌اند. همچنین، آموزش کارکنان به‌خصوص در زمینه شناسایی سناریوهای احتمالی و طراحی اقدامات مؤثر در مواقع اضطراری به یکی از ارکان اصلی راهبردهای ایمنی تبدیل شده است [۳۵].

تحقیقات اخیر همچنین بر اهمیت تحلیل‌های ترکیبی، شامل ارزیابی ریسک و پیش‌بینی وقوع حملات، تأکید می‌کنند. این رویکردها به‌ویژه در پی رویدادهای جهانی و افزایش تهدیدات تروریستی و امنیتی شکل گرفته و به‌طور مداوم تکامل می‌یابند. در نهایت، با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در زمینه امنیت تجهیزات، هنوز شکاف‌های قابل توجهی در تأمین امنیت کامل و جامع این تاسیسات وجود دارد، و نیاز به تحقیقات بیشتر و توسعه مدل‌های پیشرفته‌تر و کارآمدتر برای پوشش دادن به این چالش‌ها به‌وضوح حس می‌شود. در این راستا، ادغام دانش‌های بین‌رشته‌ای، از جمله مهندسی، مدیریت بحران، و علوم اجتماعی، می‌تواند به‌طور مؤثری به امنیت و کاهش آسیب‌پذیری مخازن کمک کند [۳۶].

در ادامه، می‌توان به تأثیر فناوری‌های نوین و دیجیتال‌سازی در بهبود امنیت مخازن ذخیره‌سازی اشاره کرد. استفاده از سیستم‌های نظارت و پایش مبتنی بر اینترنت اشیاء (IoT) به شرکت‌ها این امکان را می‌دهد تا وضعیت و شرایط عملیاتی مخازن را به‌صورت لحظه‌ای تحت نظر داشته باشند و به سرعت نسبت به هر گونه تهدید یا تغییر ناگهانی واکنش نشان دهند. این فناوری‌ها، به‌ویژه در شناسایی ناهنجاری‌ها یا حوادث غیرمترقبه، بسیار مؤثر واقع شده و می‌توانند نقاط ضعف پنهان در سامانه های امنیتی را شناسایی کنند.

علاوه بر این، تحلیل‌های داده و یادگیری ماشین به‌عنوان ابزارهایی قدرتمند در پیش‌بینی و ارزیابی خطرات به‌ویژه در موقعیت‌های بحرانی به‌کار گرفته شده‌اند. این فناوری‌ها می‌توانند الگوهای رفتاری را شناسایی کرده و به تحلیل خطرهای بالقوه بر اساس داده‌های تاریخی و محیطی بپردازند. به‌عنوان مثال، مدل‌های پیش‌بینی کننده می‌توانند به شناسایی نقاط ضعف خاص در طراحی مخازن کمک کرده و به شرکت‌ها در ایجاد

راهبردهای حفاظتی کارآمدتر یاری رسانند.

همچنین اهمیت هماهنگی بین سازمان‌های دولتی، نهادهای امنیتی و شرکت‌های صنعتی در ایجاد یک چارچوب امنیتی کامل و پایدار قابل توجه است. همکاری در تبادل اطلاعات و تجربه، به‌ویژه در شرایط بحرانی، می‌تواند به افزایش توانایی‌ها در مدیریت بحران و کاهش تبعات ناشی از حملات احتمالی کمک کند. این نوع همکاری‌ها نه‌تنها به شناسایی و کاهش تهدیدات کمک می‌کند، بلکه افق‌های جدیدی برای تحقیقات آتی در زمینه امنیت صنایع شیمیایی و دیگر بخش‌های حساس گشوده است.

بنابراین، با توجه به پیچیدگی و تنوع تهدیدات کنونی، یک رویکرد چندوجهی و یکپارچه در امنیت مخازن ذخیره‌سازی ضروری به نظر می‌رسد. این رویکرد باید شامل آگاهی مستمر از تهدیدات، نوآوری در فناوری‌های حفاظتی، آموزش دائمی کارکنان، و ارتقای فرهنگ ایمنی در سازمان‌ها باشد. به‌این‌ترتیب، می‌توان امید داشت که سطح آسیب‌پذیری این تجهیزات به‌طور معناداری کاهش یابد و امنیت کلی تاسیسات صنعتی به یک استاندارد بالاتر ارتقا پیدا کند، که در نتیجه آن، ایمنی جامعه و محیط زیست نیز تأمین شود.

جدول (۱) روند تحقیقات در زمینه آسیب‌پذیری تجهیزات صنعتی و به‌ویژه مخازن ذخیره‌سازی مواد خطرناک را نشان می‌دهد. با توجه به یافته‌های مختلف، مشخص است که نیاز به رویکردهای جامع و نوآورانه برای بهبود امنیت و کاهش آسیب‌پذیری این تأسیسات به‌طور مداوم احساس می‌شود.

جدول (۱): پیشینه تحقیق در زمینه آسیب‌پذیری تجهیزات صنعتی و مخازن ذخیره‌سازی مواد

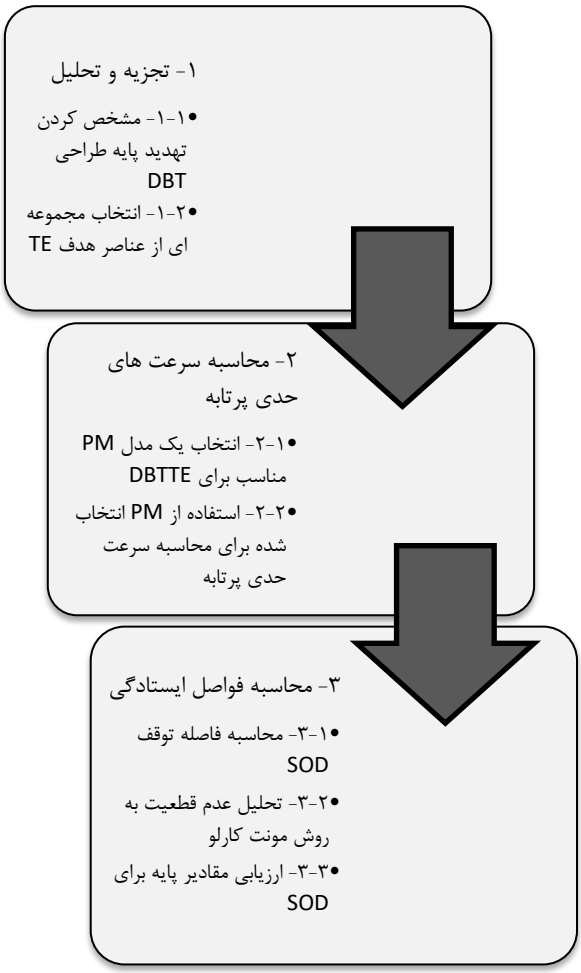
سال	نام نویسنده	روش	یافته‌ها
۲۰۰۰	[۳۱]	تحلیل آسیب‌پذیری	تأثیرات مواد زرهی و آلیاژهای خاص بر مقاومت تجهیزات در برابر سلاح‌ها بررسی شد.
۲۰۰۵	[۳۲]	مدل‌سازی سوراخ‌شدگی	مدل‌های سوراخ‌شدگی برای پیش‌بینی آسیب‌های ناشی از سلاح‌های سبک اعتبارسنجی شدند.
۲۰۱۰	[۳۳]	ارزیابی ریسک	تأکید بر اهمیت فاصله‌های ایمنی و تحلیل دقت تیراندازی در کاهش آسیب‌پذیری تجهیزات ذخیره‌سازی.
۲۰۱۵	[۳۴]	شبیه سازی عددی	استفاده از مواد جدید و ترکیبات مرکب برای افزایش مقاومت مخازن در برابر آسیب‌ها پیشنهاد شد.
۲۰۲۰	[۳۵]	تحلیل داده کلان	فناوری‌های نوین مانند اینترنت اشیاء برای بهبود نظارت و شناسایی تهدیدات در تأسیسات صنعتی معرفی شدند.
۲۰۲۳	[۳۶]	رویکرد چند وجهی	تأکید بر اهمیت همکاری بین سازمان‌ها برای ایجاد یک چارچوب امنیتی کامل و پایدار.

