

Research Paper**The Role of Retrofitting in Improving the Seismic Resilience of Aboveground Steel Liquid Storage Tanks**Amirhossein Jamalpour¹, Mehran Seyed Razzaghi^{*2}, Masood Yakhchalian²

1- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

**Citation:** Jamalpour, A.H., Seyed Razaghi, M., and Yakhchalian, M. (2026), "The Role of Retrofitting in Improving the Seismic Resilience of Aboveground Steel Liquid Storage Tanks", *Journal of Steel and Structures*, 20(52), pp.(34-56). (In Persian) [10.22034/jss.2026.586996.1044](https://doi.org/10.22034/jss.2026.586996.1044)**Article info:****Article History:****Received:** 6 January 2026**Revised:** 17 March 2026**Accepted:** 20 March 2026**Published:** 22 June 2026**Keywords:**Seismic Resilience
Ground-Supported Steel Tanks
Anchorage Condition
Nonlinear Seismic Response
Damage Assessment**ABSTRACT**

Background: Aboveground steel storage tanks are critical infrastructure in the oil, gas, and petrochemical industries, and maintaining their safe operation following an earthquake is of particular importance from economic, environmental, and safety perspectives. One of the main factors contributing to the seismic vulnerability of these tanks is their connection to the foundation and the potential for base uplift. In unanchored tanks, base uplift can lead to stress concentration, undesirable deformations, local buckling of the shell and bottom plate, reduced operational capacity, and even leakage of hazardous materials. Therefore, evaluating effective measures to control this phenomenon and improve the seismic resilience of storage tanks is an important aspect of performance-based design. This study investigates the effect of a mechanical anchorage system on the seismic performance and resilience of aboveground steel storage tanks and compares its effectiveness with that of an unanchored tank under different seismic hazard levels.

Methods: The seismic behavior of an aboveground steel storage tank equipped with a mechanical anchorage system was investigated and compared with that of a similar unanchored tank. Performance was evaluated through seismic analyses at different hazard levels to assess the effects of anchorage on structural response, vulnerability, and the ability to maintain or recover operational performance. Three hazard levels corresponding to return periods of 75, 475, and 975 years were considered. The main evaluation criteria included functional performance, structural damage severity, operational stability, and the ability of the tank to return to its operational condition following an earthquake.

Results: The results showed that at the 75-year hazard level, no significant difference was observed between the anchored and unanchored tanks, and both configurations exhibited acceptable performance. At the 475-year design-level hazard, the unanchored tank experienced an approximately 4%–6% reduction in functional performance, whereas the mechanically anchored tank maintained operational stability. At the 975-year hazard level, the unanchored tank suffered severe structural damage, making repair economically impractical. In contrast, the anchored tank remained in a recoverable state and was able to recover its initial operational performance after repair.

Conclusion: The results indicate that the use of a mechanical anchorage system improves the seismic performance and resilience of aboveground steel storage tanks by reducing base uplift and limiting local shell damage. Therefore, mechanical anchorage can be considered an effective strategy for the seismic design and retrofit of storage tanks, particularly in areas with moderate to high seismic hazard.

* Corresponding Author's E-mail: Mehran.razzaghi@iaui.ac.irCopyright for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Iranian Society of Steel Structures Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Introduction

Aboveground steel liquid storage tanks are among the most important components of civil and industrial infrastructure, since they play a vital role in the storage and distribution of water, fuel, and other essential liquids required for normal operation and post-earthquake emergency response. Seismic damage to such tanks may lead not only to structural failure, but also to severe functional disruption, economic loss, environmental consequences, and delay in service recovery. For this reason, the seismic performance of steel tanks has long been an important topic in earthquake engineering research. Previous studies have extensively investigated the dynamic behavior of anchored and unanchored tanks under earthquake excitation and have highlighted critical response mechanisms such as hydrodynamic pressure, sloshing, shell buckling, uplift, and base instability. Nevertheless, many of these studies have primarily focused on demand parameters and local failure modes, while less attention has been given to the broader concept of seismic resilience. In recent years, resilience-based assessment has emerged as an important framework for evaluating structural systems not only in terms of their ability to withstand seismic loading, but also in terms of their capacity to limit damage, maintain functionality, and recover rapidly after an earthquake. In this context, the anchorage condition of steel tanks can be regarded as a major parameter affecting both structural response and post-earthquake performance. However, the specific effect of tank anchorage on resilience-oriented performance has not yet been sufficiently clarified. Therefore, the present study aims to evaluate the influence of anchorage condition on the seismic resilience of aboveground steel tanks. The novelty of the study lies in linking the seismic response characteristics of anchored and unanchored tanks to resilience-related indicators, thereby providing a more comprehensive engineering interpretation of the role of base restraint in tank performance..

Methods

In this study, the seismic behavior of representative aboveground steel liquid storage tanks was evaluated under different anchorage conditions in order to assess their resilience performance. Two configurations of the same tank were considered: anchored and unanchored. so that the effect of base restraint on seismic response and post-damage consequences could be clearly identified. The numerical modeling framework was developed based on accepted principles of tank dynamics and fluid-structure interaction, in which The contained liquid was represented using an added-mass approach that primarily accounts for the impulsive component of the hydrodynamic response. This modeling approach enabled the simulation of the main dynamic characteristics of the tank-liquid system while preserving the essential features governing earthquake response. The structural model was established to capture the critical nonlinear mechanisms associated with seismic loading, especially those related to uplift behavior, stress concentration near the shell-base connection, and changes in load transfer caused by anchorage condition. A set of earthquake ground motion records was selected as input for nonlinear dynamic analysis, and the records were scaled in a consistent manner to ensure meaningful comparison between the considered cases. Response-history analyses were then carried out to obtain the main engineering demand parameters relevant to tank performance, such as overturning effects, base-related demands, deformation response, and other damage-sensitive response quantities. In the subsequent stage, the analytical results were interpreted within a resilience-oriented framework. The estimated seismic demands were related to probable damage states and their associated consequences, including repair needs, expected functional impairment, and implications for post-earthquake recovery. In this way, the adopted methodology integrated structural response assessment with damage and

consequence evaluation, allowing the effect of anchorage on seismic resilience to be investigated in a systematic and engineering-based manner.

Results

The results show that the anchorage condition significantly influences the seismic response and resilience performance of ground-supported steel tanks. The unanchored configuration exhibited a more pronounced nonlinear response due to uplift and repeated separation-contact behavior at the base, which modified the overall force transfer mechanism and increased the concentration of local demand in critical regions. This type of response can increase the likelihood of localized damage, particularly in the shell-bottom connection zone, and may consequently lead to greater repair requirements and longer recovery time after a strong earthquake. Although unanchored behavior may reduce some force components through partial uplift, the resulting local deformation and instability-related effects can adversely affect structural integrity and operational continuity. In contrast, the anchored tanks generally showed a more stable response pattern and better control of excessive deformation demands. The restraint provided by anchorage reduced uplift susceptibility and improved the overall distribution of seismic demand, leading to a lower probability of severe local damage. From the viewpoint of seismic resilience, this distinction is particularly important because resilience depends not only on whether collapse is prevented, but also on the extent of physical damage, the severity of functional loss, and the time required for restoration of service. The analyses indicate that anchored tanks have a greater potential to maintain post-earthquake functionality and to reduce interruption in the operation of essential liquid storage systems. The beneficial effect of anchorage also becomes more evident at higher seismic intensity levels, where nonlinear mechanisms in unanchored tanks become increasingly dominant. These findings are consistent with the general understanding that support condition strongly affects tank vulnerability, but the present study extends that understanding by explicitly showing how anchorage influences resilience-related outcomes. Therefore,

anchorage should be regarded not only as a structural detailing measure, but also as a key design variable in resilience-based assessment and retrofit planning of steel liquid storage tanks.

Conclusion

The present study investigated the effect of anchorage condition on the seismic resilience of ground-supported steel liquid storage tanks through a response-based and resilience-oriented analytical framework. The results demonstrated that base restraint has a decisive role in controlling seismic behavior, damage tendency, and expected post-earthquake performance. Unanchored tanks were found to be more vulnerable to uplift-induced nonlinear response and localized damage concentration, which may increase repair demand and reduce recovery efficiency. By contrast, anchored tanks exhibited more stable seismic performance, lower vulnerability to critical damage, and improved potential for maintaining service continuity after earthquake events. The main contribution of this study is the explicit integration of anchorage-related response characteristics with resilience-based interpretation, which provides a broader and more practical basis for performance evaluation of steel tanks. The findings suggest that anchorage design should be considered not only from the perspective of strength and stability, but also in relation to damage mitigation, operational reliability, and rapid recovery of infrastructure systems. From an engineering standpoint, the results may support decision-making in seismic design and retrofit of steel storage tanks, especially where such facilities are part of essential lifeline networks. Future research may expand this framework by incorporating more detailed recovery models, a wider range of tank geometries, soil-structure interaction effects, and quantitative economic loss assessment.

Declaration of Generative AI and AI-assisted Technologies in the Writing Process

Authors should disclose the use of generative AI and AI-assisted technologies in the

preparation of the manuscript. The disclosure statement should be placed before the References section.

Example: "During the preparation of this work, the author(s) used [NAME TOOL/SERVICE] in order to [REASON]. After using this tool/service, the author(s) reviewed and edited the content as needed and take full responsibility for the content of the publication."

This declaration does not apply to the use of basic tools for grammar checking, spelling correction, or reference management.

Ethical Consideration

Compliance with ethical guidelines

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Author's contributions

First Author: Investigation, Methodology, Modeling, Questionnaire design, Data analysis, and Writing-original draft preparation.

Second Author: Study design, Supervision (modeling, analysis, and questionnaire), Reviewing and validating the results, and Writing-review and editing.

Third Author: Study design, Supervision, and Reviewing and validating the results.

Conflicts of interest

The authors declare no conflict of interest.

نقش مقاوم سازی در بهبود تاب آوری لرزه ای مخازن فولادی روزمینی ذخیره مایعات

امیرحسین جمالپور^۱، مهران سیدرزاقی^{۲*}، مسعود یخچالیان^۲

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

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



Citation: Jamalpour, A.H., Seyed Razaghi, M., and Yakhchalian, M. (2026), "The Role of Retrofitting in Improving the Seismic Resilience of Aboveground Steel Liquid Storage Tanks", *Journal of Steel and Structures*, 20(52), pp.(34-56). (In Persian)

doi 10.22034/jss.2026.586996.1044

چکیده

زمینه پژوهش: مخازن فولادی زمینی ازجمله زیرساخت های حیاتی در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی هستند که تداوم بهره برداری ایمن از آن ها پس از زلزله، از منظر اقتصادی، زیست محیطی و ایمنی، اهمیت ویژه ای دارد. یکی از عوامل اصلی مؤثر بر آسیب پذیری لرزه ای این مخازن، نحوه اتصال آن ها به پی و امکان وقوع بلندشدگی در ناحیه پایه است. در مخازن مهارنشده، بلندشدگی پایه می تواند موجب تمرکز تنش، بروز تغییر شکل های نامطلوب، کماتش موضعی جداره و کف، کاهش ظرفیت بهره برداری و حتی نشت مواد خطرناک شود. از این رو، ارزیابی راهکارهای مؤثر برای کنترل این پدیده و ارتقای تاب آوری لرزه ای مخازن، از مباحث مهم در طراحی عملکردمحور به شمار می آید. هدف این پژوهش، بررسی اثر سیستم مهار مکانیکی بر بهبود رفتار لرزه ای و افزایش تاب آوری مخازن فولادی زمینی و مقایسه عملکرد آن با مخازن مهارنشده در سطوح مختلف خطر لرزه ای است.

روش پژوهش: در این پژوهش، رفتار لرزه ای یک مخزن فولادی زمینی مجهز به سیستم مهار مکانیکی مطالعه و با نمونه مشابه مهارنشده مقایسه شد. ارزیابی عملکرد با انجام تحلیل های لرزه ای در سطوح مختلف خطر صورت گرفت تا میزان تأثیر سیستم مهار بر پاسخ سازه، سطح آسیب پذیری و قابلیت حفظ یا بازیابی عملکرد مشخص شود. به این منظور، سه سطح خطر متناظر با دوره های بازگشت ۷۵، ۴۷۵ و ۹۷۵ ساله در نظر گرفته شد. معیارهای اصلی ارزیابی شامل حفظ بازده عملکردی، شدت آسیب های سازه ای، پایداری عملیاتی و امکان بازگشت مخزن به شرایط بهره برداری پس از زلزله بود.

