

Research Paper

Numerical Study on Fluid-Structure-Soil Interaction Effect on Free Vibration of Steel Storage Tanks

Mohammad Saeid Sobhan^{1*}, Taha Khaki², Fayaz Rahimzadeh Rofooei³

1- Assistant Professor, Faculty of Engineering, Mahallat Institute of Higher Education, Mahallat, Iran.

2- Master of Science, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

3- Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.



Citation: Sobhan, S.M.S., Khaki, T., and Rahimzadeh Rafouei, F. (2026), "Numerical study on the effect of fluid–structure–soil interaction on the free vibration of steel tanks", Journal of Steel and Structure, 20(51), Article e246870.

doi [10.22034/jss.2026.580905.1034](https://doi.org/10.22034/jss.2026.580905.1034)

Article info:

Article History:

Received: 22 November 2025

Revised: 18 January 2026

Accepted: 20 January 2026

Published: 4 April 2026

Keywords:

Steel Tank
Soil-Structure Interaction
Free Vibration
Finite Element Analysis
Hydrodynamic Pressure

ABSTRACT

Background: Aboveground cylindrical steel storage tanks are widely used for storing water, petroleum products, and other essential liquids, making them key components of industrial infrastructure. Because these structures are highly susceptible to seismic loading, their damage or failure during earthquakes can result in significant economic and environmental consequences. Therefore, understanding their dynamic behavior is crucial for ensuring their safe and reliable performance. In this context, the present study examines the effects of different soil conditions on the vibration characteristics, natural frequencies, and effective modal mass participation of fluid-filled steel storage tanks.

Methods: In this study, the results of free-vibration analysis of anchored steel cylindrical tanks are investigated using the finite element method while accounting for fluid–structure–soil interaction. The full-scale steel tanks were designed according to the seismic design provisions of the API 650 standard. The steel tank diameter is 30 meters, and the height-to-diameter ratios (H/D) for the broad and slender tanks are 0.4 and 0.8, respectively. In the finite element models, three soil mediums with appropriate dimensions, representing hard, medium, and soft soil layers, were considered.

Results: The natural frequencies, mode shapes, modal mass participation factors, and hydrodynamic pressure distributions of the impulsive mode were calculated using the free-vibration response of tanks with and without soil–structure interaction.

Conclusion: The results indicate that considering soil–structure interaction has a greater influence on the free-vibration response of slender tanks compared to broad tanks. When soil–structure interaction is included, the modal mass participation factor of the slender tank with a flexible foundation decreases by 33% compared to the fixed-base support condition. Softening of the soil beneath the tank leads to a significant reduction in the hydrodynamic pressure acting on the shell of the slender tank in comparison with the broad tank. In the slender tank, soil softening causes a notable change in the hydrodynamic pressure distribution. Accounting for soil–structure interaction in broad tanks reduces the amplitude of the modal shape function in the mid-height region of the tank shell, whereas its effect on the slender tank is negligible.

* Corresponding Author's E-mail: ssobhan@mail.ir



Copyright 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

Due to the critical role of steel storage tanks in various industries, their stability and structural integrity are of great importance from economic, environmental, and safety perspectives. Previous studies have identified three principal categories of free-vibration modes in anchored cylindrical storage tanks. The first category is associated with circumferential shell vibration modes, described by the harmonic function $\cos(n\theta)$, which generate wave patterns around the tank perimeter. The second category comprises axial vibration modes characterized by deformation shapes analogous to those of a cantilever beam. These modes are defined by the number of axial half-waves, represented by the parameter m . The third category corresponds to fluid sloshing modes, which are associated with oscillations of the liquid free surface and are classified according to their distinct free-surface wave configurations. Limited studies have simultaneously investigated the effects of fluid–structure–soil interaction in cylindrical steel tanks, and most existing research has primarily focused on the buckling behavior and seismic response of tanks under earthquake loading without considering soil effects. In this study, the free-vibration behavior of anchored cylindrical steel tanks is investigated using the finite element method while accounting for fluid–structure–soil interaction. The objective is to evaluate the influence of different soil conditions on the dynamic characteristics, natural frequencies, and effective modal mass participation factors of aboveground steel storage tanks.