۳- روش تحقیق

یک روش نوآورانه برای تعیین مقادیر پایه فاصله‌های ایمنی[1] (SOD) در برابر حملات تیراندازی به مخازن ذخیره‌سازی جوی و تحت فشار حاوی مواد خطرناک، به ویژه در صنعت فرآیندهای شیمیایی، ابداع شده است. این فرایند شامل یک جریان کار سه مرحله‌ای است [۳۷] که در شکل (۱) به وضوح نمایش داده شده است. نخستین مرحله به راه‌اندازی تحلیل مربوط می‌شود که در آن اطلاعات اولیه جمع‌آوری و تنظیم می‌شود و با استفاده از رویکرد پدافند غیرعامل، نقاط ضعف و تهدیدات موجود شناسایی می‌شوند. در مرحله دوم، سرعت‌های پرتابه حداکثری محاسبه می‌شود تا درک دقیقی از معیارهای داخلی هر نوع سلاح به‌دست آید و این محاسبات به تحلیل دقیق‌تری از تأثیرات احتمالی حملات تیراندازی بر روی ساختار مخازن و ایمنی محیط کمک می‌کند. در نهایت، مرحله سوم به محاسبه حریم امنیتی مجاز

[1] Safety Stand-Off Distances

اختصاص دارد که به‌منظور تأمین حداکثر ایمنی در برابر تهدیدات بالقوه طراحی شده است. با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از مراحل قبلی و با در نظر گرفتن اصول پدافند غیرعامل، می‌توان فاصله‌های ایمنی مناسبی را تعیین کرد که به کاهش خطرات ناشی از حملات تیراندازی کمک می‌کند. این رویکرد می‌تواند به طور قابل توجهی به بهبود امنیت و کاهش خطرات ناشی از حملات تیراندازی در محیط‌های صنعتی کمک کند و به ایجاد یک محیط کار ایمن‌تر و پایدارتر منجر شود.



شکل (۱): مدل مفهومی تحقیق

۳-۱- عناصر تهدید پایه طراحی و هدف (مرحله ۱)

۳-۱-۱- تهدید پایه طراحی

مفهوم تهدید پایه طراحی[1] (DBT) ابزار مهمی در ارزیابی آسیب‌پذیری و ریسک (SVA/SRA) محسوب می‌شود که به بررسی ویژگی‌های دشمن از جمله مهارت‌ها و انگیزه‌های آن می‌پردازد و در این تحقیق، تمرکز بر تهدیدات ناشی از سلاح‌های سبک است. انتخاب گلوله‌های مختلف، جدول (۱)، که قابلیت شلیک توسط دشمن را داشته باشند، برای تعیین DBT ضروری است و فرض بر این است که دشمن دارای مهارت بالا و انگیزه‌های قوی است. گلوله‌ها بر اساس نوع مواد تشکیل‌دهنده و شکل هندسی آن‌ها دسته‌بندی می‌شوند، به‌طوری‌که گلوله‌های نرم و سخت از لحاظ نفوذ به اهداف عملکردهای متفاوتی دارند. در این مطالعه، یک مجموعه مرجع از گلوله‌ها طبق استانداردهای EN 1522 و EN 1063 انتخاب شده است که هر گلوله نمایانگر یک کلاس حفاظتی خاص با کاربردهای متنوعی است. مرحله ابتدایی تحلیل شامل شناسایی DBT و عناصری است که هدف را تشکیل می‌دهند، که برای ارزیابی مناسب خطرات حیاتی است و این مراحل، پایه‌ای برای تحلیل‌های آینده فراهم می‌کند [۳۸].

۳-۱-۲- عناصر هدف

عناصر هدف[2] (TE) مربوط به اشیایی هستند که در حملات تیراندازی هدف قرار می‌گیرند و آسیب‌پذیری آن‌ها به عوامل مختلفی از جمله شکل و جنس ماده بستگی دارد. برای مثال، اشیاء با ضخامت یکسان اما اشکال متفاوت (مثل سطوح تخت یا منحنی) ممکن است در برابر نفوذ از خود رفتارهای متفاوتی نشان دهند. در صنعت شیمیایی، مخازن ذخیره‌سازی مایعات عمدتاً به شکل استوانه‌ای طراحی می‌شوند و به دلیل مزایایی مانند هزینه پایین‌تر و آسانی در نصب، کاربرد بیشتری دارند. در این بررسی، دو نوع مخزن استوانه‌ای، یکی عمودی و دیگری افقی تحت فشار، به عنوان TE استفاده شده است و اطلاعات طراحی آن‌ها از مطالعات پیشین استخراج شده است. از فولاد A 285M-C به عنوان ماده سازنده این مخازن بهره گرفته شده تا دقت نتایج تحلیل بهبود یابد و با توجه به خصوصیات مکانیکی این فولاد، تأثیر انتخاب ماده بر نتایج نهایی چندان قابل توجه نخواهد بود [۳۹].

[1] Design Basis Threat

[2] Target Elements

جدول (۱): پرتابه‌های مرجع انتخاب شده از [۴۱]. RN= نوک گرد، SC= هسته نرم (سرب)، FN= نوک تخت، P=نوک تیز، SCP1= هسته نرم (سرب) با نفوذکننده فولادی، HC= هسته سخت (فولاد با سختی بیش از ۶۳ راکول).

کلاس حفاظتی	نوع سلاح	پرتابه مرجع	نوع پرتابه	*d (mm)*	*m (g)*	$u_m(^m/_s)$	$\emptyset_r(MOA)$
FB2	تفنگ دستی	لوگر ۹ میلیمتری	*RN/SC*	۹	۸	۴۰۰	۲۰
FB4	تفنگ دستی	مگنوم رمینگتون ۴۴	*FN/SC*	۱۱	۱۵/۶	۴۴۰	۲۰
FB5	تفنگ تهاجمی	کالیبر ۵/۵۶×۴۵ میلی‌متر	*PB/SC*	۵/۵۶	۴	۹۵۰	۱
FB6	مسلسل سبک	کالیبر ۷/۶۲×۵۱ میلی‌متر	*P/SC*	۷/۶۲	۹/۵	۸۳۰	۱
FB7	مسلسل سبک	کالیبر ۷/۶۲×۵۱ میلی‌متر	*FP/HC*	۶/۰۶	۳/۷	۸۲۰	۱

d: قطر پرتابه، m: جرم پرتابه، u_m: سرعت دهانه، $\emptyset_r$: مرجع زاویه افست اولیه.