یافته ها: نتایج نشان داد در سطح خطر با دوره بازگشت ۷۵ ساله، تفاوت معناداری میان عملکرد مخازن مهارنشده و مهارنشده مشاهده نمی شود و هر دو سامانه رفتار قابل قبولی دارند. با این حال، در سطح طراحی پایه با دوره بازگشت ۴۷۵ ساله، مخازن مهارنشده با افت عملکردی در حدود ۴ تا ۶ درصد مواجه شدند، در حالی که مخازن مجهز به مهار مکانیکی پایداری عملیاتی خود را حفظ نمودند. همچنین در سطح خطر ۹۷۵ ساله، مخازن مهارنشده دچار آسیب های شدید سازه ای و خساراتی شدند که بازسازی آن ها از نظر اقتصادی نامطلوب ارزیابی شد؛ در مقابل، مخازن مهارشده تنها وارد مرحله بازیابی شدند و پس از انجام تعمیرات، قابلیت بازگشت به عملکرد اولیه را حفظ کردند.

نتیجه گیری: بر اساس نتایج این پژوهش، استفاده از سیستم مهار مکانیکی با کاهش بلندشدگی پایه و محدود نمودن آسیب های موضعی جداره، موجب بهبود عملکرد لرزه ای و ارتقای تاب آوری مخازن فولادی زمینی می شود. از این رو، به کارگیری این سیستم می تواند به عنوان راهکاری مؤثر در طراحی و بهسازی لرزه ای مخازن، به ویژه در مناطق با خطر لرزه ای متوسط و زیاد، مورد توجه قرار گیرد.

اطلاعات مقاله:

سابقه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۶ دی ماه ۱۴۰۴

تاریخ بازنگری: ۲۶ اسفند ماه ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۲۹ اسفند ماه ۱۴۰۴

تاریخ انتشار: ۱ تیر ماه ۱۴۰۵

واژگان کلیدی:

مهار ناکافی
خازن فولادی زمینی
عملکرد لرزه ای
تاب آوری
بلندشدگی مخزن
تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA)

* آدرس ایمیل نویسنده مسئول: Mehran.razzaghi@iau.ac.ir

حقوق نشر این مقاله برای نویسنده (گان) محفوظ است و حقوق انتشار آن به انتشارات انجمن سازه های فولادی ایران واگذار شده است. محتوای این مقاله تابع قوانین و شرایط مجوز بین المللی Creative Commons Attribution 4.0 (CC-BY-NC 4.0) می باشد. برای اطلاعات بیشتر، لطفاً به وبسایت

مربوطه مراجعه فرمایید. <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>



۱- مقدمه

تاب آوری لرزه‌ای را می‌توان به عنوان قابلیت یک سازه برای رسیدن به سطحی از عملکرد در یک دوره زمانی که در معرض رخداد لرزه ای قرار گرفته، در نظر گرفت و آن را به صورت رابطه (۱) تعریف کرد [۷].

$$R = \int_{T_{OE}}^{T_{OE}+T_{LC}} \frac{Q(t)}{T_{LC}} dt \quad (1)$$

که (T_{OE}) زمان وقوع رخداد لرزه‌ای و (T_{LC}) دوره زمانی مورد نظر برای ارزیابی است. تابع عملکرد $(Q(t))$ فرآیندی تصادفی است که حداکثر مقدار آن برابر با واحد (سطح عملکرد ۱۰۰٪) در نظر گرفته می‌شود. مطابق رابطه (۲)، این تابع بر اساس میزان خسارت وارده $(L(t))$ تعریف می‌شود:

$$Q(t) = [1 - L(t)] \quad (2)$$

تابع خسارت $L(t)$ که در رابطه (۳) ارائه شده است، از مجموع تلفات مستقیم L_D و تلفات غیرمستقیم L_I تشکیل می‌شود:

$$L(t) = L_D(t) + \alpha_1 L_I(t) \quad (3)$$

تلفات مستقیم اقتصادی L_{DE} که ناشی از آسیب‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای است، به صورت نسبت هزینه تعمیر به هزینه جایگزینی سازه در رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$L_{DE} = \sum_{j=1}^n P_j \times \left(\frac{C_{s,j}}{I_s} \right) \quad (4)$$

که (P_j) احتمال وقوع حالت حدی j (تابع شکنندگی)، $(C_{s,j})$ هزینه تعمیر مربوطه و (I_s) هزینه جایگزینی است. در نهایت کل تلفات مستقیم با استفاده از میانگین وزنی اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای (W_k) طبق رابطه (۵) محاسبه می‌شود [۸].

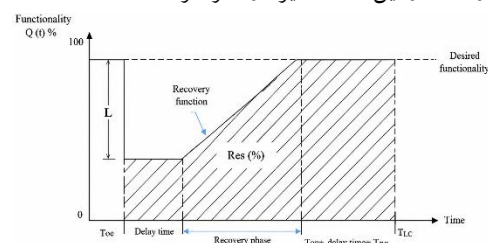
$$L_{DE, total} = \sum_{k=1}^n w_k \times L_{DE, k} \quad (5)$$

فرآیند بازسازی پیچیده و تحت تأثیر متغیرهای متعددی از جمله عوامل وابسته به مکان و زمان است. در این سناریو، ارزیابی

مخازن فولادی ذخیره سازی به عنوان سازه‌های حیاتی در صنایع مختلف از جمله پتروشیمی هستند که اغلب مهارنشده و به شدت در برابر بارهای لرزه‌ای آسیب پذیرند. آسیب به این سازه‌ها می‌تواند عواقب فاجعه باری به دنبال داشته باشد. بررسی خرابی‌های مخازن در زلزله‌های اخیر نشان می‌دهد که آسیب به سازه مخزن ممکن است به صورت کماتش الاستیک (تغییر شکل پوسته فوقانی)، کماتش پافیلی (کوماتش ورق‌های پایینی مخزن)، نشست مواد و یا حتی فروپاشی کامل مخزن ظاهر شود. یکی از روش‌های متداول برای مهار نمودن مخازن به زمین، استفاده از میل مهارهای مکانیکی است [۱ و ۲].

مفهوم تاب آوری^۱ ابتدا در علوم روان شناسی مطرح شد [۳]؛ اما امروزه در حوزه‌های متعددی از جمله علوم اجتماعی، مدیریت ریسک و مهندسی کاربرد گسترده‌ای یافته است. پژوهشگران بسیاری در این زمینه‌ها، تاب آوری را به عنوان مفهومی پویا همراه با عدم قطعیت‌های فراوان بررسی کرده‌اند [۴]. به طور کلی، تاب آوری یک سازه به توانایی آن در تحمل رویدادهای طبیعی یا غیرطبیعی، کاهش خسارات احتمالی و بازگشت به شرایط عملکردی اولیه اشاره دارد [۵].

از نظر ریاضی، تاب آوری (R) به صورت تابعی تعریف می‌شود که توانایی سازه برای حفظ سطح عملکرد در طول یک دوره زمانی را بیان می‌کند [۶]. شکل (۱) نمودار شماتیک تاب آوری در برابر رویدادها را نشان می‌دهد که در آن محور عمودی بیانگر عملکرد سازه و محور افقی نمایانگر زمان است. پیش از وقوع رویداد (مثلاً زلزله)، عملکرد سازه در سطح ۱۰۰٪ قرار دارد. در این نمودار، T_{OE} زمان وقوع رویداد است که منجر به کاهش عملکرد سازه می‌شود؛ TRE نشان دهنده زمان بازسازی پس از رویداد و TLC بیانگر زمان کنترل است که برای ارزیابی تاب آوری مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین، L_L تابع آسیب و ضرر را نشان می‌دهد. بین زمان وقوع رویداد و شروع عملیات بازسازی، یک زمان تأخیر وجود دارد که در این مطالعه نیز در نظر گرفته شده است [۵].



شکل ۱- نمودار گرافیکی تاب آوری [۵]

¹ Resilience

سیال-سازه، شناخت مودهای خرابی، و بهره‌گیری از راهکارهایی مانند جداسازی پایه، ائتلاف انرژی و طراحی مبتنی بر عملکرد برای بهبود ایمنی لرزه‌ای این سامانه‌ها تأکید نمودند [۱۲].

در مطالعات اولیه، تمرکز اصلی بر شناسایی رفتار لرزه‌ای مخازن و آسیب‌های مشاهده‌شده در زلزله‌های گذشته بود. در این راستا، همدان^۳ عملکرد لرزه‌ای مخازن استوانه‌ای فولادی حاوی مایع را بررسی و انواع آسیب‌های وارد بر مخازن مهارشده و مهارنشده را گزارش کرد [۱۳].

همچنین، اوزدمیر^۴ و همکاران با ارزیابی عددی پاسخ غیرخطی مخازن استوانه‌ای عریض تحت تحریک چندبعدی زلزله نشان دادند که برای مشخصات مخزن و سیال مورد مطالعه، مخزن مهارنشده نسبت به مخزن مهارشده با شرایط گیرداری ایده‌آل، برش پایه و لنگر واژگونی کمتر، اعوجاج محدودتر و تغییرشکل‌های شعاعی و پلاستیک کمتری را تجربه می‌کند و از این رو می‌تواند عملکرد لرزه‌ای مناسب‌تری از خود نشان دهد [۱۴].

در ادامه، علم‌زاده و شکیب نیز نشان دادند که استفاده از سازوکار گهواره‌ای به‌عنوان یک راهکار کاهش تقاضای لرزه‌ای می‌تواند پاسخ‌های نیرویی نظیر برش پایه و لنگر واژگونی را در مخازن فولادی باریک بین ۹ تا ۲۶ درصد کاهش دهد، بدون آن‌که اثر قابل‌توجهی بر تغییر مکان‌ها داشته باشد [۱۵].

افزون بر این، ویرلا^۵ و همکاران در مجموعه‌ای از مطالعات، رفتار مخازن فولادی مهارشده را از منظر فشار هیدرودینامیکی، مدل‌سازی جرم افزوده^۶، کماتش دینامیکی و اثر نسبت ارتفاع به قطر بررسی نمودند [۱۶-۱۸].

با توسعه مدل‌سازی‌های عددی، نقش اندرکنش سیال-سازه و غیرخطی‌های هندسی و مصالح با دقت بیشتری بررسی شد. در این زمینه، فان^۷ و پائولاچی^۸ نشان دادند که رفتار لرزه‌ای مخازن فولادی به‌دلیل اندرکنش پیچیده سیال-سازه و بروز پدیده‌های غیرخطی مانند نوسان سطح آزاد، لغزش و بلندشدگی، به‌مراتب پیچیده‌تر از سازه‌های متعارف است. نتایج آن‌ها بیانگر آن بود که مدل‌های دقیق اندرکنش سیال-سازه، به‌ویژه برای مخازن بدون مهار، در بازنمایی پاسخ واقعی، عملکرد مناسب‌تری نسبت به مدل‌های ساده‌شده مبتنی بر جرم متمرکز دارند [۱۹].

جامعی از آسیب‌های سازه‌ای انجام و پس از ارزیابی کامل خسارات، بازسازی و تعمیر اجزای آسیب‌دیده اجرا می‌شود. پس از این بهسازی‌ها و تعمیرات، سازه به عملکرد اولیه خود بازمی‌گردد. اگرچه در برخی مطالعات، منحنی بازایی به‌صورت مدل خطی و مدل‌های غیرخطی مانند سهموی، مثلثاتی و ... نمایش داده می‌شود [۹-۱۱]؛ در این مطالعه، با توجه به ماهیت خاص سازه مورد بررسی، یعنی مخزن فولادی زمینی مهارنشده/مهارشده، و با در نظر گرفتن این موضوع که این نوع سازه‌ها در طول عمر مفید خود به‌صورت دوره‌ای و ماهانه مورد ارزیابی و بازرسی قرار می‌گیرند، از اثر نرخ استهلاک و آسیب‌های غیرسازه‌ای صرف‌نظر شده است. بنابراین، در محاسبه شاخص تاب‌آوری، تنها آسیب‌های سازه‌ای ناشی از زلزله مورد بررسی قرار می‌گیرند. همچنین، به‌منظور ساده‌سازی فرآیند ارزیابی بازایی عملکرد، تابع بازایی به‌صورت خطی در نظر گرفته شده است.