Methods

The contained fluid was assumed to be incompressible, and the soil medium was modeled as a massless foundation. Full-scale steel tanks were designed in accordance with the seismic design provisions of the API 650 standard. The tank diameter was 30 m, while the height-to-diameter (H/D) ratios of the broad and slender tanks were 0.40 and 0.80, respectively. For all models, the tank was

assumed to be filled with water up to 90% of its total height. The tank shell was designed in accordance with the seismic design provisions of API 650 for design basis ground acceleration of 0.35g. The steel material was assumed to have a density of 7800 kg/m^3 , an elastic modulus of 200 GPa, and a Poisson's ratio of 0.30. For modeling simplicity and consistency with previous studies, the tank bottom plate was assumed to be rigid and fully bonded to the underlying soil without uplift or separation, since the tank was anchored. In the finite element models, three soil mediums with appropriate dimensions, representing hard, medium, and soft soil layers, were considered. In this study, the finite element modeling and analyses were performed using ANSYS software. The tank shell and bottom plate were modeled using the four-node shell elements. Since a modal analysis was conducted, the tank material was assumed to exhibit linear elastic behavior. The contained liquid was represented by the three-dimensional acoustic elements, consisting of eight nodes with one pressure degree of freedom at each node. The surrounding soil domain was modeled using the three-dimensional solid elements, which is defined by eight nodes and three translational degrees of freedom per node. The natural frequencies, mode shapes, modal mass participation factors, and hydrodynamic pressure distributions associated with the impulsive mode were evaluated and used as criteria for comparing the free-vibration response of tanks with and without soil–structure interaction.

Results

Model validation and sensitivity analyses were conducted to assess the accuracy of the finite element model and to verify the robustness of the numerical results. A comparison of the natural vibration periods obtained from the present numerical model with those reported in previous studies and predicted by code-based equations is presented. The results indicate a satisfactory agreement between the numerical predictions and the corresponding reference values. The results indicate that soil–structure interaction has a more pronounced

effect on the free-vibration response of slender tanks than on broad tanks. In the most critical case, when soil-structure interaction was considered, the modal mass participation factor of the slender tank resting on soft soil decreased by 33% compared with the fixed-base condition. Soil softening beneath the tank resulted in a significant reduction in the hydrodynamic pressure acting on the shell of the slender tank compared with the broad tank. Furthermore, the hydrodynamic pressure distribution in the slender tank changed considerably as the supporting soil became softer. Considering soil-structure interaction in broad tanks reduced the amplitude of the mode shape function in the mid-height region of the tank shell, whereas its influence on the slender tank was negligible.

Conclusion

The obtained results demonstrate that a reduction in soil stiffness leads to a decrease in the natural vibration frequency of the system and, consequently, an increase in its natural vibration period. The hydrodynamic pressure distribution in the broad tank was not significantly affected by changes in the supporting soil conditions. However, in the slender tank, soil softening caused substantial changes in the hydrodynamic pressure distribution along the tank wall. Therefore, the use of hydrodynamic pressure distributions derived under the assumption of a rigid tank wall may not be appropriate for nonlinear static analyses of slender steel tanks.

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

The authors declare that no generative AI or AI-assisted technologies were employed in the writing and preparation of this manuscript.

Ethical Consideration

Compliance with ethical guidelines

The author declares that this study is an original research work. All sources, data, software, and methods used are properly cited and referenced. No

data fabrication or falsification has occurred, and the research adheres to all academic integrity guidelines and ethical publishing practices.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and/or publication of this article. No specific grants or funding were provided by any agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Author's contributions

First Author: Investigating, Methodology, Conceptualization, data analyzing and editing original manuscript.

Second Author: Investigating, Methodology, numerical modeling, writing original draft preparation manuscript.

Third Author: Design and supervision on investigation, reviewing and acknowledging the results.

Conflicts of interest

The authors declare that there are no conflicts of interest regarding the publication of this paper.

مطالعه عددی اثر اندرکنش سیال-سازه-خاک بر ارتعاش آزاد مخازن فولادی

محمدسعید سبحان^{۱*}؛ طه خاکی^۲؛ فیاض رحیمزاده رفوی^۳

۱- استادیار، دانشکده مهندسی، مرکز آموزش عالی محلات، محلات

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران



Citation: Sobhan, S.M.S., Khaki, T., and Rahimzadeh Rafouei, F. (2026), "Numerical study on the effect of fluid-structure-soil interaction on the free vibration of steel tanks", Journal of Steel and Structure, 20(51), Article e246870.

doi 10.22034/jss.2026.580905.1034

چکیده

زمینه پژوهش: مخازن فولادی روزمینی از سازه‌های حیاتی برای ذخیره‌سازی آب، نفت و سایر سیالات هستند و نقش مهمی در تداوم عملکرد زیرساخت‌های صنعتی دارند. با توجه به آسیب‌پذیری این مخازن در برابر زلزله و پیامدهای ناشی از نشست یا تخریب آن‌ها، بررسی و ارزیابی رفتار دینامیکی آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی اثر شرایط مختلف خاک بر ویژگی‌های ارتعاشی، فرکانس‌های طبیعی و مشارکت جرم مؤثر مخازن فولادی حاوی سیال است.