۳-۲- سرعت حد پرتابه و مدل‌های نفوذ گلوله (مرحله ۲)

در مرحله دوم روش توسعه‌یافته این مطالعه، محاسبه سرعت حد پرتابه (ub) اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا این پارامتر برای تعیین حریم امنیتی مجاز در مراحل بعدی ضروری است. سرعت حد پرتابه به حداقل سرعتی اطلاق می‌شود که گلوله برای نفوذ مؤثر به یک هدف در برخورد عمود به آن نیاز دارد و به‌طور معمول با استفاده از مدل‌های نفوذ گلوله تحلیل می‌شود. انتخاب مدل‌های مناسب بر اساس ویژگی‌های تهدید پایه طراحی (DBT) و عناصر هدف (TE) صورت می‌گیرد و به کارگیری این مدل‌ها در هر ترکیب DBT-TE امر ضروری است. فرآیند مدل‌سازی نفوذ به متغیرهای زیادی وابسته است، از جمله قطر، جرم و دانسیته گلوله، حداکثر ضخامت هدف، زاویه برخورد و ویژگی‌های مکانیکی مواد، که همه این موارد می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر نتایج نهایی داشته باشند. بررسی‌های اخیر موجب شناسایی و اعتبارسنجی مدل‌های خاصی برای ارزیابی نفوذ گلوله به مواد متداول در ساختارهای صنعتی شده است. مدل‌های Modified De Marre و Recht به دلیل توانایی خود در توصیف رفتار گلوله‌های نرم و سخت در برخورد با ورقه‌های فولادی، به‌عنوان مناسب‌ترین انتخاب‌ها شناسایی شده‌اند. با این حال، به دلیل عدم قرارگیری معمولی جهت برخورد گلوله در زاویه عمود بر سطح هدف، استفاده از رابطه‌های مثلثاتی برای ارتباط سرعت حد پرتابه با مؤلفه عمودی آن ضروری می‌شود، معادله (۱) و (۲)، که در آن θ زاویه برخورد (زاویه قطبی در سیستم مختصات کروی با نقطه برخورد به عنوان مبدا و عمود بر دیوار هدف به عنوان محور قطبی) است [۴۱].

$$u_b = f(d, m, t_{max}, \theta, \rho_p, \rho_t, \sigma_T, Y, BHN_p, BHN_1, E, f, \tau_s, K, G, \alpha, v, C_n, C_v) \quad (۱)$$

$$u_b = \frac{u_{b,n}}{cos\theta} \quad (۲)$$

مدل Modified De Marre به‌عنوان روشی کلیدی برای محاسبه سرعت حد پرتابه $u_{b,n}$در سناریوهای برخورد بین عناصر هدف و گلوله‌های نرم‌هسته شناخته می‌شود. در این مطالعه، گلوله‌های مربوط به کلاس‌های حفاظتی FB2، FB4، FB5 و FB، تحت ارزیابی قرار می‌گیرند؛ معادله‌ای که این مدل استفاده می‌کند، توانسته است ارتباط بین متغیرهای مختلفی نظیر ویژگی‌های گلوله و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی هدف را به‌طور مؤثری منعکس کند و بدین ترتیب ابزاری موثر برای پیش‌بینی رفتار نفوذ در شرایط مختلف فراهم آورد. استفاده از این مدل کمک می‌کند تا درک بهتری از تأثیرات سرعت و نوع گلوله بر نتایج نفوذ به دست آید و بر اساس آن به تحلیل‌های عمیق‌تری در زمینه آسیب‌پذیری پناهگاه‌ها و ساختارهای حفاظتی پرداخته شود، معادله (۳)، که در آن m جرم گلوله (کیلوگرم) و t_{max} حداکثر ضخامت نفوذپذیر (متر) است [۴۲].

$$t_{max} = 5.42 \times 10^{-6} u_{b,n}^{4/3} m^{1/3} \quad (۳)$$

مدل Recht به‌عنوان یکی از ابزارهای تحلیلی برای تعیین سرعت حد پرتابه $u_{b,n}$ در سناریوهای برخورد گلوله‌های سخت‌هسته با عناصر هدف، به‌ویژه گلوله‌های FB7، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

این مدل به طور خاص برای رفتار گلوله‌های نوک‌دار طراحی شده و می‌تواند عملکرد آنها را در شرایط مختلف پیش‌بینی کند. معادلات (۴-۷) مربوط به این مدل شامل متغیرهایی همچون جرم (m) و قطر (d) گلوله به عنوان پارامترهای کلیدی است. علاوه بر این، پارامترهای خاص گلوله مانند C_n و C_v با مقادیر ۰/۶۲ و ۰/۲۵ به ترتیبی مشخص شده‌اند، در حالی که زاویه نوک مخروطی (α) نیز که به طور استاندارد ۲۳/۵ درجه است، در محاسبات لحاظ می‌شود. دیگر عوامل مؤثر در این معادلات شامل ویژگی‌های مکانیکی هدف، همچون تنش جاری استاتیکی (σ_T) و مدول یانگ (E)، و همچنین ضریب اصطکاک دینامیک (f) هستند که برای بررسی تعاملات بین گلوله و هدف مورد توجه قرار می‌گیرند. این مدل با دقت بالا امکان تجزیه و تحلیل نفوذ گلوله‌های سخت‌هسته را فراهم می‌آورد و به محققان کمک می‌کند تا اثرات تفاوت‌های فیزیکی و مکانیکی را در این نوع از برخوردها درک کنند [۴۳].

$$t_{max} = \frac{4\left(\frac{m}{\pi d^2}\right)}{C_n b}\left[u_{b,n} - \frac{a}{b} ln\left(\frac{a+bu_b}{a}\right)\right] \quad (۴)$$

$$a = 2\tau_s ln(2Z_m).\left(1+\frac{f}{tan\alpha}\right) \quad (۵)$$

$$b = C_v\sqrt{K\rho_t}\left(1+\frac{f}{tan\alpha}\right) sin\alpha \quad (۶)$$

$$Z_m = \frac{E}{\sigma_T}\left(1+2\frac{E}{\sigma_T}\right)^{-0.5} \quad (۷)$$

در این تحلیل، باید به دقت به این نکته توجه شود که مقدار ضخامت‌هایی که در محاسبات لحاظ می‌شوند، به‌عنوان ضخامت‌های خورده‌شده در نظر گرفته شده‌اند. این به این معنی است که ضخامت نهایی از ضخامت اولیه با در نظر گرفتن مقاومت در برابر خوردگی محاسبه می‌شود. هدف این رویکرد، فراهم آوردن ارزیابی کناری قابل اعتمادی از سرعت‌های حد پرتابه است، زیرا خطر حمله به مخازن ممکن است در هر زمان از دوره عمر آن‌ها واقع شود. به‌علاوه، باید توجه داشت که در بسیاری از موارد، پدیده‌های خوردگی عمدتاً تأثیرات سطحی دارند و به ویژه بر خواص مکانیکی ماده اصلی دیوار مخزن تأثیر چندانی نمی‌گذارند. این امر اجازه می‌دهد تا با اطمینان بیشتری به تحلیل‌های مربوط به ایمنی و شدت نفوذ پرداخته شود و نتایج به‌دست‌آمده کارایی بهتری در شرایط واقعی داشته باشد.

۳-۲-۱- ضخامت مؤثر هدف

یکی از عوامل کلیدی در محاسبه سرعت حد پرتابه برای یک ماده هدف خاص و گلوله، تنش‌های وارد شده به دیواره‌های عناصر هدف است که در اینجا شامل مخازن فولادی استوانه‌ای می‌شود. در مخازن جوی، تنش عمدتاً ناشی از بار هیدرواستاتیکی مایع داخل مخزن است، در حالی که در مخازن تحت فشار، این تنش مرتبط با فشار داخلی طراحی می‌باشد. اگر در محاسبات ضخامت واقعی دیوار هدف در نظر گرفته شود، ممکن است سرعت حد پرتابه برای نفوذ به‌طور نادرست تخمین زده شود و در نتیجه حریم امنیتی مجاز کمتر از حد واقعی برآورد گردد. این وضعیت به دلیل سهولت تشکیل سوراخ‌ها در دیواره‌های مخزن ناشی از تنش‌های موجود در آن‌ها است. برای حل این چالش، در این مطالعه فرض بر این است که نفوذ موفق تنها زمانی محقق می‌شود که گلوله بتواند دیوار را نفوذ کند تا ضخامت باقی‌مانده غیرنفوذی برابر یا کمتر از حداقل ضخامت طراحی‌شده (t_d) باشد که برای تحمل تنش‌های مکانیکی ناشی از فشار داخلی و بار هیدرواستاتیکی لازم است. به عبارت دیگر، نفوذ زمانی اتفاق می‌افتد که حداکثر ضخامت نفوذی محاسبه‌شده (t_{max}) توسط مدل نفوذ، از ضخامت مؤثر (t_{eff}) که به‌طور خاص تعریف شده است، تجاوز کند. معادلات مربوط به ضخامت طراحی (t_d) با در نظر گرفتن معیار Von Mises برای محاسبه تنش‌های معادل، به‌ویژه در شرایط تنش صفحه‌ای، تعیین می‌شود. این رویکرد به تحلیل‌های دقیق‌تر و منطقی‌تر در خصوص ایمن‌سازی مخازن و مقاومت آن‌ها در برابر نفوذ گلوله‌ها منجر می‌شود، معادلات (۸ و ۹)، [۴۴].