با توجه به نقش حیاتی مخازن فولادی در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی و پیامدهای گسترده آسیب به این زیرساخت‌ها، ارزیابی جامع رفتار لرزه‌ای و تاب‌آوری آن‌ها از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. در این میان، به‌کارگیری سیستم‌های مهار مکانیکی به‌عنوان راهکاری مؤثر در جهت کاهش آسیب‌پذیری^۱ و ارتقای عملکرد لرزه‌ای مخازن مطرح می‌شود. بر این اساس، پژوهش حاضر به بررسی رفتار لرزه‌ای یک مخزن فولادی ذخیره‌سازی مجهز به سیستم مهار مکانیکی اختصاص یافته و نتایج حاصل از آن با عملکرد یک مخزن فاقد مهار مقایسه شده است. هدف اصلی این مقایسه، ارزیابی تأثیر سیستم مهار بر تاب‌آوری و عملکرد کلی سازه در شرایط لرزه‌ای است.

۱-۱- پیشینه تحقیق

پژوهش‌های متعددی در زمینه رفتار، عملکرد و ارزیابی لرزه‌ای مخازن فولادی روزمینی انجام شده است. در سال‌های اخیر، این مطالعات از بررسی صرف مودهای خرابی و پاسخ دینامیکی مخازن فراتر رفته و به سمت ارزیابی آسیب‌پذیری، شکنندگی و تاب‌آوری لرزه‌ای توسعه یافته‌اند. در یک مطالعه مروری جامع، ولیکوس^۲ و همکاران پیشرفت‌های اخیر در تحلیل و طراحی لرزه‌ای مخازن ذخیره مایع را بررسی کردند و بر اهمیت اندرکنش

³ Hamdan

⁴ Ozdemir

⁵ Virella

⁶ Added Mass

⁷ Phan

⁸ Paolacci

¹ Vulnerability

² Volikos

پایه کاملاً صلب می‌تواند به برآوردی غیرواقع‌بینانه از آسیب‌پذیری مخزن منجر شود [۲۵].

افزون بر این، نادری و همکاران با بررسی عددی اثر خوردگی تصادفی بر عملکرد لرزه‌ای یک مخزن فولادی بدون مهار نشان دادند که خوردگی غیریکنواخت، در مقایسه با خوردگی یکنواخت، موجب افزایش بیش‌تر پریود اصلی و کاهش محسوس‌تر ظرفیت کماتش لرزه‌ای پوسته می‌شود، هرچند تأثیر آن بر میزان بلندشدگی مخزن چندان قابل‌توجه نیست [۲۶].

هم‌زمان، مطالعات گسترده‌ای در زمینه آسیب‌پذیری و شکنندگی لرزه‌ای مخازن انجام شده است. سیدرزاقی و همکاران منحنی‌های آسیب‌پذیری مخازن فولادی ذخیره مایع را بر اساس نسبت ارتفاع به قطر توسعه دادند [۲۷].

جرمان^۶ و همکاران کماتش دینامیکی پوسته مخزن فولادی مهارشده را به‌صورت عددی بررسی نمودند [۲۸] و فان و همکاران نیز با درنظرگرفتن نقص‌های هندسی و ساخت، منحنی‌های شکنندگی مخازن فولادی مهارشده را ارائه دادند [۲۹]. افزون بر این، سیدرزاقی و میلادی اثر ارتفاع سیال را بر خرابی و عملکرد لرزه‌ای مخازن مهارشده ارزیابی کردند [۳۰].

واسکس مونیوس^۷ و دولشک^۸ یک مدل پارامتریک برای شکنندگی کماتش پافیلی در مخازن فولادی مهارشده ارائه کردند و نشان دادند که پارامترهای هندسی مخزن و ویژگی‌های ساختگاه، نقش تعیین‌کننده‌ای در احتمال وقوع این مود خرابی دارند [۳۱].

مورنو^۹ و همکاران نیز با مقایسه ضوابط آیین‌نامه‌ای و تحلیل اجزای محدود نشان دادند که روش‌های ساده‌شده طراحی ممکن است در برآورد ظرفیت کماتش مخازن بزرگ‌مقیاس دقت کافی نداشته باشند و استفاده از مدل‌سازی غیرخطی پیشرفته برای ارزیابی واقع‌بینانه شکنندگی ضروری است [۳۲].

در حوزه مطالعات کاربردی، یزدانیان و همکاران آسیب‌های واردشده به مخازن در زلزله‌های نیوزیلند را بررسی کردند [۳۳]. همچنین، دریاورساری^{۱۰} و ناسیمبینه با بررسی طراحی مخازن فولادی بر اساس API 650 و استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی نشان دادند که ضخامت‌های به‌دست‌آمده از روابط خطی این استاندارد برای پاسخ‌گویی به تقاضاهای واقعی لرزه‌ای کافی نیست

همچنین، برونزی^۱ و ناسیمبینه^۲ با ارائه یک مدل عددی غیرخطی، رفتار لرزه‌ای مخازن فولادی حاوی مایع را با درنظرگرفتن اندرکنش سیال-سازه بررسی کردند و نشان دادند که ویژگی‌های هندسی مخزن نقش مهمی در فشار هیدرودینامیکی، تمرکز تنش و احتمال کماتش دیواره دارند [۲۰].

بخش مهمی از مطالعات بعدی به بررسی مودهای خرابی و تفاوت پاسخ مخازن مهارشده و مهارنشده اختصاص یافت. باکالیس^۳ و کارامانوس^۴ نشان دادند که در مخازن مهارنشده، بلندشدگی پایه اگرچه می‌تواند بخشی از تقاضای اینرسی را کاهش دهد، اما موجب تمرکز تنش‌های فشاری در ناحیه پایینی پوسته شده و احتمال بروز کماتش موضعی را افزایش می‌دهد [۲۱].

همچنین، نیازی و همکاران با بررسی رفتار کماتش مخازن استوانه‌ای مهارنشده تحت زلزله‌های سه‌بعدی حوزه نزدیک گزارش کردند که ترکیب مؤلفه‌های مختلف حرکت زمین، به‌ویژه در حضور بلندشدگی، می‌تواند وقوع مودهای پیچیده‌تری از کماتش را در نواحی فوقانی و تحتانی جداره تشدید کند [۲۲].

در همین راستا، میلادی و همکاران نیز نشان دادند که نقص‌های اولیه هندسی، اگرچه تأثیر چندان‌نی بر میزان بلندشدگی مخزن ندارند، اما می‌توانند ظرفیت کماتشی پوسته را به‌طور محسوسی کاهش دهند و کماتش الاستیک، کماتش غیرالاستیک و بلندشدگی را به‌عنوان مهم‌ترین مودهای رفتاری این مخازن معرفی کردند [۲۳].

در کنار این مطالعات، اثر برخی عوامل کاهنده ظرفیت لرزه‌ای نیز بررسی شده است. حسین‌زاده و معصومی با مطالعه مخازن فولادی مهارنشده در تأسیسات نفتی نشان دادند که در نظرگرفتن ارتفاع آزاد سیال معادل ۱۳ درصد ارتفاع مخزن می‌تواند احتمال آسیب سقف ناشی از تلاطم را به‌طور مؤثری کاهش دهد و نیز ناپایداری این مخازن در نسبت‌های بالاتر H/D را برجسته کردند [۲۴].

همچنین، کیل‌داشتی^۵ و همکاران با بررسی عددی مخازن فولادی مهارشده نشان دادند که درنظرگرفتن انعطاف‌پذیری سیستم مهار، پاسخ لرزه‌ای مخزن را تشدید کرده و ظرفیت لرزه‌ای آن را نسبت به حالت پایه گیردار کاهش می‌دهد؛ بنابراین، فرض

⁶ Djermane

⁷ Vasquez Munoz

⁸ Dolšek

⁹ Moreno

¹⁰ Daryavarsari

¹ Brunesi

² Nascimbene

³ Bakalis

⁴ Karamanos

⁵ Kildashti

و بر بروز کمناش پافیلی و لزوم استفاده از تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی در طراحی لرزه‌ای مخازن تأکید کردند [۳۴].

در حوزه بهسازی نیز سیدرزاقی و همکاران مقاومت سازی مخازن فولادی مهارنشده با میل مهارهای فولادی و آلیاژهای حافظه‌دار شکلی را مقایسه کردند و نشان دادند که استفاده از میل مهارهای SMA می‌تواند آسیب وارد بر سازه و سامانه مهاری را کاهش دهد [۳۵].

علاوه بر این، آنوپ^۱ و همکاران نشان دادند که در مخازن فولادی مهارشده با اتصالات کوتاه مهار در پای مخزن، عملکرد لرزه‌ای بیش‌تر به ظرفیت واژگونی و مقاومت خود مهار وابسته است تا کمناش پوسته و طراحی دقیق اجزای مهاری می‌تواند در کاهش شکنندگی لرزه‌ای مخزن نقش مؤثری داشته باشد [۳۶].

در سال‌های اخیر، صرفاً بررسی ایمنی یا احتمال خرابی کافی نبوده و مفهوم تاب‌آوری لرزه‌ای به‌عنوان معیاری جامع‌تر برای سنجش توانایی سیستم در تحمل، جذب و بازیابی پس از زلزله مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، تان^۲ و همکاران با بهره‌گیری از رویکرد مدل‌سازی، مدلی کمی برای ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای مجموعه مخازن ذخیره نفت ارائه کردند. در این چارچوب، مخازن، گسل فعال و محیط پیرامونی به‌عنوان عامل‌های مستقل با ویژگی‌ها و قواعد رفتاری مشخص تعریف شدند و برهم‌کنش آن‌ها برای شبیه‌سازی تکامل حوادث ناشی از زلزله، اثرات دومینویی، اقدامات اضطراری و فرایند بازیابی به‌کار گرفته شد. نتایج مطالعه موردی نشان داد که مدل پیشنهادی قادر است سیر زمانی افت و بازیابی عملکرد سامانه و نیز اثربخشی راهبردهای مدیریتی و تخصیص منابع تاب‌آوری را به‌صورت کمی ارزیابی نماید [۳۷].

همچنین، برونزی و ناسیمبه چارچوبی برای ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای مخازن ذخیره مایع روزمینی ارائه کردند که در آن، علاوه بر احتمال خرابی، زمان بازیابی عملکرد و میزان ازکارافتادگی سامانه نیز در ارزیابی لحاظ می‌شود [۲۰].

در راستای این روند، مفهوم تاب‌آوری در سایر سامانه‌های سازه‌ای نیز توسعه یافته است. صمدیان و همکاران تاب‌آوری لرزه‌ای ساختمان‌های آموزشی را با تلفیق تحلیل‌های آسیب‌پذیری و شکنندگی بررسی نمودند و نشان دادند که مقاومت‌سازی سازه‌ای، علاوه بر کاهش آسیب‌پذیری، موجب بهبود شاخص‌های تاب‌آوری می‌شود [۵].

محمود و همکاران نیز تأثیر آلیاژهای حافظه‌دار شکلی را بر بهبود تاب‌آوری لرزه‌ای سازه‌های بتن‌آرمه بررسی کردند [۳۸].

شریعتی و همکاران بهبود تاب‌آوری قاب‌های مهاربندی‌شده فولادی را با استفاده از یک ماژول فولادی پنج‌ضلعی نشان دادند [۳۹].

همچنین در حوزه تاب‌آوری چندمخاطره‌ای، زلکه^۳ و همکاران چارچوبی مبتنی بر قابلیت اطمینان برای ساختمان‌های پایه‌جداشده تحت اثر هم‌زمان زلزله، انفجار و باد ارائه نمودند [۴۰].

فرانگوپول^۴ و پترینی^۵ روشی برای ایجاد تعادل میان آثار بارهای لرزه‌ای و فشارهای موضعی باد در طراحی سازه‌ها پیشنهاد دادند [۴۱].

باوندی و همکاران با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی و شاخص مبتنی بر منحنی آسیب‌پذیری، اثر زمان وقوع رویداد بر کاهش تاب‌آوری ساختمان‌های خودمركزکننده پس‌تندگی‌شده را نشان دادند [۴۲].