روش پژوهش: در این پژوهش نتایج تحلیل ارتعاش آزاد مخازن فولادی استوانه‌ای مهارشده با استفاده از روش اجزای محدود و با در نظر گرفتن اندرکنش سیال-سازه-خاک بررسی شده است. سیال درون مخزن به صورت تراکم‌ناپذیر و محیط خاک زیر آن بدون جرم فرض شده است. مخازن فولادی در ابعاد واقعی و با استفاده از ضوابط طراحی لرزه‌ای استاندارد API 650 طراحی شده‌اند. قطر مخازن فولادی برابر ۳۰ متر و نسبت ارتفاع به قطر مخزن عریض و مخزن بلند (H/D) به ترتیب برابر ۰/۴ و ۰/۸ است. در مدل‌های اجزای محدود، سه نوع جزیره خاک با ابعاد مناسب شامل لایه‌های سخت، متوسط و نرم در نظر گرفته شده است.

یافته‌ها: فرکانس‌های طبیعی، شکل مودها، ضریب مشارکت جرمی مودها و توزیع فشار هیدرودینامیک مود ضربانی مخازن به عنوان معیارهایی برای مقایسه پاسخ ارتعاش آزاد مخازن با و بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه محاسبه شده است.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که در نظر گرفتن اندرکنش سازه-خاک، تأثیر بیش‌تری بر پاسخ ارتعاش آزاد مخازن بلند در مقایسه با مخازن عریض دارد. در ملحوظ نمودن اثر اندرکنش سازه-خاک، ضریب مشارکت جرمی مخزن بلند روی خاک نرم نسبت به حالت تکیه‌گاه ثابت (بدون اندرکنش سازه-خاک)، ۳۳ درصد کاهش یافته است. نرم‌تر شدن خاک زیر مخزن منجر به کاهش محسوس فشار هیدرودینامیک وارد بر پوسته مخزن بلند در مقایسه با مخزن عریض شده است. در مخزن بلند با نرم‌تر شدن خاک زیر مخزن، توزیع فشار هیدرودینامیک تغییر قابل‌توجهی دارد.

اطلاعات مقاله:

سابقه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱ آذر ماه ۱۴۰۴

تاریخ بازنگری: ۲۸ دی ماه ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۳۰ دی ماه ۱۴۰۴

تاریخ انتشار: ۱۵ فروردین ماه ۱۴۰۵

واژگان کلیدی:

مخزن فولادی

اندرکنش سازه-خاک

ارتعاش آزاد

تحلیل اجزای محدود

فشار هیدرودینامیک

* آدرس ایمیل نویسنده مسئول: ssobhan@mail.ir

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

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



۱- مقدمه

با توجه به نقش مهم مخازن در صنایع مختلف، عملکرد سازه‌ای مناسب آن‌ها در برابر بارگذاری‌های شدید از جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و ایمنی از اهمیت بالایی برخوردار است. بررسی رفتار این سازه‌ها در زلزله‌های گذشته نشان داد که حرکات شدید زمین می‌تواند موجب آسیب مخازن استوانه‌ای فولادی شود. به همین دلیل، آیین‌نامه‌های مختلفی برای ارائه الزامات طراحی لرزه‌ای مخازن ذخیره سیال در آمریکا، اروپا و نیوزلند تدوین شده‌اند [۱]. حالت‌های مختلف خرابی که در اثر وقوع زلزله در مخازن مهارشده مشاهده شده است، معمولاً شامل کمناش الاستیک و یا کمناش الاستوپلاستیک پوسته، خرابی اجزای مهار مخزن به تکیه‌گاه، خرابی فونداسیون، آسیب سقف تحت فشار هیدرودینامیکی و شکست لوله‌های اتصال است. از جمله آسیب‌های مهم در مخازن فولادی، کمناش پوسته مخزن است که به دو صورت کمناش الماسی شکل^۱ و یا کمناش پافیلی^۲ رخ می‌دهد. کمناش پوسته مخازن فولادی به پارامترهای مختلفی مانند مشخصات هندسی، شرایط مرزی (مانند سیستم مهار و نوع سقف)، خواص مکانیکی مصالح پوسته، شرایط و نوع بارگذاری و عیوب پوسته بستگی دارد [۲]. با توجه به شکل (۱)، کمناش الاستیک یا کمناش الماسی شکل با اعوجاج پوسته و فرورفتگی در نقاطی از پوسته همراه است. اما کمناش الاستوپلاستیک یا کمناش پافیلی به صورت برآمدگی بیرونی در ناحیه بالای تکیه‌گاه مخزن مشاهده می‌شود. این پدیده می‌تواند منجر به آسیب اتصالات مخزن شده و موجب خروج محتویات مخزن می‌شود [۳].