$$t_{eff} = t - t_d \quad (۸)$$

$$t_d = \frac{\sqrt{3}P_d D}{4\sigma_e} \quad (۹)$$

در مورد مخازن استوانه‌ای عمودی، ضخامت طراحی (t_d) بر مبنای بار هیدرواستاتیکی و با استفاده از معادله (۱۰) که در استاندارد API 650 برای شرایط هیدرواستاتیکی تعریف شده، محاسبه می‌شود. این معادله با در نظر گرفتن عوامل کلیدی مانند قطر مخزن (D) و حداکثر سطح مایع طراحی (H) به همراه تنش جاری هدف (σ_T) به‌عنوان ورودی‌های اساسی، قادر به تعیین ضخامت مناسب دیوار می‌باشد. این فرآیند محاسباتی به‌ویژه در طراحی و ارزیابی ایمنی مخازن جوی اهمیت دارد، زیرا تضمین می‌کند که دیوارهای مخزن در برابر فشار ناشی از مایع محبوس‌شده توانایی مقاومت کافی داشته باشند. به این ترتیب، استفاده از استانداردهای معتبر در محاسبه t_d به بهبود قابلیت اطمینان در برابر خطرات مربوط به شکست‌های ساختاری و نفوذ

گلوله‌ها کمک می‌کند و به طراحان و مهندسان اجازه می‌دهد تا تصمیمات دقیق‌تری در زمینه طراحی اتخاذ کنند [۴۵].

$$t_d = \left(1.06 - \frac{0.0696D}{H}\sqrt{\frac{H}{\sigma_T}}\right).\frac{4.9HD}{\sigma_T} \qquad (۱۰)$$

۳-۲-۲- محاسبه حداکثر حریم امنیتی مجاز

برای محاسبه حریم امنیتی مجاز، لازم است که پرواز گلوله به‌طور دقیق مدل‌سازی شود تا بتوان تأثیر کاهش مؤلفه افقی سرعت را به عنوان تابعی از مسافت طی‌شده برآورد کرد. در این راستا، از مدل‌های پرتابه خارجی [۴۶] بهره‌برداری شده است تا حریم امنیتی مجاز (SOD) را برای سه‌تایی‌هایی شامل سرعت حد پرتابه (u_b)، سرعت دهانه (u_m) و عوامل مدل پرتابه (C و G) محاسبه کند، معادله (۱۱). در این مدل‌ها، u_b به‌عنوان سرعتی در نظر گرفته می‌شود که گلوله قادر است به آن دست یابد قبل از اینکه تحت تأثیر مقاومت هوا و دیگر عوامل محیطی قرار گیرد. پارامترهای C و G به‌عنوان ضرایب کالیبره‌کننده در نظر گرفته می‌شوند که به ترتیب مشخص‌کننده قدرت پرتابه و رفتار مقاومت گلوله در حین حرکت هستند. این رویکرد به محققان کمک می‌کند تا بهتر بتوانند دینامیک و رفتار گلوله را پیش‌بینی کرده و تدابیر لازم برای تعیین مؤثرترین حریم امنیتی مجاز را به کار برند.

$$SOD = f(u_b, u_m, C, G) \qquad (۱۰)$$

حل معادلات دیفرانسیل مرتبط با محاسبات پرتابه خارجی، برای توصیف مسیر گلوله ضروری است. این معادلات معمولاً با استفاده از فرضیات ساده‌سازی‌شده مانند ثابت بودن چگالی هوا و زاویه پرتاب کمتر از ۱۵ درجه تحلیل می‌شوند [۴۶]. در این مطالعه، از روش Siacci برای مدل‌سازی ویژگی‌های پرتابه خارجی استفاده شده است، که اعتبار آن توسط محققانی نظیر کاموتو و همکاران [۴۷] و وانگ و همکاران [۴۸] تأیید شده است. با استفاده از این روش، می‌توان یک تخمین اولیه از حریم امنیتی مجاز به‌دست آورد، به شرطی که فرض شود گلوله به‌طور عمود به دیوار هدف برخورد می‌کند، به‌طوری که زاویه برخورد (θ) برابر با صفر می‌شود و سرعت حد پرتابه $u_b = u_{b,n}$ در این حالت برقرار است؛ در صورتی که تیرانداز زاویه نشانه‌گیری را تغییر دهد، این زاویه (θ) افزایش یافته و به تبع آن انرژی جنبشی گلوله برای نفوذ کاهش می‌یابد. از این رو، فرض برخورد عمود بر هدف به‌عنوان بدترین سناریو در نظر گرفته می‌شود و نتایج حاصل، محافظه‌کارانه‌تر بوده و درجه‌ای از ایمنی را تأمین می‌کند. حریم امنیتی مجاز محاسبه‌شده در این فرض به عنوان حداکثر حریم امنیتی مجاز SOD_0 شناخته می‌شود و نمایان‌گر بدترین سناریو است که در آن تیرانداز تحت تأثیر عوامل خارجی مانند شرایط جوی و ویژگی‌های سلاح قرار ندارد. بنابراین، SOD_0 به‌عنوان حداکثر مقداری که انتظار می‌رود برای حریم امنیتی مجاز در نظر گرفته شود، اهمیت حیاتی در تحلیل ایمنی و قابلیت اطمینان نتایج دارد.

۳-۲-۳- تحلیل عدم قطعیت به روش مونت کارلو

برای ارزیابی تأثیر عوامل غیرقابل اجتناب بر فاصله ایستادگی (SOD)، از تحلیل مونت کارلو استفاده شده است، که در مرحله (۳-۲)، شکل(۱)، مشخص گردیده است. این تحلیل به‌ویژه برای شناسایی و کاستن از عدم قطعیت‌های موجود در برآوردهای SOD به کار می‌رود. عوامل خارجی مانند زوایای مختلف هدف در محور شناور، توانایی تیرانداز، نقص‌های غیرمترقبه در سلاح و شرایط نامساعد جوی، به‌دلیل تنوع بالایی که دارند، به‌صورت محافظه‌کارانه کنار گذاشته شده‌اند. این دسته از عوامل به‌دلیل اینکه قابلیت مقایسه و واریانس بالایی دارند، برای تعریف کاربری عمومی فاصله ایستادگی نامناسب به نظر می‌رسند. با این وجود، حتی در شرایط ایده‌آل و برای تیراندازان با مهارت بالا، خطای ذاتی در سیستم تیراندازی وجود دارد که قابل چشم‌پوشی نیست؛ این خطا ممکن است نقطه‌ای که تیرانداز به هدف می‌زند با نقطه‌ای که در واقع اصابت می‌کند، متفاوت باشد. این پدیده می‌تواند با استفاده از یک سیستم مختصات قطبی تشریح شود که شامل زاویه افست اولیه (φ) و زاویه آزیموتال ($\delta=\pi/2$) است. مقدار مرجع برای زاویه افست اولیه در مرحله (۱-۱)، شکل(۱)، برای هر نوع پرتابه تعریف شده است، در حالی که زاویه آزیموتال اولیه می‌تواند به گونه‌ای فرض شود که در همه جهات یکسان است. با افزایش زاویه افست اولیه (φ)، زاویه ضربه (θ) بر روی هدف تغییر کرده و به‌خصوص برای اهداف با قطر کم، تأثیر بیشتری بر SOD خواهد گذاشت، در صورتی‌که این زاویه افست در صفحه عمود بر محور هدف استوانه‌ای در نظر گرفته شود، تأثیر آن بر سرعت حدی پرتابه و در پی آن بر SOD به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، در مورد اهداف استوانه‌ای عمودی، زاویه افست عمودی می‌تواند بیشترین تأثیر را بر کاهش فاصله ایستادگی داشته باشد. به همین دلیل، در تحلیل مونت

کارلو، جهت زاویه افست اولیه (φ) به‌گونه‌ای در نظر گرفته شده است که با زاویه آزیموتال ($\delta=\pi/2$) مرتبط باشد. معادلات همبستگی، شامل ارتباط‌هایی برای زاویه برخورد و الزامات دیگر در این زمینه، به تحلیل دقیق‌تر و علمی‌تری در مورد فاصله ایستادگی کمک می‌کند [۴۹].