بیانکی نیز رویکردی چندمعیاره برای تلفیق تاب‌آوری در طراحی پایدار ساختمان‌ها در برابر زلزله و موج گرما معرفی نمود [۴۳].

احمدی و همکاران چارچوبی برای ارزیابی تاب‌آوری شهری در برابر سیل و زلزله ارائه دادند [۴۴].

در پژوهشی دیگر ولی^۶ و همکاران نیز تاب‌آوری احتمالاتی قاب‌های خمشی فولادی مجهز به اتصالات NiTi SMA را در برابر زلزله و انفجار بررسی کردند و نتایج نشان داد که این اتصالات با کاهش آسیب و آسیب‌پذیری، عملکرد و تاب‌آوری سازه را بهبود می‌بخشند [۴۵].

با وجود گستردگی مطالعات انجام‌شده، بخش عمده تحقیقات پیشین بر رفتار لرزه‌ای، مودهای خرابی، کمناش، بلندشدگی، آسیب‌پذیری و شکنندگی مخازن فولادی متمرکز بوده است. اگرچه در سال‌های اخیر توجه به مفهوم تاب‌آوری نیز افزایش یافته، اما بیش‌تر این مطالعات، تاب‌آوری را در سطح کلی مخزن یا مجموعه مخازن بررسی کرده‌اند و اثر نوع مهار، به‌ویژه در قالب مقایسه مستقیم مخازن مهارشده و مهارنشده، بر تاب‌آوری لرزه‌ای هنوز به‌صورت روشن و نظام‌مند مورد مطالعه قرار نگرفته است. به بیان دیگر، تلفیق منحنی‌های شکنندگی با توابع بازیابی عملکرد برای ارزیابی تاب‌آوری مخازن فولادی روزمینی، با تمرکز

⁴ Francioli

⁵ Petrini

⁶ Weli

¹ Anup

² Tan

³ Zelleke

مشخص بر نقش سامانه مهار و تفاوت عملکردی مخازن مهارشده و مهارنشده، همچنان یک خلأ پژوهشی محسوب می‌شود. افزون بر این، استفاده هم‌زمان از داده‌های تحلیلی، شواهد تجربی و نظرات صاحب‌نظران برای تعریف تابع بازیابی و کمی‌سازی تاب‌آوری این مخازن هنوز به‌صورت جامع توسعه نیافته است. از این‌رو، پژوهش حاضر می‌کوشد با تمرکز بر این خلأ، ارزیابی جامع‌تری از تاب‌آوری لرزه‌ای مخازن فولادی روزمینی و اثر مهار بر آن ارائه دهد.

۲- روش ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای

به‌منظور ارزیابی شاخص تاب‌آوری لرزه‌ای، در گام نخست تحلیل خطر لرزه‌ای برای منطقه مورد مطالعه انجام می‌شود. تحلیل خطر مجموعه‌ای از روش‌ها و مطالعات است که به‌کمک آن می‌توان اثرات احتمالی زلزله‌های آینده را در محل مورد نظر برآورد کرد. این اثرات معمولاً با پارامترهای حرکت زمین، مانند حداکثر شتاب زمین (PGA) و حداکثر سرعت زمین (PGV) بیان می‌شوند [۴۶]. در گام بعد، برای ارزیابی عملکرد سازه تحت سطوح مختلف شدت زلزله، تحلیل دینامیکی افزایشی IDA به‌کار گرفته می‌شود [۴۷]؛ سپس، با توجه به ضرورت پیش‌بینی میزان آسیب، خسارات اقتصادی وارد بر سازه برآورد می‌شود. در این فرایند، منحنی‌های شکنندگی نقش مهمی دارند؛ زیرا اطلاعات ارزشمندی دربارهٔ احتمال فراتر رفتن آسیب از سطوح مختلف ارائه می‌کنند. این منحنی‌ها در مهندسی زلزله می‌توانند به‌صورت تجربی یا تحلیلی و بر اساس داده‌های موجود یا روش‌های تحلیلی توسعه یابند [۴۸]. منحنی‌های شکنندگی معمولاً سطوح آسیب سازه را در چهار حالت جزئی، متوسط، گسترده و کامل طبقه‌بندی می‌کنند. از میان روش‌های مختلف توسعهٔ توابع شکنندگی، تحلیل ابری (CA)^۱ و تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA)^۲ از رایج‌ترین رویکردها به‌شمار می‌روند [۴۹ و ۵۰]. منحنی شکنندگی به‌صورت احتمال شرطی فراتر رفتن خرابی سازه یا اجزای آن از یک سطح آسیب مشخص، بر حسب معیار شدت زلزله (IM)^۳ تعریف می‌شود. به‌طور کلی، منحنی شکنندگی را می‌توان به‌صورت یک تابع احتمال مشروط مطابق رابطه (۶) بیان نمود:

$$P_f = P(DM \geq DS | IM = \alpha) \quad (6)$$

که در آن، $P_f(\alpha)$ تابع شکنندگی، (DS) حالت آسیب، (DM) معیار آسیب و $IM=\alpha$ مقدار مشخصی از معیار شدت زلزله است. در این مقاله، برای استخراج منحنی‌های شکنندگی از روش تحلیل دینامیکی افزایشی استفاده شده است. همچنین، حالت‌های مختلف آسیب مورد استفاده در این پژوهش، در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- حالت‌های آسیب [۵۱]

توصیف آسیب	کد حالت آسیب
بدون آسیب	DS1
تغییر شکل الاستیک پوسته (ورق‌های فوقانی بدنهٔ مخزن)، آسیب موضعی بدون نشست و تسلیم سقف	DS2
کمانش ورق مخزن (کمانش پافیلی) بدون نشست محتویات	DS3
کمانش ورق کف همراه با نشست محتویات	DS4
فروپاشی کامل	DS5

پس از استخراج منحنی‌های شکنندگی، احتمال وقوع هر سطح آسیب از طریق تفاضل احتمال فراگذشت از حالت‌های آسیب متوالی محاسبه می‌شود. برای نمونه، احتمال وقوع حالت‌های آسیب کامل، گسترده و متوسط به‌صورت معادلات (۷) الی (۱۰) بیان می‌شود:

$$P[ds = Complete] = P[ds \geq Complete] \quad (7)$$

$$P[ds = Extensive] = P[ds \geq Extensive] - P[ds \geq Complete] \quad (8)$$

$$P[ds = Moderate] = P[ds \geq Moderate] - P[ds \geq Extensive] \quad (9)$$

$$P[ds = Slight] = P[ds \geq Slight] - P[ds \geq Moderate] \quad (10)$$

به همین ترتیب، احتمال وقوع سایر حالت‌های آسیب نیز از اختلاف احتمال فراگذشت بین سطوح متوالی آسیب محاسبه می‌شود. این احتمالات در مراحل بعدی برای برآورد خسارت و محاسبهٔ شاخص تاب‌آوری لرزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵۱].

در نهایت، آسیب‌پذیری سازه با در نظر گرفتن تمامی حالت‌های آسیب تعیین می‌شود. در این راستا، شاخص MDF_{ds} به‌عنوان عامل

¹ Cloud Analysis

² Incremental Dynamic Analysis

³ Intensity Measure

که (n) تعداد حالات آسیب، $P[ds]$ احتمال وقوع حالت آسیب i ام (بر اساس روابط (۷) الی (۹)) و MDF_{ds} ضریب آسیب متناظر با آن است. مقادیر این ضرایب بر اساس طبقه‌بندی ATC-13 تعیین و معادل آن‌ها با سطوح آسیب HAZUS در جدول (۲) ارائه شده است و در محاسبه آسیب‌پذیری کلی سازه مطابق معادله (۱۱) به کار می‌روند.

میانگین آسیب در نظر گرفته می‌شود که بیانگر مقدار مرکزی بازه ضرایب آسیب برای هر حالت آسیب است. به‌طورکلی، آسیب‌پذیری کلی سازه از مجموع حاصل ضرب احتمال وقوع هر حالت آسیب در عامل میانگین آسیب متناظر با آن، مطابق معادله (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$vulnerability = \sum_{ds=1}^n \{P[ds = DS] \times MDF_{ds}\} \quad (11)$$

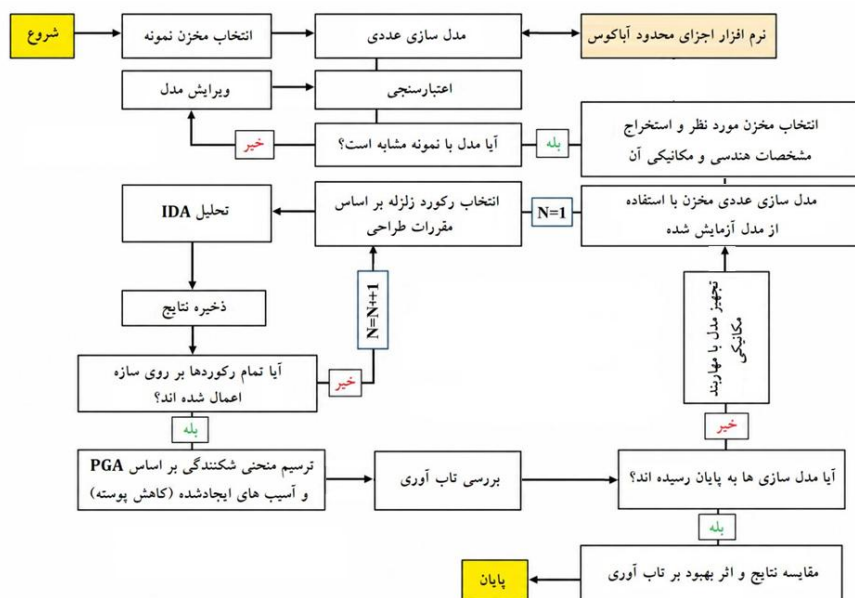
جدول ۲- ضرایب آسیب بر اساس طبقه‌بندی ATC-13 [۵۲] و معادل‌سازی با HAZUS [۵۱]

معادل HAZUS	ضریب آسیب تخصیص یافته (%)	محدوده ضریب آسیب (%)	توصیف	حالت آسیب ATC-13
DS1	۰	۰	بدون آسیب	بدون آسیب
-	-	۰-۱	آسیب جزئی موضعی محدود که نیاز به تعمیر ندارد	جزئی
DS2	۵	۱-۱۰	آسیب موضعی قابل توجه در برخی اجزا که نیاز به تعمیر ندارد	سبک
DS3	۲۰	۱۰-۳۰	آسیب موضعی قابل توجه در اجزای متعدد که نیاز به تعمیر دارد	متوسط
DS4	۴۵	۳۰-۶۰	خسارات گسترده نیازمند تعمیرات اساسی	سنگین
-	-	۶۰-۱۰۰	آسیب گسترده که ممکن است منجر به تخریب یا تعمیرات اساسی شود	اساسی
DS5	۱۰۰	۱۰۰	تخریب کامل اکثر تأسیسات	تخریب

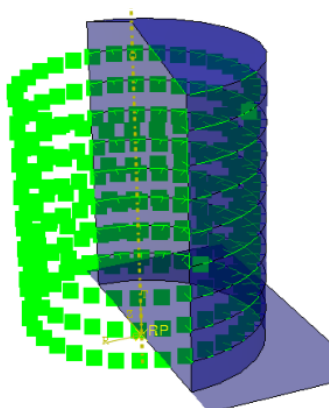
موردی انتخاب شد. مشخصات هندسی و ویژگی‌های مصالح این مخزن به ترتیب در شکل (۳) و جدول (۳) ارائه شده‌اند. همچنین، برای راستی‌آزمایی مدل توسعه‌یافته، از رکورد زلزله مذکور و گزارش‌های مستند آسیب‌های وارد شده به مخزن، مطابق با مطالعات رزاقی و میلادی و نجم‌آباد و همکاران، استفاده شد [۳۰ و ۳۵].