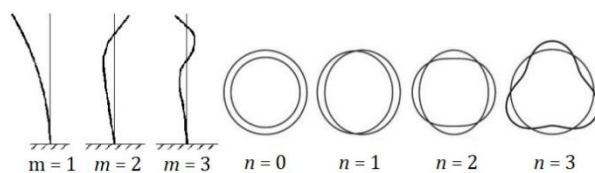


شکل ۱- الف) کمناش پافیلی

(ب) کمناش الماسی شکل پوسته مخزن [۴]

در تحقیقات اولیه مرتبط با رفتار دینامیکی مخازن ذخیره سیال، پاسخ هیدرودینامیکی مخزن به دو مؤلفه ضربانی^۳ و نوسانی^۴ یا تلاطمی^۵ تقسیم شد و هاوژنر^۶ بیان کرد که مود اول ضربانی با فرض این که جداره مخزن رفتاری به صورت تیر کنسول دارد، قابل تعریف است [۵]. همچنین به دلیل اختلاف در مقدار پریود ارتعاش طبیعی مود ضربانی و مود تلاطمی، این دو مؤلفه را می‌توان به صورت جدا از هم در نظر گرفت؛ درحالی که مود ضربانی بیش‌ترین سهم را در مقدار پاسخ سازه دارد. در سایر پژوهش‌های انجام‌شده در مورد رفتار دینامیکی مخازن، مطرح شد که در مخزن تحت تحریک افقی، ممکن است مودهای پیچیده‌تری نسبت به حالت مود کنسولی جداره مخزن تأثیرگذار باشند [۶]. بنابراین شکل‌های مودی مختلفی برای ارتعاش آزاد جداره مخزن پیشنهاد شده است. نتایج نشان داد که مودهای اساسی ارتعاش آزاد مخازن فولادی تحت زمین‌لرزه، لزوماً مرتبط با مود اول ارتعاش به صورت تیر کنسول نیستند و باید با استفاده از مدل امواج پیرامونی به صورت $\cos(n\theta)$ بررسی شوند که n بیانگر تعداد موج پیرامونی است. مودهای ارتعاش آزاد مخازن استوانه‌ای مهارشده در چند نوع بررسی شده‌اند. با توجه به شکل (۲)، نوع اول مودهای ارتعاشی به صورت $\cos(n\theta)$ هستند که به شکل امواجی هارمونیک در راستای محیطی و عمود بر ارتفاع مخزن تشکیل می‌شوند. نوع دوم مودهای ارتعاشی در راستای ارتفاع مخزن و با فرض رفتار مشابه تغییر شکل تیر کنسولی هستند که با نیم‌موج‌های محوری یا پارامتر m مشخص می‌شوند. با توجه به شکل (۳)، نوع سوم، مودهای نوسانی یا تلاطم سیال درون مخزن هستند که به صورت شکل‌های مختلف امواج سطح آزاد سیال طبقه‌بندی می‌شوند.

[۶-۸]



شکل ۲- شکل مودهای ارتعاش محوری و محیطی مخزن [۶ و ۷]

³ Impulsive
⁴ Convective
⁵ Sloshing
⁶ Housner

¹ Diamond-Shaped Buckling
² Elephant Foot Buckling

بارگذاری برای تحلیل استاتیکی غیرخطی و محاسبه ضریب رفتار مخازن هوایی با پایه لوله‌ای است [۱۳].

سبحان و همکاران، پاسخ لرزه‌ای و کماتش دینامیکی مخزن فولادی استوانه‌ای زمینی ذخیره سیال را تحت اثر مجموعه‌ای از مؤلفه‌های افقی و قائم زلزله با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی و تحلیل استاتیکی غیرخطی بارافزون مطالعه کردند [۱۴-۱۶].

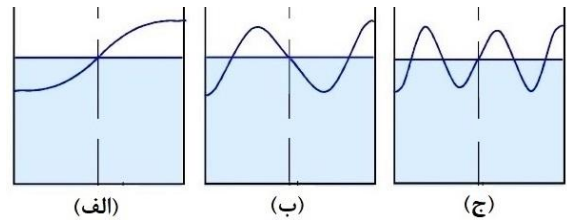
عالمزاده و شکیب، پاسخ لرزه‌ای مخازن فولادی استوانه‌ای را به صورت مهارشده و یا مهارنشده تحت مؤلفه افقی زلزله بررسی و با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که برش پایه و لنگر واژگونی مخزن مهارشده در مقایسه با مخزن مهارنشده به مقدار ۹ تا ۲۶ درصد کاهش یافته است ولی تغییر مکان بام و میزان جرم ضربانی سیال بیش‌تر شده است [۱۷].