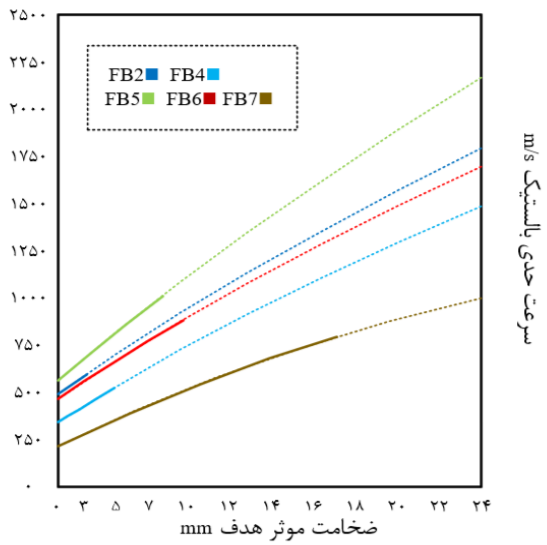
۳-۲-۴- ارزیابی مقادیر پایه فاصله ایستادن

در مرحله (۳-۳)، شکل(۱)، فاصله‌های بن‌بست خط پایه با استفاده از نتایج حاصل از مراحل قبلی (۳-۱ و ۳-۲)، که به ترتیب مربوط به محاسبات وضعیت بدترین و تحلیل احتمالی فاصله‌های ایستادگی (SODs) بودند، تعیین شد. این ارزیابی به‌ویژه بر اساس یک معیار حفاظتی انجام شد که بالاترین مقدار از سطوح مختلف SODهای محاسبه‌شده برای هر مجموعه از مخزن‌های ذخیره‌سازی، اعم از اتمسفری و تحت فشار را در نظر می‌گرفت. مقادیر به‌دست‌آمده به‌عنوان فاصله‌های توقف پایه پیشنهاد شده‌اند و می‌توانند در مطالعات مربوط به ارزیابی آسیب‌پذیری (SVA) و ارزیابی ریسک (SRA) به‌کار روند تا خطرات ناشی از تیراندازی به مخازن ذخیره‌سازی مواد خطرناک را به دقت بررسی کنند. این رویکرد تأکید بر اهمیت حفظ امنیت و ایمنی در برابر تهدیدات بالقوه دارد و به متخصصان کمک می‌کند تا تأثیرات احتمالی را با دقت بیشتری تحلیل نمایند [۵۰].

۴- تجزیه و تحلیل یافته‌ها

۴-۱- تحلیل نفوذپذیری پرتابه و راهبردهای پدافند غیرعامل در برابر تهدیدات سلاح‌های گرم

در این تحقیق، تحلیلی از ارتباط بین ضخامت مؤثر هدف (TE) و سرعت حدی پرتابه برای پرتابه‌های مختلف ارائه شده است. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت TE، سرعت حدی لازم برای سوراخ کردن نیز افزایش می‌یابد. این ارتباط به وضوح در شکل (۲) قابل مشاهده است، جایی که منحنی‌ها نشان می‌دهند پرتابه‌هایی مانند FB2 و FB4، که به عنوان پرتابه‌های تفنگ دستی شناخته می‌شوند، نمی‌توانند اهداف با ضخامت بالاتر از ۴/۶ میلی‌متر را سوراخ کنند. در مقابل، پرتابه‌های تفنگی مانند FB7 قادر به سوراخ کردن سطوح با حداکثر ضخامت ۱۹/۵ میلی‌متر هستند. این یافته‌ها حاکی از آن است که تهدیدات ناشی از استفاده از سلاح‌های گرم در مقایسه با سلاح‌های دستی به مراتب بیشتر است. با رویکرد پدافند غیرعامل، این نتایج تأکید می‌کند که برای افزایش ایمنی در برابر حملات، باید موانع فیزیکی و ساختارهای مقاوم‌تری طراحی شود. به کارگیری مواد با قابلیت نفوذ ناپذیری و ایجاد لایه‌های حفاظتی مؤثر در تأسیسات، می‌تواند به کاهش خطرات ناشی از سلاح‌های گرم کمک کند. همچنین، ارتقاء آموزش و تجهیز کارکنان، کلیدی برای موفقیت در مقابله با این تهدیدات خواهد بود و می‌تواند راهبردهای مناسبی برای حفاظت از تأسیسات حساس ایجاد کند.

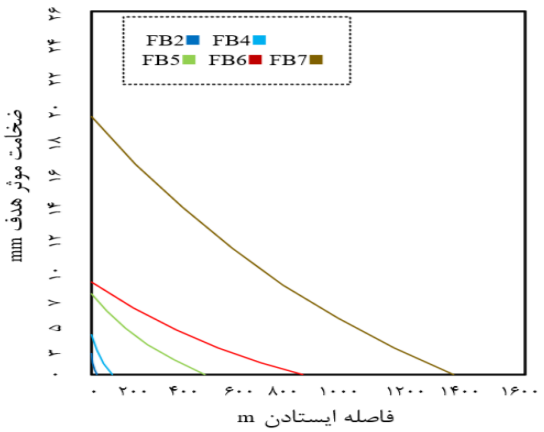


شکل(۲): جزء معمولی سرعت حدی پرتابه (m/s) در مقابل ضخامت موثر هدف (mm) محاسبه شده برای پرتابه‌های FB2، FB4، FB5، FB6 و FB7 (کدهای FB تعریف شده در جدول ۱). TE ساخته شده از فولاد A 285 M – C. سرعت دهانه (m/s) و حداکثر ضخامت قابل نفوذ (mm) مربوط به هر کلاس FB گزارش شده است. خطوط پیوسته: مقادیر زیر سرعت دهانه. خطوط نقطه چین: مقادیر بالاتر از سرعت دهانه.

۴-۲- تحلیل حداکثر فاصله نفوذ پرتابه‌ها و راهبردهای پدافند غیرعامل در افزایش ایمنی تأسیسات

شکل (۳) حداکثر فاصله‌ای که پرتابه‌ها می‌توانند از هدف فاصله بگیرند (SOD_0) را به وضوح نمایش می‌دهد و نشان‌دهنده تفاوت قابل توجه بین پرتابه‌های تفنگ دستی و مسلسل است. تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که برای ضخامت مؤثر ۳ میلی‌متر، پرتابه‌های FB2 و FB4 به ترتیب تنها می‌توانند تا ۱۱ متر و ۱۳۴ متر فاصله بگیرند، در حالی که پرتابه‌های تفنگی FB5، FB6 و FB7 قادر به پوشش حداکثر فواصل ۵۴۲ متر، ۸۷۱ متر و ۱۴۱۲

متر هستند. این نتایج به طراحان موانع حفاظتی در سیستم‌های حفاظت فیزیکی (PPS) کمک می‌کند تا با درک بهتر تهدیدات، طراحی‌های مؤثرتری انجام دهند. همچنین، برای ضخامت پوسته مؤثر ۱۱/۵ میلی‌متر، فاصله ایستادن حدود ۴۰۲ متر برای پرتابه FB7 محاسبه شده است که نشان می‌دهد تهدیدات می‌توانند از خارج از مرزهای یک تأسیسات به هدف خود برسند. در این راستا، تقویت اقدامات امنیتی، از جمله ایجاد مناطق پاکسازی و نصب سیستم‌های دوربین مداربسته خارجی، نقش حیاتی در شناسایی و جلوگیری از حملات ایفا می‌کند. این رویکرد پدافند غیرعامل با تأکید بر پیشگیری و آماده‌سازی، می‌تواند به کاهش ریسک‌های ناشی از تهدیدات پرتابه کمک کرده و اطمینان حاصل کند که سیستم‌های حفاظتی در بهترین وضعیت ممکن عمل می‌کنند.