۳- مدل‌سازی

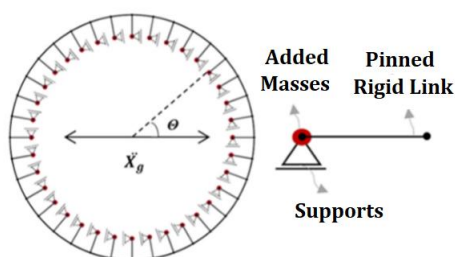
سیر کلی این پژوهش مطابق فلوچارت ارائه‌شده در شکل (۲) تنظیم شده است. به‌منظور اعتبارسنجی مدل عددی و ارزیابی انطباق آن با رفتار واقعی، یک مخزن آسیب‌دیده در زلزله سیلاخور که در نزدیکی ایستگاه ثبت رکورد قرار داشت، به‌عنوان نمونه



شکل ۲- نمودار فرآیند تحقیق



(الف) مدل‌سازی انجام‌شده در نرم‌افزار



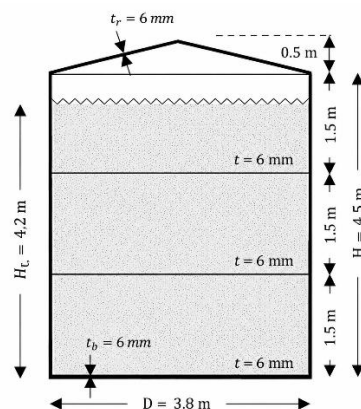
(ب) شمای مدل جرم افزوده

شکل ۴- مدل‌سازی و شمای جرم افزوده [۳۰]

۳-۲- صحت‌سنجی

به‌منظور اعتبارسنجی مدل عددی در شبیه‌سازی رفتار لرزه‌ای مخازن، فرآیند صحت‌سنجی با استفاده از نتایج مطالعات میلادی و رزاقی و همچنین نجم‌آباد و همکاران انجام پذیرفت [۳۰ و ۳۵]. در این راستا، مدل مخزن بدون مهار تحت رکورد زلزله سیلاخور تحلیل شد. ظرفیت کماتش دینامیکی در این مطالعه با اتکا به روش بودینسکی^۲ محاسبه شد [۵۳]. این روش که پیش‌تر در پژوهش‌های متعددی برای تعیین بار کماتشی مخازن به‌کار گرفته شده است [۱۶ و ۵۴]، بر پایه تحلیل دینامیکی افزایشی IDA استوار است. در این رویکرد، با اعمال شتاب‌نگاشت‌های لرزه‌ای به مدل، کم‌ترین مقدار شتاب بیشینه زمین PGA که منجر به افزایش ناگهانی در تغییرشکل‌های شعاعی مخزن می‌گردد، شناسایی می‌شود؛ این مقدار به‌عنوان شتاب اوج بحرانی PGA_{cr} و شاخص وقوع کماتش دینامیکی معرفی می‌شود.

به‌منظور تعیین دقیق این پارامتر، از ترسیم مسیر شبه‌تعادل^۳ بهره گرفته شده است. این نمودار، بیشینه تغییرشکل‌های شعاعی مخزن را در برابر مقادیر متناظر PGA نشان می‌دهد که عموماً شامل



شکل ۳- مشخصات هندسی مخزن [۳۰]

جدول ۳- مشخصات مصالح

مصالح	ρ (kg/m ³)	ν	F_y (MPa)
فولاد	۷۸۵۰	۰/۳	۲۴۰

۳-۱- المان‌ها

برای مدل‌سازی عددی، مخزن، بدنه، کف و سقف با استفاده از المان‌های پوسته^۱ مدل‌سازی شدند. همچنین، به‌منظور شبیه‌سازی اثر سیال درون مخزن، از روش جرم افزوده استفاده شد. در این روش، سیال را به‌صورت جرم‌های متمرکز مدل می‌کند که به‌طور صلب به بدنه مخزن متصل هستند و مقدار هر جرم بر اساس رابطه پیشنهادی ویرلا تعیین می‌شود [۱۷].

استفاده از روش جرم افزوده، ضمن فراهم کردن امکان انجام تحلیل‌های غیرخطی همراه با تغییرشکل‌های بزرگ و نیز کاهش هزینه محاسباتی، تقریب مناسبی برای بازنمایی مؤلفه ضربانی پاسخ هیدرودینامیکی فراهم می‌آورد. با این حال، این روش قادر به شبیه‌سازی دقیق اندرکنش کامل سیال-سازه نیست؛ به‌ویژه در بازنمایی مؤلفه نوسانی سطح آزاد سیال و سایر پدیده‌های وابسته به رفتار کامل هیدرودینامیکی محدودیت دارد. از این رو، نتایج حاصل از این مدل عمدتاً در چارچوب ارزیابی پاسخ سازه‌ای مخزن و مقایسه نسبی حالات مختلف تفسیر می‌شوند و برای بررسی دقیق‌تر رفتار سیال، به‌ویژه در شرایط پیچیده‌تر، استفاده از مدل‌های پیشرفته‌تر اندرکنش سیال-سازه ضروری است [۱۷]. نمای مدل‌سازی مخزن در نرم‌افزار و شماتیک نحوه اعمال جرم‌های افزوده در شکل (۴) ارائه شده‌اند.

^۲ Budiansky

^۳ Pseudo-Equilibrium Path

^۱ Shell

مشخصات هندسی، ویژگی‌های مصالح و مدل‌سازی عددی مخزن مذکور، به ترتیب در شکل (۶)، جدول (۳) و شکل (۷) ارائه شده است.

۳-۴- رکورد های مورد استفاده

در این مطالعه، به منظور ارزیابی رفتار لرزه‌ای مخزن، از ۱۲ رکورد زلزله شامل رکوردهای حوزه نزدیک و حوزه دور استفاده شده است. انتخاب این رکوردها با هدف دربرگرفتن دامنه‌ای از ویژگی‌های مختلف زلزله، از جمله فاصله از گسل، بزرگای زمین‌لرزه و شرایط ثبت انجام شد تا امکان بررسی جامع‌تر پاسخ دینامیکی مخزن تحت تحریک‌های لرزه‌ای متفاوت فراهم شود. مشخصات این رکوردها مطابق جدول (۵) ارائه شده است و هر یک از آن‌ها به عنوان شتاب‌نگاشت ورودی به مدل مخزن اعمال شده‌اند. نتایج حاصل از تحلیل‌ها نیز به صورت تطبیقی مورد بررسی قرار گرفته‌اند تا اثر نوع رکورد و ویژگی‌های آن بر پاسخ سازه‌ای مخزن به طور دقیق‌تر ارزیابی شود.

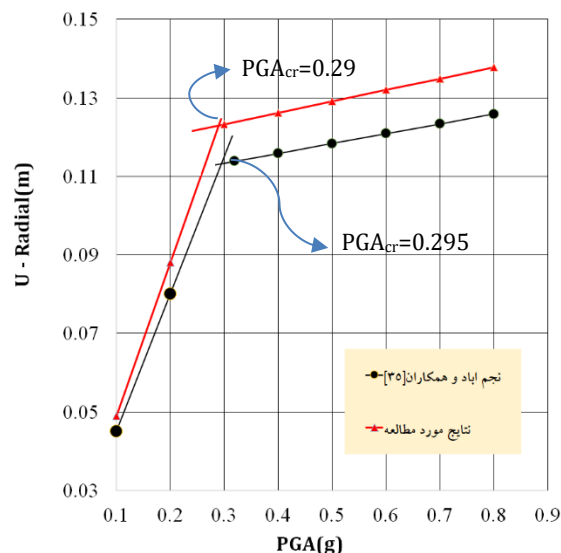
طیف پاسخ رکوردهای منتخب پس از مقیاس‌سازی تا سطح 1g محاسبه شده و میانگین آن‌ها در شکل (۸) ارائه شده است. این طیف‌ها مبنایی برای بررسی میزان سازگاری رکوردهای انتخابی و نیز ارزیابی شدت اثر آن‌ها بر رفتار دینامیکی مخزن فراهم می‌کنند. همچنین، به منظور انجام تحلیل دینامیکی افزایشی، مقادیر بیشینه شتاب زمین در بازه 0.1g تا 1g با گام‌های 0.1g در نظر گرفته شده و در هر مرحله، رکوردها متناسب با سطح شتاب مورد نظر به سازه مخزن اعمال شده‌اند. این روند امکان بررسی تغییرات تدریجی پاسخ سازه، شناسایی سطوح بحرانی عملکرد و ارزیابی رفتار مخزن در شدت‌های مختلف لرزه‌ای را فراهم کرده است.

۳-۵- مقاوم سازی

در مطالعه کیلداشتی و همکاران نیز برای نمایش حالت پایه گیردار، سیستم مهاربندی به صورت صریح مدل‌سازی نشد و به جای آن، تمامی گره‌های پایه مخزن در راستاهای افقی و قائم مقید شدند [۲۵]. در پژوهش حاضر نیز با رویکردی مشابه، به منظور حذف پدیده بلندشدگی، اثر مهاربندی از طریق اعمال شرایط مرزی صلب در اتصال ورق کف به فونداسیون لحاظ شد؛ به گونه‌ای که جابه‌جایی عمودی گره‌های پایه به طور کامل مقید شد و امکان جداشدگی موضعی کف مخزن از فونداسیون از بین رفت.

دو ناحیه خطی مجزا است. شتاب متناظر با نقطه تقاطع این دو مسیر، بیانگر مقدار بحرانی PGA_{cr} است.

شکل (۵)، مقایسه نمودار مسیر شبه تعادل حاصل از پژوهش نجم‌آباد و همکاران با نمودار استخراج شده در مطالعه حاضر را نشان می‌دهد.



شکل ۵- مقایسه مسیر شبه تعادل مطالعه حاضر با نتایج پژوهش نجم‌آباد و همکاران [۳۵]

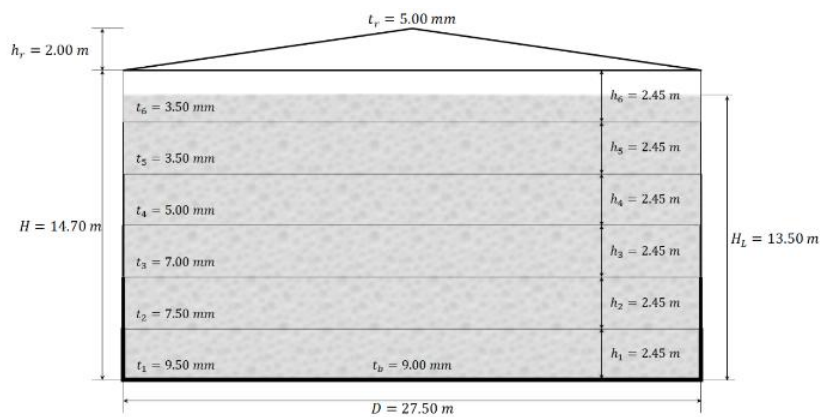
همچنین، بلندشدگی ورق کف مخزن به عنوان یکی دیگر از معیارهای اصلی صحت‌سنجی مدل عددی در نظر گرفته شده است. نتایج عددی مربوط به میزان بلندشدگی حداکثر مخزن در مطالعه حاضر و نتایج حاصل از تحقیق میلادی و رزاقی و نجم‌آباد و همکاران را می‌توان در جدول (۴) مشاهده کرد.

جدول ۴- مقایسه مقادیر بلندشدگی

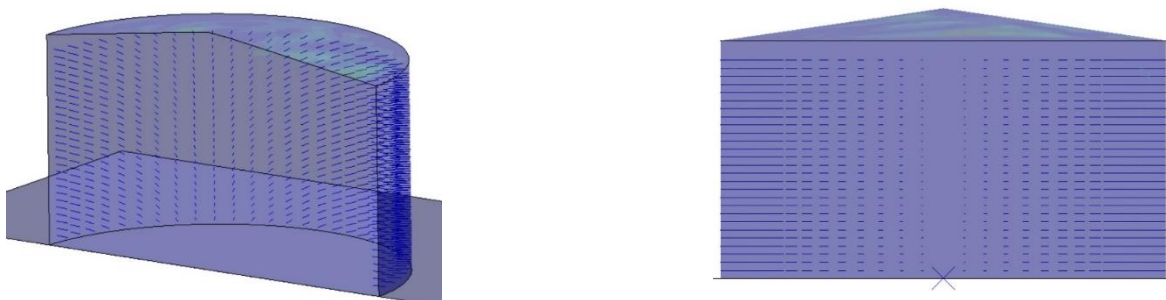
مقایسه نتایج	مدل عددی انجام شده	رزاقی و میلادی [۳۰]	نجم‌آباد و همکاران [۳۵]
حداکثر بلندشدگی	۰/۰۴ (m)	۰/۰۴ (m)	۰/۰۴ (m)

۳-۳- مشخصات مخزن مورد مطالعه

مخزن مورد مطالعه، یکی از چهار مخزن فولادی روزمینی با مشخصات هندسی یکسان در یک مجتمع پالایشگاهی واقع در تهران است. این مخزن دارای سقف ثابت بوده و فاقد هرگونه مهارشدگی است؛ ظرفیت ذخیره‌سازی آن نیز در حدود ۸۳۰۰ مترمکعب برآورد می‌شود.