در تحقیقات محدودی اثر هم‌زمان اندرکنش سیال، سازه و خاک در مخازن فولادی استوانه‌ای بررسی شده است. بخش قابل‌توجهی از مراجع موجود در ادبیات فنی، به بررسی اندرکنش خاک و سازه در ساختمان‌ها و سایر سازه‌های مهندسی اختصاص دارند و مستقیماً به رفتار دینامیکی مخازن فولادی حاوی سیال نمی‌پردازند. همچنین پژوهش‌های ارائه‌شده در مراجع [۱۴-۱۶] عمدتاً بر رفتار کماتشی و پاسخ لرزه‌ای مخازن تحت بارگذاری زلزله بدون در نظر گرفتن خاک متمرکز بوده‌اند؛ درحالی‌که هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی اثر شرایط مختلف خاک بر ویژگی‌های ارتعاشی، فرکانس‌های طبیعی و مشارکت جرم مؤثر مخازن فولادی حاوی سیال است.

۲- مخازن فولادی مورد بررسی

برای بررسی تأثیر اندرکنش خاک و سازه در مخازن فولادی، دو مخزن عریض و بلند به ترتیب با نسبت ارتفاع به قطر ۰/۴ و ۰/۸ در نظر گرفته شده است. اغلب گزارش‌های مرتبط با آسیب لرزه‌ای مخازن فولادی استوانه‌ای حاکی از آن است که مخازن با پرشدگی ۹۰ درصد به بالا، بیش‌تر تحت تأثیر زلزله آسیب دیده‌اند. همچنین اکثر مخازن توزیع سیستم آب بسته به زمان روز در سطوح بین ۸۰ تا ۱۰۰ درصد نگهداری می‌شوند [۱۸]. در این تحقیق نسبت پرشدگی آب درون مخزن برابر با ۹۰ درصد فرض شده است.

مشخصات، ابعاد و ضخامت جداره مخازن فولادی این پژوهش در شکل (۴) نشان داده شده است. قطر ۳۰ متر در این پژوهش در مطالعات متعدد مرتبط با مخازن فولادی حاوی سیال



شکل ۳- شکل موده‌های نوسانی نامتقارن مخزن: الف) مود اول،

ب) مود دوم، ج) مود سوم [۹]

محققین دیگری با استفاده از روش المان محدود به بررسی موده‌های ارتعاش مخازن مهارشده و مهارنشده پرداختند و نشان دادند که موده‌های به صورت $\cos(n\theta)$ برای n بزرگ‌تر از یک، تأثیر اندکی در پاسخ سازه دارد [۱۰]. در پژوهش‌های برخی محققین بیان شد که فرض رفتار تیرگونه مخازن فولادی دقیق نیست. بنابراین در تحقیقات بعدی بر روی موده‌های ارتعاش پوسته مخزن تمرکز شد. محققین با بررسی مخازن فولادی آسیب‌دیده در زلزله‌های گذشته با استفاده از روش عددی و مدل‌سازی سیال به صورت جرم افزوده، به این نتیجه رسیدند که فرکانس‌های طبیعی ارتعاش مخازن به فرکانس غالب تحریک زلزله‌ها نزدیک بوده و آسیب‌های وارده به مخازن ناشی از تشدید پاسخ لرزه‌ای است [۱۱].

ویرالا^۱ و همکاران، با استفاده از روش اجزای محدود، خصوصیات دینامیکی، شکل مودها و فرکانس‌های ارتعاش طبیعی مخازن فولادی مهارشده را بررسی کردند. آن‌ها با در نظر گرفتن فقط مود ضربانی، مایع درون مخزن را با روش جرم افزوده^۲ و یا با المان آکوستیک^۳ و جداره مخزن را با المان پوسته^۴ مدل‌سازی کردند [۸].

حسین‌زاده و معصومی، انواع موده‌های آسیب لرزه‌ای مخازن فولادی زمینی مهارشده را بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از روش‌های تحلیل استاتیکی، مودال، طیفی و تاریخچه زمانی غیرخطی و ارزیابی ضوابط لرزه‌ای آیین‌نامه API 650 نشان دادند که مخازن مهارنشده مورد مطالعه با نسبت ارتفاع به قطر مخزن بزرگ‌تر یا مساوی یک ($H/D \geq 1$) ناپایدار هستند [۱۲].