شکل(۳): حداکثر فاصله ایستادن (SOD_0) برای ضربه معمولی (m) در مقابل ضخامت مؤثر هدف (میلی متر) محاسبه شده برای پرتابه های FB2، FB4، FB5، FB6 و FB7 (کدهای FB تعریف شده در جدول ۱). TE ساخته شده از فولاد A 285 M – C.

۴-۳- تقویت امنیت تأسیسات صنعتی در برابر تهدیدات

با بررسی سرعت حدی پرتابه و حداکثر فاصله ایستادن (SOD_0) برای انواع مختلف مخازن، شامل مخازن اتمسفری و تحت فشار، این نتایج به ایجاد یک مدل جامع برای ارزیابی خطرات ناشی از حملات تیراندازی کمک می‌کنند. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که اکثر مخازن اتمسفری به طور ذاتی در برابر حملات با تفنگ‌های دستی مقاوم هستند. در مورد مخازن ذخیره‌سازی تحت فشار، ضخامت بیشتر دیواره‌ها به ایمنی بیشتری در برابر انواع سلاح‌ها منجر می‌شود. به طور کلی، یافته‌ها حاکی از آن است که فواصل ایستادن محاسبه‌شده برای مخازن تحت فشار به مراتب کمتر از مخازن اتمسفری است، به گونه‌ای که در مواردی حملات از فاصله دور ممکن است به موفقیت برسند. در نهایت، جدول (۲) نتایج جمع‌بندی‌شده برای فاصله‌های ایستادن مرجع را ارائه می‌دهد که می‌تواند به طراحان و مدیران سیستم‌های حفاظتی کمک کند تا امنیت این تأسیسات را بهبود بخشند. در راستای پدافند غیرعامل، توجه به این جمع‌بندی و استفاده از آن در طراحی موانع حفاظتی ویژگی‌های کلیدی در کاهش آسیب‌پذیری تأسیسات به شمار می‌آید. تقویت دیواره‌های مخازن تحت فشار و بهینه‌سازی طراحی آن‌ها می‌تواند در افزایش تاب‌آوری در برابر تهدیدات، اطمینان بیشتری ایجاد کند و به جلوگیری از خطرات ناشی از حملات تیراندازی کمک کند.

جدول (۲): فواصل پایه (m) پیشنهادی برای مخازن ذخیره سازی اتمسفری و تحت فشار فولادی با در نظر گرفتن کلاس های مختلف پرتابه ها

SOD_0 (m)	FB2	FB4	FB5	FB6	FB7
مخازن ذخیره اتمسفر	عدم آسیب پذیری	۶	۴۲۱	۶۸۲	۱۱۳۵
مخزن ذخیره تحت فشار	عدم آسیب پذیری	عدم آسیب پذیری	۷۳	۱۸۹	۶۴۷

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مدل سازی و طراحی موانع فیزیکی و ارزیابی خطرات ناشی از حملات تیراندازی برای سناریوهای تیراندازی به مخازن ذخیره‌سازی استوانه‌ای اتمسفری و تحت فشار فولادی با استفاده از مدل‌های معتبر بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که برای پرتابه‌های سلاح سبک، فاصله‌های ایستادگی متغیر است و به طور کلی بین کمتر از ۱۱ متر برای تفنگ‌های دستی تا ۶۸۲ متر برای تفنگ‌های با گلوله‌های هسته نرم (سرب با نفوذگر فولادی) و حداکثر ۱۱۳۵ متر برای گلوله‌های هسته سخت (فولاد با ژاکت مسی) تخمین زده می‌شود. علاوه بر این، تحلیل مونت کارلو تأثیر زاویه افست اولیه تیرانداز را مورد بررسی قرار داد و نتایج نشان داد که این تأثیر تنها در تیراندازی به اهداف کوچک تغییرات قابل توجهی را نشان می‌دهد. این روش تحقیق به ویژه برای ارزیابی تهدید تیراندازی به تجهیزات ذخیره‌سازی مواد خطرناک در کارخانه‌های شیمیایی اهمیت دارد و پتانسیل کاربرد آن را در طراحی سیستم‌های حفاظتی و ارزیابی آسیب‌پذیری نشان می‌دهد. بنابراین، این رویکرد جدید، گامی مهم در بهبود ایمنی تأسیسات صنعتی در برابر تهدیدات عمدی محسوب می‌شود. با اتخاذ راهبردهای پدافند غیرعامل و در نظر گرفتن نتایج این تحقیق، می‌توان به طراحی موانع حفاظتی مؤثرتر و بهبود پروتکل‌های ایمنی در برابر حملات پرتابه کمک کرد. این اقدامات نه تنها خطرات ناشی از حملات را کاهش می‌دهد، بلکه تاب‌آوری تأسیسات را در برابر تهدیدات افزایش می‌دهد.

این تحقیق همچنین به اهمیت توسعه مدل سازی و طراحی موانع فیزیکی و ارزیابی خطرات ناشی از حملات تیراندازی در مقایسه با تحقیقات موجود تأکید می‌کند که بیشتر بر آسیب‌پذیری تجهیزات در برابر حملات انفجاری و آتش‌سوزی متمرکز هستند. درک دقیق از این فواصل به طراحان سیستم‌های حفاظتی این امکان را می‌دهد که راهبردهای مؤثرتری برای کاهش ریسک و جلوگیری از وقوع حوادث تعریف کنند. به علاوه، توسعه مدل سازی و طراحی موانع فیزیکی و ارزیابی خطرات ناشی از حملات تیراندازی می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر در ارزیابی سناریوهای واقعی استفاده شود؛ این سناریوها برای ایجاد و بهینه‌سازی پروتکل‌های امنیتی و حفاظتی حیاتی هستند. با توجه به تهدیدات روزافزون در محیط‌های صنعتی، این رویکرد به درک بهتر خطرات کمک کرده و توانایی طراحی و پیاده‌سازی سیستم‌های حفاظت فیزیکی را تقویت می‌کند تا الزامات ایمنی و استانداردهای بالای صنعتی را برآورده سازد. نهایتاً، این تحقیق با ارائه چارچوبی منسجم و کاربردی، نه تنها به توسعه معیارها و استانداردهای ایمنی کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به عنوان پایه‌گذار تحقیقاتی جدید در زمینه ارزیابی تهدیدات ناشی از تیراندازی در صنایع مختلف عمل کند. این پیشرفت‌ها در نهایت می‌توانند منجر به افزایش سطح آمادگی و مقاومتی تأسیسات در برابر انواع حملات و خطرات شوند و به حفاظت از جان افراد و دارایی‌های ارزشمند کمک کنند. با تأکید بر رویکرد پدافند غیرعامل، می‌توان به ایجاد محیط‌های صنعتی امن‌تر و مقاوم‌تر در برابر تهدیدات اقدام کرد.