شکل ۶- مخزن مورد مطالعه



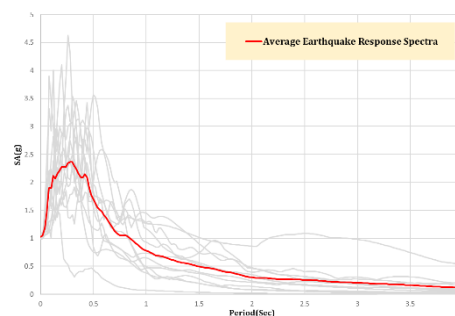
شکل ۷- نمایی از مدل سازی صورت گرفته

جدول ۵- لیست رکوردهای مورد استفاده

ردیف	نام زلزله	نام ایستگاه	بزرگای زلزله	موقعیت	فاصله (km)	vs30	PGA
E1	نورتریج-۱	LA Dam	6.69	NF	5.92	628.99	0.52
E2	لوما پریتا	Gilroy - Gavilan Coll	6.93	NF	9.96	729.65	0.23
E3	چی چی، تایوان	TCU052	7.62	NF	0.66	579.1	0.33
E4	طبس، ایران	Tabas	7.35	NF	1.79	766.77	0.85
E5	ویتیر نرووز، آمریکا	Pasadena-CIT Kresge Lab.	5.99	NF	6.78	969.07	0.11
E6	ایرپینا، ایتالیا	Sturnio	6.2	NF	20.38	382	0.07
E7	کرن کانتی، کالیفرنیا	Kern County, CA	7.36	FF	38.42	385.43	0.18
E8	کیپ مندوسینو، آمریکا	South Bay Union School	7.01	FF	33.23	459.04	0.19
E9	نورتریج، کالیفرنیا، آمریکا	Northridge, CA, USA	6.69	FF	46.31	485.67	0.22
E10	سن فرناندو، کالیفرنیا، آمریکا	San Fernando, CA, USA	6.61	FF	24.16	452.86	0.38
E11	لیورمور-۲	APEEL 3E Hayward CSUH	5.42	FF	30	304.68	0.05
E12	تایوان اسمارت	SMART1 C00	5.9	FF	29.9	309.41	0.1

پایینی، گره بحرانی در تراز ۵ تا ۱۵ درصدی ارتفاع مخزن از پایه (محل بیشترین تغییر شکل خارج از صفحه) و برای مود کماتش الاستیک/الماسی DS2 در ورق‌های فوقانی که به دلیل ضخامت کم‌تر مستعد ناپایداری هستند، گره بحرانی در نزدیک تراز سقف به عنوان شاخص پاسخ سازه ثبت شد. این تفکیک گره‌های بحرانی، منطبق بر الگوهای ناپایداری گزارش شده در مطالعات تجربی و عددی اخیر بر روی پوسته‌های جدا رنازک تحت اثر زلزله است [۲۳].

مطابق با فلوچارت تبیین شده در پژوهش، ظرفیت لرزه‌ای سیستم با تحلیل داده‌های تغییر شکل شعاعی در مسیرهای شبه تعادلی (نیروی برشی پایه در برابر تغییر مکان جانبی) و تعیین شتاب بحرانی PGA_{cr} ارزیابی شد. در این راستا، برای سطوح آسیب DS2 و DS3، معیار پایداری مسیرهای تعادلی و برای سطح آسیب DS5 (گسیختگی کامل)، معیار تنش گسیختگی موضعی ملاک عمل قرار گرفت. نمونه نتایج مسیرهای شبه تعادلی برای یکی از رکوردهای مبنا در شکل‌های (۱۰) الی (۱۲)، مقادیر PGA_{cr} و همچنین توزیع تنش در لحظه وقوع گسیختگی برای سطح آسیب DS5 در شکل (۱۳) ترسیم شده استخراج شده برای تمامی رکوردها در سه سطح خطر در شکل (۱۴) ارائه شده است. در نهایت، با بهره‌گیری از این داده‌ها، منحنی‌های شکنندگی بر اساس روابط احتمالی و مدل لگاریتمی-نرمال استخراج شدند [۵۰]. با ترکیب احتمال وقوع حالات آسیب و عامل میانگین خسارت (MDF) مطابق با تابع آسیب‌پذیری، شاخص کلی آسیب‌پذیری برای هر دو سناریوی مهار شده و مهار نشده محاسبه شد. نمودارهای مقایسه‌ای حاصل که در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) قابل مشاهده‌اند، مؤید تأثیر مثبت سیستم مهاربندی بر ارتقای سطح تاب‌آوری مخزن در برابر سطوح مختلف خطر لرزه‌ای است.



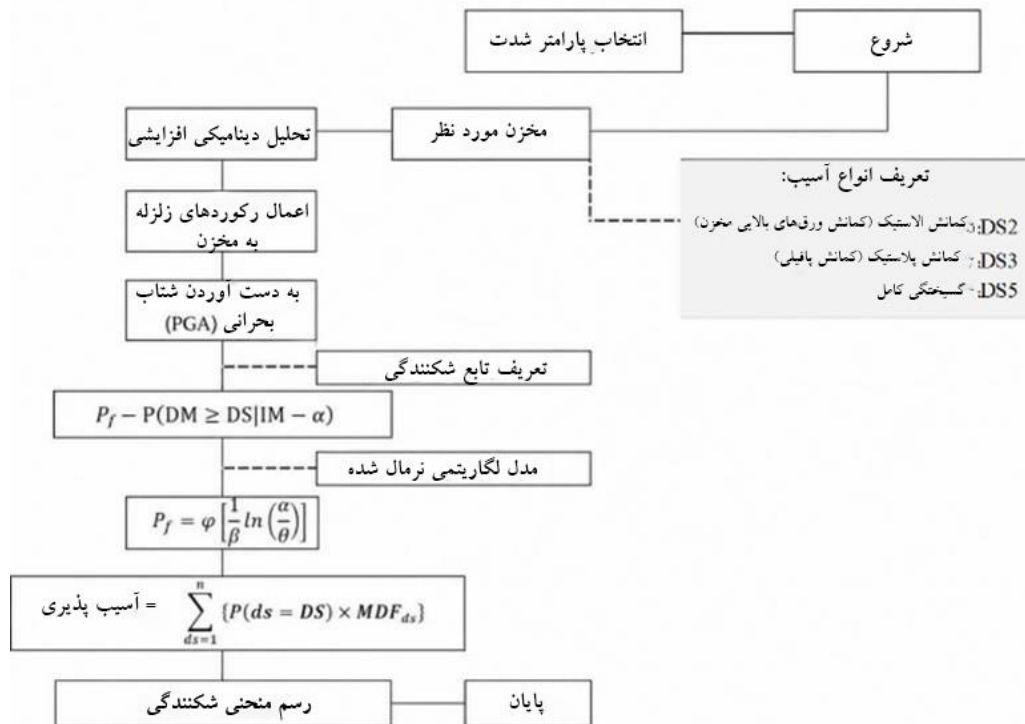
شکل ۸- طیف پاسخ مقیاس شده (1g) برای رکوردهای منتخب و میانگین طیف پاسخ

۴- نتایج

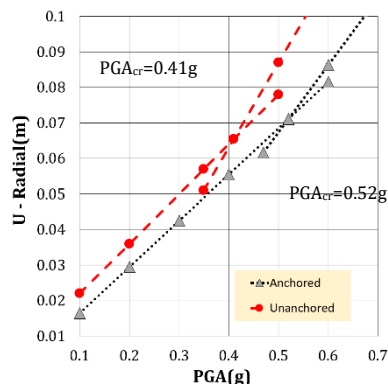
۴-۱- تعیین بیشینه شتاب بحرانی

فرآیند ارزیابی عملکرد لرزه‌ای، استخراج منحنی‌های شکنندگی و تحلیل تاب‌آوری سازه، مطابق با گام‌های عملیاتی ترسیم شده در فلوچارت شکل (۹) صورت پذیرفته است. به منظور اجرای این فرآیند برای مخزن مورد مطالعه (که مشخصات هندسی، ویژگی‌های مصالح و مدل‌سازی عددی آن به ترتیب در شکل (۶)، جدول (۳) و شکل (۷) ارائه شده است، تحلیل دینامیکی افزایشی IDA برای هر دو حالت مهار نشده و مهار شده تحت رکوردهای منتخب انجام گرفت.

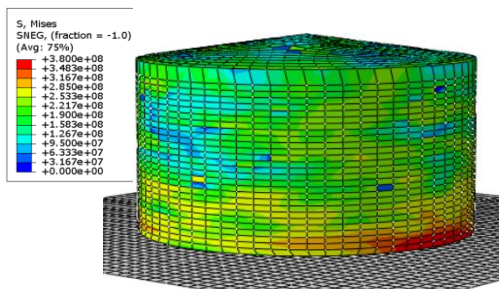
در این مطالعه، برای ترسیم مسیرهای شبه تعادلی تحت بارگذاری لرزه‌ای فزاینده و استخراج منحنی‌های IDA، رابطه میان شتاب بیشینه زمین (PGA) اعمال شده به تراز پایه و جابه‌جایی جانبی گره‌های مبنای پوسته مورد تحلیل قرار گرفت. به منظور انطباق دقیق با فیزیک مودهای کماتش و روش ویرلا، گره‌های مبنا متناسب با الگوی ناپایداری مورد ارزیابی، انتخاب شدند؛ بدین صورت که برای بررسی مود کماتش پافیلی DS3 در ورق‌های



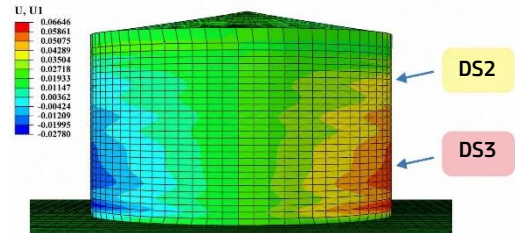
شکل ۹- فلوچارت تعیین منحنی شکنندگی



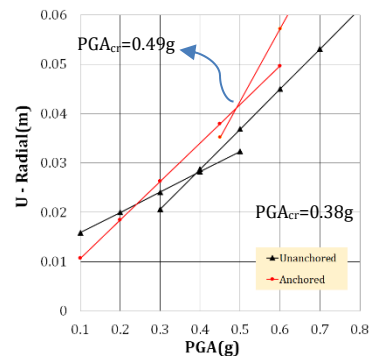
شکل ۱۰- تعیین PGA_cr برای سطح خطر DS3



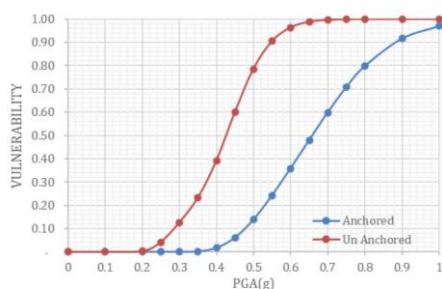
شکل ۱۱- کانتورهای توزیع تنش در پوسته مخزن در لحظه وقوع گسیختگی نهایی سطح آسیب DS5 در بازتاب ماکزیمم



شکل ۱۲- تغییر مکان شعاعی برای سطوح خطر DS3 و DS2



شکل ۱۳- تعیین PGA_cr برای سطح خطر DS2



شکل ۱۶- منحنی آسیب پذیری مخزن برای حالت مهارشده/نشده

۲-۴- تحلیل ریسک

در راستای ارزیابی احتمال وقوع خرابی و تبیین سطح آسیب پذیری مخزن، منحنی های شکنندگی و آسیب پذیری استخراج شد. به منظور محاسبه شاخص تاب آوری در سطوح مختلف خطر، مقادیر حداکثر شتاب حرکت زمین متناظر با چهار سطح ریسک، مطابق با ضوابط نشریه ۶۲۶ سازمان برنامه و بودجه کشور تعیین شد [۵۵]. مقادیر شتاب های متناظر با این سطوح خطر، در جدول (۵) ارائه شده است.