خوشنودیان و جلالی، ضریب رفتار مخازن هوایی را با استفاده از روش‌های تحلیل استاتیکی و دینامیکی غیرخطی بررسی کردند. نتایج تحقیق نشان داد که الگوی بار متمرکز، مناسب‌ترین الگوی

¹ Virella

² Added Mass

³ Acoustic Element

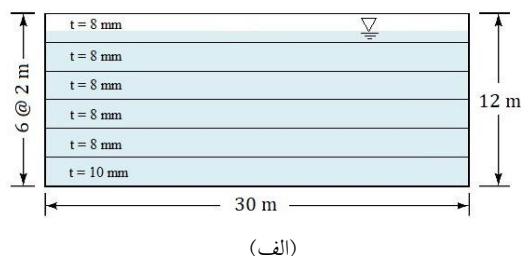
⁴ Shell Element

پیچیدگی مدل و تمرکز بر رفتار دینامیکی پوسته مخزن، از مدل‌سازی مستقیم سقف صرف‌نظر شده و اثر آن به صورت شرایط مرزی معادل در لبه فوقانی لحاظ شده است. با این حال، سختی خمشی و غشایی سقف واقعی می‌تواند بر پاسخ دینامیکی مخزن تأثیر بگذارد و مدل‌سازی آن به صورت یک حلقه صلب، لزوماً تمامی جنبه‌های رفتاری سقف را بازتاب نمی‌دهد. از این رو عدم مدل‌سازی دقیق سقف مخزن به عنوان یکی از محدودیت‌های پژوهش حاضر است.

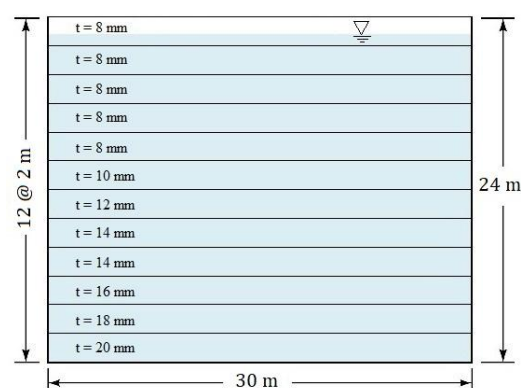
در برخی تحقیقات گذشته نظیر [۱۴-۱۶]، با توجه به تقارن هندسی مخزن و برای کاهش هزینه محاسبات، نصف مخزن با در نظر گرفتن شرایط مرزی تقارن، مدل‌سازی شده است. در این پژوهش از یک مدل سه‌بعدی استفاده شده و تنها نیمی از مخزن مدل‌سازی شده است. شرایط مرزی صفحه تقارن صرفاً جابه‌جایی عمود بر صفحه را محدود می‌کند؛ بنابراین تمامی مودهای سازگار با این شرط تقارن، همچنان قابلیت ظهور و استخراج دارند. در نتیجه استفاده از این روش، معادل یک مدل محور متقارن نبوده و به حذف کامل مودهای محیطی منجر نمی‌شود.

بر اساس تحقیقات انجام‌شده، حداقل عرض جزیره خاک زیر سازه یک‌برابر و طول آن چهاربرابر قطر مخزن فرض شده است [۲۰ و ۲۱]. در جدول (۱)، سه نوع جزیره خاک شامل نوع ۱ (S-I)، با یک لایه یکنواخت خاک سخت (Soil C)، نوع ۲ (S-II) با دو لایه خاک‌های سخت و متوسط (Soil C, Soil D) و نوع ۳ (S-III) با سه لایه خاک‌های سخت، متوسط و نرم (Soil C, Soil D, Soil E) در نظر گرفته شده است. شکل شماتیک جزیره خاک برای خاک سه لایه زیر مخزن در شکل (۵) رسم شده است. در جدول (۲) مشخصات مصالح سه نوع خاک بر اساس طبقه‌بندی آیین‌نامه ۷-۲۲ ASCE و مطابق با خصوصیات خاک مورد استفاده در پژوهش‌های گذشته فرض شده است [۲۲ و ۲۳]. با توجه به این که معمولاً در مخازن استوانه‌ای بزرگ از فونداسیون حلقوی بتنی در زیر مخزن استفاده می‌شود، در مدل اجزای محدود شامل جزیره خاک، فونداسیون حلقوی بتنی با مقطع ۰/۵ متر (عرض) در ۱ متر (ارتفاع) در نظر گرفته شده است. مدول الاستیسیته ۳۰ گیگاپاسکال، ضریب پواسون ۰/۲۵ و چگالی ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب برای مصالح بتن فونداسیون فرض شده است.