برای پژوهش‌های آینده در زمینه تعیین مدل سازی و طراحی موانع فیزیکی و ارزیابی خطرات ناشی از حملات تیراندازی و ارزیابی تهدیدات ناشی از تیراندازی به تأسیسات صنعتی، پیشنهاد می‌شود که تحقیقات به گسترش داده‌های تجربی و انجام آزمایش‌های میدانی بیشتری بپردازند تا تأثیرات نوع پرتابه‌ها و ویژگی‌های هدف به‌دقت بررسی شود. همچنین، توسعه مدل‌های پیشرفته‌تر برای شبیه‌سازی و تحلیل سناریوهای مختلف حملات می‌تواند به شناسایی نقاط ضعف کمک کند و در نتیجه، استراتژی‌های حفاظتی را تقویت نماید. ترکیب فناوری‌های نوین، مانند سیستم‌های مراقبتی و هوش مصنوعی، می‌تواند به شناسایی سریع تهدیدات و واکنش به موقع در برابر آن‌ها کمک کند. علاوه بر این، برگزاری برنامه‌های آموزشی برای کارکنان به منظور افزایش آگاهی و آمادگی در برابر تهدیدات تیراندازی نقش مؤثری در بهبود امنیت تأسیسات صنعتی خواهد داشت. دنبال کردن این مسیرها نه‌تنها به تقویت سیستم‌های حفاظتی منجر می‌شود، بلکه می‌تواند به عنوان نقطه عطفی برای پژوهش‌های بیشتر در این زمینه عمل کند. به‌کارگیری این رویکردهای پدافند غیرعامل، در کنار تأکید بر آموزش و آماده‌سازی، می‌تواند به ایجاد محیط‌های صنعتی ایمن‌تر و مقاوم‌تر در برابر تهدیدات کمک کند و در نهایت، بهره‌وری و امنیت کلی تأسیسات را افزایش دهد.

۶- مراجع

[1] J. F. Murphy, “Safety Considerations in the Chemical Process Industries,” Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology, pp. 1805–1887, 2017, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-52287-6_34.

[2] R. Bun et al., “Tracking unaccounted greenhouse gas emissions due to the war in Ukraine since 2022,” Science of The

Total Environment, pp. 169879–169879, Jan. 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.169879.

[3] M. Iaiani, A. Tugnoli, V. Cozzani, G. Reniers, and M. Yang, "A Bayesian-network approach for assessing the probability of success of physical security attacks to offshore Oil&Gas facilities," Ocean Engineering, vol. 273, p. 114010, Apr. 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114010.

[4] Surendar Varadharajan and S. Bajpai, "Chronicles of security risk assessment in process industries: Past, present and future perspectives," Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol. 84, pp. 105096–105096, Sep. 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105096.

[5] Muhammad, Genserik Reniers, M. Yang, and S. Bajpai, "Risk assessment methods for process safety, process security and resilience in the chemical process industry: A thorough literature review," Journal of loss prevention in the process industries, vol. 88, pp. 105274–105274, Apr. 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105274.

[6] A. Matin, R. Islam, X. Wang, H. Huo, and G. Xu, "AIoT for sustainable manufacturing: Overview, challenges, and opportunities," Internet of things, vol. 24, pp. 100901–100901, Aug. 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100901.

[7] D. Zahra, Aissani Nassima, B. Abdelghani, and Lounis Zoubida, "Risk analysis of petroleum storage tank based on uncertain data incorporated into mapped Bow-tie to Bayesian network," Process Safety and Environmental Protection, Aug. 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.07.114.

[8] H. Hao, K. Bi, W. Chen, T. M. Pham, and J. Li, "Towards next generation design of sustainable, durable, multi-hazard resistant, resilient, and smart civil engineering structures," Engineering Structures, vol. 277, p. 115477, Feb. 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115477.

[9] Sayawu Yakubu Diaba, Miadrezah Shafie-khah, and M. Elmusrati, "Cyber-physical attack and the future energy systems: A review," Energy Reports, vol. 12, pp. 2914–2932, Dec. 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.08.060.

[10] F. Mızrak, "Integrating cybersecurity risk management into strategic management: a comprehensive literature review," Journal of Business, Economics and Finance, vol. 10, no. 3, Sep. 2023, doi: https://doi.org/10.17261/pressacademia.2023.1807.

[11] S. Abdelkader et al., "Securing Modern Power Systems: Implementing Comprehensive Strategies to Enhance Resilience and Reliability Against Cyber-Attacks," Results in Engineering, vol. 23, pp. 102647–102647, Sep. 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102647.

[12] B. Ige, None Eseoghene Kupa, and None Oluwatosin Ilori, "Analyzing defense strategies against cyber risks in the energy sector: Enhancing the security of renewable energy sources," International Journal of Science and Research Archive, vol. 12, no. 1, pp. 2978–2995, Jun. 2024, doi: https://doi.org/10.30574/ijsra.2024.12.1.1186.

[13] Ö. Aslan, S. S. Aktuğ, M. Ozkan-Okay, A. A. Yilmaz, and E. Akin, "A Comprehensive Review of Cyber Security Vulnerabilities, Threats, Attacks, and Solutions," Electronics, vol. 12, no. 6, pp. 1–42, Mar. 2023, doi: https://doi.org/10.3390/electronics12061333.

[14] B. Keyogeg, M. Thompson, G. Dawson, D. Wagner, G. Johnson, and B. Elliott, "Automated Detection of Ransomware in Windows Active Directory Domain Services Using Log Analysis and Machine Learning," Authorea (Authorea), Oct. 2024, doi: https://doi.org/10.22541/au.172779663.36925703/v1.

[15] A. Naseer, H. Naseer, A. Ahmad, S. B. Maynard, and A. M. Siddiqui, "Moving towards agile cybersecurity incident response: a case study exploring the enabling role of big data analytics-embedded dynamic capabilities," Computers & Security, vol. 135, p. 103525, Oct. 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.cose.2023.103525.

[16] E. Riahi and M. Sirajul Islam, "Employees' information security awareness (ISA) in public organisations: insights from cross-cultural studies in Sweden, France, and Tunisia," Behaviour & Information Technology, pp. 1–23, Feb. 2024, doi: https://doi.org/10.1080/0144929x.2024.2311734.

[17] C. Kelshall, S. David, and M. Harron, "Security and the Human Infrastructure," Advanced Sciences and Technologies for Security Applications, pp. 95–278, 2024, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-67608-6_5.

[18] R. Damaševičius, N. Bacanin, and S. Misra, "From Sensors to Safety: Internet of Emergency Services (IoES) for Emergency Response and Disaster Management," Journal of Sensor and Actuator Networks, vol. 12, no. 3, p. 41, Jun. 2023, doi: https://doi.org/10.3390/jsan12030041.

[19] G. MARRONI, Valeria CASSON MORENO, Alessia TORTOLINI, F. TAMBURINI, and G. LANDUCCI, "Assessing the Attractiveness of Chemical and Process Facilities to Terrorism using a Situational Crime Prevention Approach," Journal of loss prevention in the process industries, vol. 89, pp. 105321–105321, Jul. 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105321.

[20] Ali.M. Onaizi et al., "Radiation-Shielding Concrete: A Review of Materials, Performance, and the Impact of Radiation on Concrete Properties," Journal of Building Engineering, pp. 110800–110800, Sep. 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110800.

[21] I. Ali, A. Arslan, S. Tarba, and T. Mainela, "Supply chain resilience to climate change inflicted extreme events in agri-food industry: The role of social capital and network complexity," International Journal of Production Economics, vol. 264, p. 108968, Oct. 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108968.

[22] K. Amini and J. E. Padgett, "Probabilistic risk assessment of hurricane-induced debris impacts on coastal transportation infrastructure," Reliability Engineering & System Safety, vol. 240, pp. 109579–109579, Dec. 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109579.