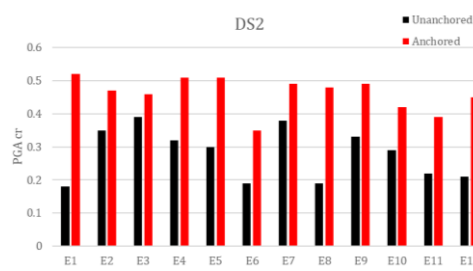
جدول ۵- بیشینه شتاب [۵۵]

سطح لرزه ای (% ۵۰ سال)	دوره بازگشت	نوع خاک	حداکثر شتاب حرکت زمین
۵۰/۵۰	۷۵	سنگ	۰/۱۲۶
۱۰/۵۰	۴۷۵	سنگ	۰/۳۲۲
۵/۵۰	۹۷۵	سنگ	۰/۴۷۱
۲/۵۰	۲۴۷۵	سنگ	۰/۷۱۳

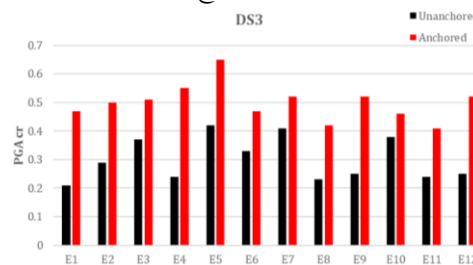
۳-۴- به دست آوردن تاب آوری

شاخص تاب آوری لرزه ای برای مخزن، در دو حالت موجود و بهسازی شده، بر مبنای توابع آسیب پذیری محاسبه شد. در فرآیند تعیین توابع خسارت، با صرف نظر از خسارت جانی، ارزیابی ها بر پایه پارامترهای زمان بازیابی، زمان تأخیر در شروع عملیات ترمیم و آستانه اقتصادی تعمیرات استوار شد.

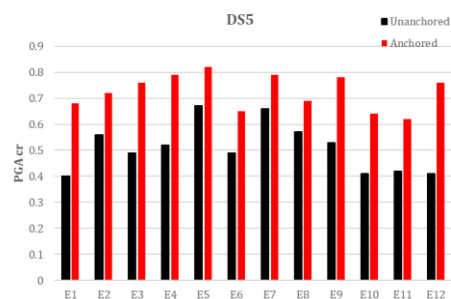
از آنجا که پارامترهای مورد مطالعه به شدت تحت تأثیر شرایط اقتصادی، اقلیمی و ملاحظات عملیاتی منطقه هستند، به منظور بومی سازی دقیق داده ها، از نظرات تخصصی صاحب نظران این حوزه بهره گرفته شد. در این راستا، نظر سنجی و توزیع پرسش نامه میان ۲۰ نفر از متخصصان برجسته و مهندسان ارشد در شرکت های پیش رو در حوزه طراحی، ساخت و نگهداری مخازن ذخیره در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی انجام پذیرفت.



(الف) PGAcr برای سطح خطر DS2



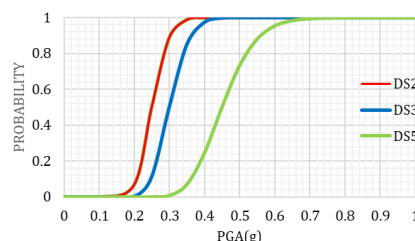
(ب) PGAcr برای سطح خطر DS3



(ج) PGAcr برای سطح خطر DS5

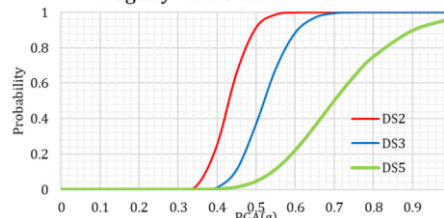
شکل ۱۴- تعیین PGAcr برای سطوح مختلف خطر

Fragility Curve-Un Anchored



(الف) منحنی شکنندگی برای مخزن مهار نشده

Fragility Curve-Anchored



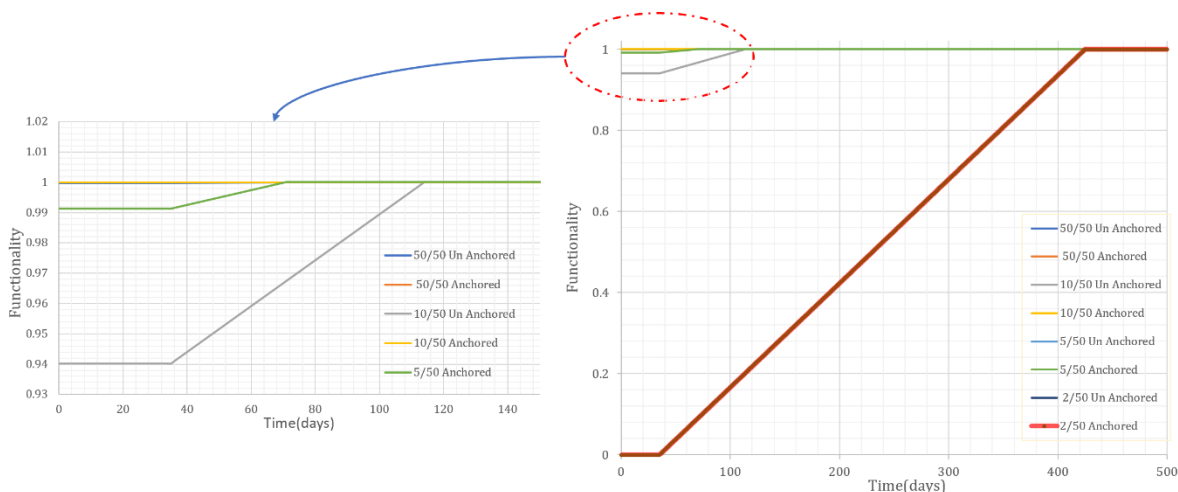
(ب) منحنی شکنندگی برای مخزن مهار شده

شکل ۱۵- منحنی شکنندگی برای مخزن مهار شده/نشده در سطوح خطرهای مختلف

جدول ۶- نتایج پرسش نامه

ردیف	سوالات	میانگین	انحراف معیار
۱	عمر مفید مخازن زمینی فولادی که در صنعت نفت مورد استفاده قرار میگیرد چند سال است؟ (سال)	۲۶/۶۶۷	۶/۴
۲	زمان ساخت یک مخزن فولادی زمینی متوسط متعارف در صنعت نفت با ابعاد بین ۲۰ الی ۳۰ متر قطر و ارتفاع حدوداً ۱۵ متر (بدون مهار) پس از یک رخداد که موجب خرابی مخزن قبلی شده، چند روز است؟ (روز)	۳۹۰	۴۶
۳	زمان مجهز کردن یک مخزن فولادی متوسط متعارف با ابعاد ۲۰ الی ۳۰ متر قطر و ۱۵ متر ارتفاع فاقد مهار مکانیکی، با ابعاد ۲۷ متر قطر و ۱۵ متر ارتفاع مجهز به مهار مکانیکی، چند روز است؟ (روز)	۴۸	۱۱
۴	بر طبق قضاوت مهندسی چه مقدار درصد آسیب ایجاد شده در مخزن پس از وقوع یک رخداد (زلزله) تعمیر و مقاوم سازی مخزن از نظر اقتصادی به صرفه نیست و مخزن باید مجدداً احداث شود؟	۵۰	۸
۵	زمان تأخیر در شروع فرآیند تعمیر و بازسازی مخازن پس از وقوع یک رخداد چند روز است؟ (روز)	۳۵	۱۱
۶	اگر مخزن زمینی فولادی متوسط (با ابعاد بین ۲۰ الی ۳۰ متر قطر و ۱۵ ارتفاع) در یک رخدادی دچار آسیب جزئی شود (آسیب سازه ای مدنظر است؛ نه آتش سوزی) به عنوان مثال تغییر شکل در سقف یا کنده شدن وسایل متصل به مخزن یا تغییر شکل ورق های قرار گرفته در بالای مخزن، چند روز برای تعمیر آسیب ایجاد شده لازم است؟ (روز)	۳۶	۱۱
۷	اگر مخزن فولادی متوسط (با ابعاد ۲۰ الی ۳۰ متر قطر و ارتفاع حدود ۱۵ متر) در یک رخدادی دچار آسیب متوسط شود (آسیب سازه ای مدنظر است؛ نه آتش سوزی) به عنوان مثال تغییر شکل و کمانش ورق های قرار گرفته در پایین مخزن (کمانش پایداری بدون نشت)، چند روز برای تعمیر آسیب ایجاد شده لازم است؟ (مهار نشده)	۷۹	۱۶
۸	اگر مخزن فولادی متوسط (با ابعاد ۲۰ الی ۳۰ متر قطر و ارتفاع حدود ۱۵ متر) در یک رخدادی دچار آسیب متوسط شود (آسیب سازه ای مدنظر است؛ نه آتش سوزی) به عنوان مثال تغییر شکل و کمانش ورق های قرار گرفته در پایین مخزن (کمانش پایداری بدون نشت)، چند روز برای تعمیر آسیب ایجاد شده لازم است؟ (مهار شده)	۱۲۷	۲۹/۶

در نهایت، با تلفیق این نتایج و سطوح مختلف خطر لرزه ای، نمودار شاخص تاب آوری برای سطوح مختلف ریسک در شکل (۱۷) ترسیم شد.



شکل ۱۷- منحنی تاب آوری بر اساس میانگین نتایج

۵- نتیجه گیری

استفاده از سیستم های مهار مکانیکی به عنوان روشی مؤثر برای مهاربندی مخازن فولادی روزمینی، پاسخ لرزه ای این سازه ها را به طور قابل توجهی کاهش می دهد. نتایج نشان می دهد که به کارگیری این نوع سیستم مهاربندی، موجب کاهش چشم گیر پدیده بلندشدگی پایه مخزن شده و در نتیجه، میزان آسیب های سازه ای و غیرسازه ای حین زلزله کاهش می یابد. علاوه بر این، این سیستم با افزایش ظرفیت تاب آوری لرزه ای، آسیب پذیری مخزن را کاهش می دهد. بر اساس نتایج ارزیابی لرزه ای، در سطح خطر با دوره بازگشت ۷۵ ساله (سطح بهره برداری عادی)، تفاوت محسوسی میان عملکرد مخازن مهار شده و مهار نشده مشاهده نمی شود و در هر دو حالت، مخزن قادر به حفظ پایداری عملکردی خود در برابر زلزله های خفیف است. در سطح خطر با دوره بازگشت ۴۷۵ ساله (سطح طراحی پایه)، مخازن بدون مهار با کاهش ۴ تا ۶ درصدی بازده عملکردی مواجه می شوند؛ در حالی که مخازن مجهز به مهار مکانیکی بدون افت عملکرد قابل توجه، پایداری عملیاتی خود را حفظ می کنند. همچنین، در سطح خطر با دوره بازگشت ۹۷۵ ساله (سطح طراحی ویژه)، مخازن مهار نشده دچار آسیب های شدید سازه ای می شوند به گونه ای که از نظر اقتصادی، جایگزینی کامل آن ها توجیه پذیرتر از تعمیر است؛ در مقابل، مخازن مهار شده قابلیت بازیابی داشته و پس از انجام اقدامات تعمیراتی می توانند عملکرد اولیه خود را مجدداً به دست آورند. به طور کلی، استفاده از مهار مکانیکی موجب افزایش زمان بازیابی و کاهش خسارات وارده به مخزن می شود که در مجموع، تاب آوری لرزه ای را ارتقا داده و مخزن را از حالت نیازمند ساخت مجدد پس از زلزله های با خطر ویژه، به وضعیت قابل تعمیر منتقل می کند.