نظیر مراجع [۱۴-۱۶] مورد استفاده قرار گرفته و مبنای آن مخازن واقعی موجود در صنعت بوده است. در تحقیقات انجام‌شده در مراجع [۳، ۸، ۱۴] از مخازنی با قطر ۳۰ متر استفاده شده است. همچنین در مطالعه ویرلا و همکاران تصریح شده است که مخازن فولادی به قطر ۳۰ متر در کشور پورتوریکو به کار گرفته شده است [۸].



(الف)



(ب)

شکل ۴- مخازن فولادی: الف) مخزن عریض، ب) مخزن بلند

مشخصات و ابعاد مخزن فولادی مورد استفاده در این پژوهش مشابه تحقیقات انجام‌شده توسط سبحان و همکاران انتخاب شده است [۱۴-۱۶]. طراحی جداره مخزن مطابق با ضوابط طراحی لرزه‌ای استاندارد API 650 و برای شتاب مبنای طرح ۰/۳۵ انجام شده است [۱۹]. مصالح فولادی با چگالی ۷۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگاپاسکال و نسبت پواسون ۰/۳ فرض شده است. برای سهولت مانند تحقیقات قبلی نظیر [۳ و ۱۴] چون مخزن مهارشده است، ورق کف مخزن به صورت صلب و بدون جداسازی و بلندشدگی از روی خاک فرض شده است.

مشابه تحقیقات گذشته نظیر مراجع [۳، ۱۴، ۱۵]، به منظور ساده‌سازی مدل اجزای محدود، سقف بالای مخزن مدل‌سازی نشده است اما اثر سختی سقف مخزن با فرض یک حلقه صلب در بالای جداره لحاظ شده است. در این پژوهش نیز برای کاهش

گره و سه درجه آزادی در هر گره است. همچنین فرض رفتار خطی برای خاک لحاظ شده است. با اعمال شرایط مرزی تقارن به گره‌های موجود در صفحه تقارن مدل مخزن، نیمی از مخزن مدل‌سازی شده و تلاش محاسباتی مورد نیاز کاهش می‌یابد. حال با وجود المان آکوستیک در مسئله و اندرکنش سازه و سیال که محیط سیال با المان‌های آکوستیک در فضای اوایلین^۲ و المان‌های سازه در فضای لاگرانژی تعریف شده‌اند ناچار باید علاوه بر معادله حرکت سازه، معادلات نویراستوکس^۳ شامل معادله مومنتوم^۴ و معادله پیوستگی هم در نظر گرفته شود. به این ترتیب و با فرض سیال تراکم‌ناپذیر، فشار آکوستیک در سیال با استفاده از معادله انتشار موج خطی تعریف شده است. در نهایت معادله حرکت سیستم سازه و سیال با در نظر گرفتن میرایی، به صورت ماتریس‌های نامتقارن، در رابطه (۱) تشکیل خواهد شد [۲۴].

$$\begin{bmatrix} [M_S] & 0 \\ \rho_0 [R]^T & [M_F] + [S_F] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{ \ddot{u}_e \} \\ \{ \ddot{p}_e \} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_S] & 0 \\ 0 & [C_F] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{ \dot{u}_e \} \\ \{ \dot{p}_e \} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_S] & -[R] \\ 0 & [K_F] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{ u_e \} \\ \{ p_e \} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_S \\ f_F \end{Bmatrix} \quad (1)$$

که $[M_S]$ ماتریس جرم سازه، $[M_F]$ ماتریس جرم سیال آکوستیک، $[S_F]$ ماتریس جرم تلاطمی آکوستیک، $[R]$ ماتریس مرزی سیال آکوستیک، (ρ_0) ثابت چگالی جرمی سیال آکوستیک، $[C_S]$ ماتریس میرایی سازه، $[C_F]$ ماتریس میرایی سیال آکوستیک، $[K_S]$ ماتریس سختی سازه، $[K_F]$ ماتریس سختی سیال آکوستیک، $\{u_e\}$ بردار تغییر مکان گرهی سازه، $\{p_e\}$ بردار فشار گرهی سیال، $\{f_S\}$ بردار بار گرهی سازه و $\{f_F\}$ بردار بار سیال آکوستیک است. در این پژوهش اثر میرایی لحاظ نشده است. بنابراین در معادله حرکت ارتعاش آزاد، ماتریس‌های میرایی صفر در نظر گرفته شده و تنها ماتریس‌های جرم و سختی در تعیین فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها مشارکت دارند. معادله حرکت ارتعاش آزاد سیستم مخزن-سیال به صورت رابطه (۲) است:

$$\begin{bmatrix} [M_S] & 0 \\ \rho_0 [R]^T & [M_F] + [S_F] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{ \ddot{u}_e \} \\ \{ \ddot{p}_e \} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_S] & -[R] \\ 0 & [K_F] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{ u_e \} \\ \{ p_e \} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