[23] J. Xie et al., "Enhanced structural damage behavior of liquid-filled tank by reactive material projectile impact," Defence Technology, vol. 31, pp. 211–229, Sep. 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.dt.2023.08.017.

[24] A. Kootala, A. Mousa, and P. W. T. Pong, "Drones are Endangering Energy Critical Infrastructure, and How We Can Deal with This," Energies, vol. 16, no. 14, p. 5521, Jan. 2023, doi: https://doi.org/10.3390/en16145521.

[25] N. Raza and F. Moazeni, "Chance-constrained vulnerability assessment of smart water distribution systems against stealthy false data injection attacks," International Journal of Critical Infrastructure Protection, vol. 44, p. 100645, Mar. 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2023.100645.

[26] B. Farah, M. Pavlova, and W. Groot, "Hospital disaster preparedness in sub-Saharan Africa: a systematic review of English literature," BMC Emergency Medicine, vol. 23, no. 1, Jun. 2023, doi: https://doi.org/10.1186/s12873-023-00843-5.

[27] R. A. Arietti and J. D. Freilich, "Improving the Law Enforcement Response to Active Shooter Incidents: An Analysis of After-Action Reports," Crime & Delinquency, Sep. 2024, doi: https://doi.org/10.1177/00111287241277765.

[28] T. McIntosh et al., "Harnessing GPT-4 for generation of cybersecurity GRC policies: A focus on ransomware attack mitigation," Computers & Security, vol. 134, p. 103424, Nov. 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.cose.2023.103424.

[29] Ketem Hillary Kwambai, "Emergency Preparedness for Guests with Mobility Impairments and Frequency of Visits in Five-Star Hotels in Nairobi City County, Kenya," Journal of Hospitality and Tourism Management, vol. 7, no. 1, pp. 23–45, Feb. 2024, doi: https://doi.org/10.53819/81018102t4252.

[30] R. Liu, B. Becerik-Gerber, and G. M. Lucas, "Effectiveness of VR-based training on improving occupants' response and preparedness for active shooter incidents," Safety Science, vol. 164, p. 106175, Aug. 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106175.

[31] S. Kou et al., "Ablation performance of C/HfC-SiC composites with in-situ HfSi2/HfC/SiC multi-phase coatings under 3000 ℃ oxyacetylene torch," Corrosion Science, vol. 200, pp. 110218–110218, Mar. 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110218.

[32] A. Mojiri, J. L. Zhou, M. Nazari V, S. Rezania, H. Farraji, and M. Vakili, "Biochar enhanced the performance of microalgae/bacteria consortium for insecticides removal from synthetic wastewater," Process Safety and Environmental Protection, vol. 157, pp. 284–296, Jan. 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.11.012.

[33] Y. Meng, Y. Yang, W. Wang, Q. Dou, and T. Suo, "A new technique for performing tortional split Hopkinson bar experiments at high temperatures," International Journal of Impact Engineering, vol. 168, p. 104314, Oct. 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104314.

[34] Y.-Q. Zhang, M. Lykaki, M. Markiewicz, M. T. Alrajoula, C. Kraas, and S. Stolte, "Environmental contamination by microplastics originating from textiles: Emission, transport, fate and toxicity," Journal of Hazardous Materials, vol. 430, p. 128453, May 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128453.

[35] Y. Qu et al., "Controllable synthesis of a sponge-like Z-scheme N,S-CQDs/Bi2MoO6@TiO2 film with enhanced photocatalytic and antimicrobial activity under visible/NIR light irradiation," Journal of Hazardous Materials, vol. 429, p. 128310, May 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128310.

[36] Z. Zhang, H. Guo, P. Gao, Y. Wang, and Y. Fang, "Impact of owners' safety management behavior on construction workers' unsafe behavior," Safety Science, vol. 158, p. 105944, Feb. 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105944.

[37] G. A. Cisterna, A. A. Acuña-Duarte, and C. A. Salazar, "Government performance, geophysical-related disasters, and institutional trust: A comparison of Chilean and Haitian responses after an earthquake," International Journal of Disaster Risk Reduction, p. 102950, Apr. 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.102950.

[38] K. Zhou, Q.-S. Li, and X. Li, "Dynamic Behavior of Supertall Building with Active Control System during Super Typhoon Mangkhut," Journal of Structural Engineering, vol. 146, no. 5, p. 04020077, May 2020, doi: https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002626.

[39] D. D. Ben et al., "Fatigue crack growth behavior in additive manufactured Ti6Al4V alloy with intentionally embedded spherical defect," Materials Science and Engineering A, vol. 885, pp. 145612–145612, Aug. 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145612.

[40] X. Wang, J.-K. Ahn, O.-S. Kwon, R. E. Kim, and I. Yeo, "Development of Temperature and Constraint-Dependent Column Demand-Capacity Curves and Their Validation through Hybrid Fire Simulations," Journal of Structural Engineering, vol. 147, no. 4, Apr. 2021, doi: https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002974.

[41] P. Muruganandhan et al., "Investigation on silane modification and interfacial UV aging of flax fibre reinforced with polystyrene composite," Materials Today Proceedings, Mar. 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.272.

[42] L. Jin, M. Xia, R. Zhang, M. Lin, and X. Du, "Computational modeling and dynamic response of reinforced concrete shear wall under out-of-plane impact loading," International Journal of Impact Engineering, vol. 172, pp. 104425–104425, Oct. 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104425.

[43] A. J. Andrews et al., "Characterization of surface cratering and particle deformation during high speed microparticle impact events," International Journal of Impact Engineering, vol. 180, p. 104682, Oct. 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104682.

[44] V. Kumar, Mukesh Bajya, A. Majumdar, and D. K. Dubey, "Design of cost-effective hybrid soft armour panels by strategic replacement of backing layers with a non-ballistic material: A parametric study," International Journal of Impact Engineering, vol. 180, pp. 104678–104678, May 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104678.

[45] J. B. Liao, M. Wang, and H. M. Wen, "A dynamic constitutive model for carbon nanotubes (CNTs) modified unidirectional fibre reinforced plastic laminates," International Journal of Impact Engineering, vol. 183, p. 104793, Jan. 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104793.

[46] M. Ayyad, M. R. Hajj, and Reza Marsooli, "Spatial Variation in Sensitivity of Hurricane Surge Characteristics to Hurricane Parameters," Journal of Engineering Mechanics, vol. 147, no. 10, Jul. 2021, doi: https://doi.org/10.1061/(asce)em.1943-7889.0001984.

[47] M. Xu et al., "In-situ TEM observations on interaction of basal dislocations and β′ phases in a Mg–Gd binary alloy," Materials Science and Engineering A, vol. 841, pp. 143017–143017, Mar. 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143017.

[48] H. Kawamoto, K. Hata, and T. Shibata, "Vertical Transport of Lunar Regolith and Ice Particles Using Electrodynamic Traveling Wave," Journal of Aerospace Engineering, vol. 34, no. 4, Jul. 2021, doi: https://doi.org/10.1061/(asce)as.1943-5525.0001297.

[49] D. Wang, J. Huang, C. Tan, W. Ma, Y. Zou, and Y. Yang, "Mechanical and corrosion properties of additively manufactured SiC-reinforced stainless steel," Materials Science and Engineering: A, vol. 841, pp. 143018–143018, Apr. 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143018.

[50] Ryuta Akasaka et al., "PAR2-dependent phosphorylation of TRPV4 at the trigeminal nerve terminals contributes to tongue cancer pain," Journal of Oral Biosciences, vol. 65, no. 4, pp. 356–364, Oct. 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.job.2023.10.003.

[51] N. Meurisse, B. G. Marcot, O. Woodberry, B. I. P. Barratt, and J. H. Todd, "Risk Analysis Frameworks Used in Biological Control and Introduction of a Novel Bayesian Network Tool," Risk Analysis, Aug. 2021, doi: https://doi.org/10.1111/risa.13812.