- [15] Alamzadeh, H., and Shakib, H. (2016), "Numerical Study of the Response of On-Ground Steel Tanks with Free Rocking Motion under Horizontal Earthquake Excitation", *Journal of Structure & Steel*, 10(20), pp.71-79. (in Persian)
- [16] Virella, J.C., Godoy, L.A., and Suárez, L.E. (2006), "Dynamic Buckling of Anchored Steel Tanks Subjected to Horizontal Earthquake Excitation", *Journal of Constructional Steel Research*, 62(6), pp. 521-531.
- [17] Virella, J.C., Godoy, L.A. and Suárez, L.E. (2006), "Fundamental Modes of Tank-Liquid Systems under Horizontal Motions", *Engineering Structures*, 28(10), pp.1450-1461.
- [18] Virella, J.C., Prato, C.A., and Godoy, L.A. (2008), "Linear and Nonlinear 2D Finite Element Analysis of Sloshing Modes and Pressures in Rectangular Tanks Subject to Horizontal Harmonic Motions", *Journal of Sound & Vibration*, 312(3), pp.442-460.
- [19] Phan, H.N., and Paolacci, F. (2018), "Fluid-Structure Interaction Problems: An Application to Anchored and Unanchored Steel Storage Tanks Subjected to Seismic Loadings", *ArXiv Preprint*, ArXiv:1805.00679.
- [20] Brunesi, E., and Nascimbene, R. (2024), "Evaluating the Seismic Resilience of Above-Ground Liquid Storage Tanks", *Buildings*, 14(10), pp.3212.
- [21] Bakalis, K., and Karamanos, S.A. (2021), "Uplift Mechanics of Unanchored Liquid Storage Tanks Subjected to Lateral Earthquake Loading", *Thin-Walled Structures*, 158, pp.107145.
- [22] Niaz, M., Nikkhoo, A., and Attari, N.K.A. (2025), "Investigation of the Buckling Behavior of Cylindrical Unanchored Steel Storage Tank under Near Field 3-D Seismic Loading", *Journal of Solid & Fluid Mechanics*, 15(3), pp.5-8.
- [23] Miladi, S., Razzaghi, M.S., and Ghasemi, S.H. (2022), "Seismic Performance of Imperfect Unanchored Tanks", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures & Buildings*, 175(7), pp.551-560.
- [24] Hosseinzadeh, N., and Masoumi Goudarzi, A. (2008), "Evaluation of Seismic Failure Modes and Retrofitting Methods of Unanchored Cylindrical Steel Tanks in an Oil Complex", *Journal of Structure & Steel*, 2(3), pp.25-34. (in Persian)
- [25] Kildashti, K., Mirzadeh, N., and Samali, B. (2018), "Seismic Vulnerability Assessment of a Case Study Anchored Liquid Storage Tank by Considering Fixed and Flexible Base Restraints", *Thin-Walled Structures*, 123, pp.382-394.
- [26] Naderi, H.R., Razzaghi, M.S., and Yakhchalian, M. (2024), "Effects of Random Corrosion on Seismic Performance of an Un-Anchored Steel Storage Tank", *Thin-Walled Structures*, 203, pp.112164.
- [27] Razzaghi, M.S., and Eshghi, S. (2015), "Probabilistic Seismic Safety Evaluation of Precode Cylindrical Oil Tanks", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29(6), pp.04014170.
- [28] Djermane, M., Zaoui, D., Labbaci, B., and Hammadi, F. (2014), "Dynamic Buckling of Steel Tanks under Seismic Excitation: Numerical Evaluation of Code
- [1] Seyed-Razaghi, M. (2017), "Seismic Effects on Liquid Storage Steel Tanks", 1st edition, Negarande-ye Danesh Publications, Tehran, Iran, pp.103. (in Persian)
- [2] Chalarca, B., Gabbianelli, G., Brunesi, E., Perrone, D., and Ciucci, M. (2025), "Experimental Characterization of the Seismic Response of Industrial Steel Piping Systems", *Buildings*, 15(22), pp.4197.
- [3] Holling, C.S. (1973), "Resilience and Stability of Ecological Systems", pp.1-23.
- [4] Stumpp, E.M. (2013), "New in town? On Resilience and Resilient Cities", *Cities*, 32, pp.164-166.
- [5] Samadian, D., Ghafory-Ashtiany, M., Naderpour, H., and Eghbali, M. (2019), "Seismic Resilience Evaluation Based on Vulnerability Curves for Existing and Retrofitted Typical RC School Buildings", *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 127, pp.105844.
- [6] Cimellaro, G.P., Reinhorn, A.M., and Bruneau, M. (2006), "Quantification of Seismic Resilience", In *Proceedings of the 8th US National Conference on Earthquake Engineering*, 8(1094), pp.1-10.
- [7] Cimellaro, G.P., Reinhorn, A.M., and Bruneau, M. (2010), "Framework for Analytical Quantification of Disaster Resilience", *Engineering Structures*, 32(11), pp.3639-3649.
- [8] Cimellaro, G.P., Fumo, C., Reinhorn, A.M., and Bruneau, M. (2009), "Quantification of Disaster Resilience of Health Care Facilities. MCEER Technical Report MCEER-09-0009", Buffalo, NY: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, University at Buffalo, State University of New York.
- [9] Munoz, A., and Dunbar, M. (2015), "On the Quantification of Operational Supply Chain Resilience", *International Journal of Production Research*, 53(22), pp.6736-6751.
- [10] Kafali, C., and Grigoriu, M. (2005), "Rehabilitation Decision Analysis", in *Proceedings of the Ninth International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR'05)*. Amsterdam, The Netherlands: IOS Press.
- [11] Chang, S.E., and Shinozuka, M. (2004), "Measuring Improvements in the Disaster Resilience of Communities", *Earthquake Spectra*, 20(3), pp.739-755.
- [12] Volikos, K., Konstandakopoulou, F., Asteris, P., and Hatzigeorgiou, G. (2025), "Recent Advancements in Seismic Analysis and Design of Liquid Storage Tanks", *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 198, pp.109309.
- [13] Hamdan, F.H. (2000), "Seismic Behaviour of Cylindrical Steel Liquid Storage Tanks", *Journal of Constructional Steel Research*, 53(3), pp.307-333.
- [14] Ozdemir, Z., Souli, M., and Yasin, M.F. (2012), "Numerical Evaluation of Nonlinear Response of Broad Cylindrical Steel Tanks under Multidimensional Earthquake Motion", *Earthquake Spectra*, 28(1), pp.217-238.

- Case of Steel Buildings under Earthquake and Wind", *Reliability Engineering & System Safety*, 251, pp.110326.
- [42] Bavandi, M., Amiri, G.G., Rajabi, E., and Moghadam, A.S. (2023), "Study of the Resilience Index for Steel Moment Frames with Reversible Connections", *Structures*, 47, pp.814–828.
- [43] Bianchi, S. (2023), "Integrating Resilience in the Multi-Hazard Sustainable Design of Buildings", *Disaster Prevention & Resilience*, 2(3), pp.N-A.
- [44] Ahmadi, Z., Ghasemi, M., Khavarian-Garmsir, A.R., and Ahmadi, M. (2024), "Integrating Flood and Earthquake Resilience: A Framework for Assessing Urban Community Resilience against Multiple Hazards", *Journal of Safety Science & Resilience*, 5(3), pp.330–343.
- [45] Weli, S.S., Elqudah, S.M., and Vigh, L.G. (2025), "Resilience Analysis of Smart Steel Moment Resisting Frame under Seismic-LPG Tank Explosion", *Journal of Constructional Steel Research*, 234, pp.109681.
- [46] Andrić, J.M., and Lu, D.G. (2017), "Fuzzy Methods for Prediction of Seismic Resilience of Bridges", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 22, pp.458–468.
- [47] Vamvatsikos, D., and Cornell, C.A. (2002), "Incremental Dynamic Analysis", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(3), pp.491–514.
- [48] Caverzan, A., and Solomos, G. (2015), "Review on Resilience in Literature and Standards for Critical Built-Infrastructure", JRC Scientific & Policy Reports, JRC90900. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- [49] Miano, A., Jalayer, F., Ebrahimian, H., and Prota, A. (2018), "Cloud to IDA: Efficient Fragility Assessment with Limited Scaling", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 47(5), pp.1124–1147.
- [50] Pang, Y., and Wang, X. (2021), "Cloud-IDA-MSA Conversion of Fragility Curves for Efficient and High-Fidelity Resilience Assessment", *Journal of Structural Engineering*, 147(5), pp.04021049.
- [51] HAZUS (1997), "Earthquake Loss Estimation Methodology", Menlo Park, CA: National Institute of Building Sciences.
- [52] ATC, (1985), "Earthquake Damage Evaluation Data for California", Applied Technology Council, Redwood City, CA.
- [53] Budiansky, B. (1967), "Dynamic Buckling of Elastic Structures: Criteria and Estimates", in *Dynamic Stability of Structures*, pp.83–106. Oxford: Pergamon Press.
- [54] Maheri, M.R., and Abdollahi, A. (2013), "The Effects of Long-Term Uniform Corrosion on the Buckling of Ground-Based Steel Tanks under Seismic Loading", *Thin-Walled Structures*, 62, pp.1–9.
- [55] Plan and Budget Organization (2015), "Publication No. 626: Official Title", Tehran: Plan & Budget Organization. (in Persian)
- Provisions", *Engineering Structures*, 70, pp.181–196.
- [29] Phan, H.N., Paolacci, F., Alessandri, S., and Hoang, P.H. (2018), "Enhanced Seismic Fragility Analysis of Unanchored Above-Ground Steel Liquid Storage Tanks", in *Proceedings of the ASME Pressure Vessels & Piping Conference*, 51715, pp. V008T08A014. New York, NY: American Society of Mechanical Engineers.
- [30] Miladi, S., and Razzaghi, M.S. (2019). "Failure Analysis of an Un-Anchored Steel Oil Tank Damaged during the Silakhor Earthquake of 2006 in Iran", *Engineering Failure Analysis*, 96, pp.31–43.
- [31] Vasquez Munoz, L.E., and Dolšek, M. (2024), "Parametric Seismic Fragility Model for Elephant-Foot Buckling in Unanchored Steel Storage Tanks", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22, pp.5775–5804.
- [32] Moreno, M., Colombo, J., Wilches, J., Reyes, S., and Almazán, J. (2023), "Buckling of Steel Tanks under Earthquake Loading: Code Provisions vs FEM Comparison", *Journal of Constructional Steel Research*, 209, pp.108042.
- [33] Yazdani, M., Ingham, J.M., Kahane, C., and Dizhur, D. (2020), "Damage to Flat-Based Wine Storage Tanks in the 2013 and 2016 New Zealand Earthquakes", *Journal of Constructional Steel Research*, 168, pp.105983.
- [34] Fallah Daryavarsari, S., and Nascimbene, R. (2024), "Assessment of Steel Storage Tank Thickness Obtained from the API 650 Design Procedure through Nonlinear Dynamic Analysis, Accounting for Large Deformation Effects", *Materials*, 18(1), pp.66.
- [35] Najmabad, S.J., Razzaghi, M.S., and Alahi, F.N. (2021), "Retrofitting of a Damaged Liquid Storage Tank Using Steel and SMA Anchor Bolts", *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, 194, pp.104530.
- [36] Anup, A., Lee, H.J., Hashimoto, P.S., and Kennedy, R.P. (2019), "Seismic Fragility Evaluation of Metal Flat-Bottom Storage Tanks with Short Anchor Bolt Chairs", in *Proceedings of SMIRT 25*, Charlotte, NC, USA.
- [37] Tan, X., Xiao, S., Yang, Y., Khakzad, N., Reniers, G., and Chen, C. (2024), "An Agent-Based Resilience Model of Oil Tank Farms Exposed to Earthquakes", *Reliability Engineering & System Safety*, 247, pp.110096.
- [38] Mahamood, A.A., Mukhtar, F., and Alam, M.S. (2026), "Seismic Resilience of RC Structures with Shape Memory Alloys: Past and New Perspectives", *Engineering Structures*, 346, pp.121638.
- [39] Shariati, M., Nejati, F., Salarian, F., Shariati, A., and Togholi, A. (2026), "Evaluation of Seismic Resilience in Steel Structures Incorporating Ductile Elements in Vertical Link Beams under Near Fault Ground Motions", *Structures*, 86, pp.111217.
- [40] Zelleke, D.H., Saha, S.K., and Matsagar, V.A. (2024), "Reliability-Based Multi-Hazard Design Optimization of Base-Isolated Buildings", *Engineering Structures*, 301, pp.117242.
- [41] Francioli, M., and Petrini, F. (2024), "Performance-Based Multi-Hazard Engineering (PB-MH-E): The