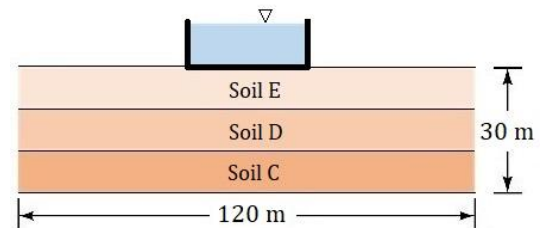
مطابق تحقیقات سجادی و همکاران، برای شبیه‌سازی صحیح مرزهای جانبی جزیره خاک و انتشار امواج در محیط خاک، در هر تراز ارتفاع جزیره خاک، درجات آزادی افقی تغییر مکان گره‌ها

جدول ۱- جزئیات لایه‌بندی و نوع خاک

جزیره خاک	تعداد لایه	مشخصات لایه	ضخامت لایه (m)	نوع خاک
S-I	یک	لایه یکنواخت	30	C
S-II	دو	لایه پایینی	10	C
		لایه بالایی	20	D
		لایه پایینی	10	C
S-III	سه	لایه میانی	10	D
		لایه بالایی	10	E

جدول ۲- مشخصات انواع خاک [۲۳]

نوع خاک	چگالی (kg/m ³)	سرعت موج برشی (m/s)	نسبت بواسون	مدول برشی (MPa)
C	1730	600	0.28	623.4
D	1730	320	0.39	177.3
E	1470	150	0.40	33.1



شکل ۵- شکل مخزن و ابعاد جزیره خاک در حالت خاک نوع ۳ (S-III)

۳- مدل‌سازی و شرایط مرزی

در این تحقیق از نرم‌افزار ANSYS برای مدل‌سازی و تحلیل اجزای محدود استفاده شده است. ورق کف و پوسته مخزن با المان سه‌بعدی و چهارگره‌ای SHELL181 که در هر گره آن، شش درجه آزادی وجود دارد، مدل‌سازی شده است. برای انجام تحلیل مودال، رفتار مصالح مخزن، خطی و ارتجاعی فرض شده است. برای شبیه‌سازی سیال در مدل‌سازی، المان سه‌بعدی آکوستیک^۱ FLUID30 با هشت گره و یک درجه آزادی فشار در هر گره استفاده شده است. به منظور مدل‌سازی محیط خاک از المان سه‌بعدی جامد SOLID185 استفاده شده است که دارای هشت

2 Eulerian
3 Navier-Stokes Equations
4 Momentum Equation

¹ Acoustic

۵- نتایج تحلیل مودال

مقادیر فرکانس‌های ارتعاش طبیعی سیستم مخزن و خاک متناظر با نوع تکیه‌گاه تا فرکانس ۲۰ هرتز توسط تحلیل مودال استخراج شده است. مقادیر فرکانس‌های طبیعی به تفکیک مودهای اول و دوم تلاطمی و ضربانی در جدول (۵) ارائه شده است.

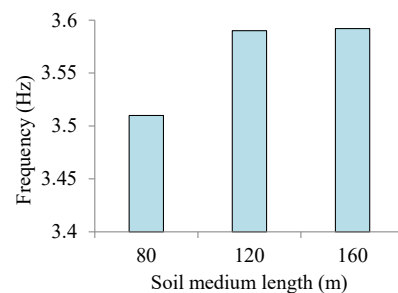
نسبت مشارکت مودهای مختلف ضربانی و تلاطمی مخازن عریض و بلند در شرایط تکیه‌گاه ثابت که به مقدار مود غالب نرمال شده است، در شکل (۸) مشاهده می‌شود. مود غالب ارتعاش طبیعی برای هر دو مخزن عریض و بلند، مود اول ضربانی با $n = 1$ و $m = 1$ است. مود دوم غالب برای مخزن عریض، مود ضربانی با $n = 1$ و $m = 5$ و برای مخزن بلند، مود ضربانی با $n = 1$ و $m = 3$ است. در شکل‌های (۹) و (۱۰) به ترتیب شکل مودهای مختلف تلاطمی و ضربانی مخازن عریض و بلند با شرایط تکیه‌گاه ثابت نشان داده شده است. در شکل (۱۱) نمودار مقادیر مشارکت جرم‌های مؤثر، نرمال‌شده به مود اساسی، برای فرکانس‌های مختلف مودها ارائه شده است.

در شکل (۱۲) مقادیر توزیع فشار هیدرودینامیک در جداره مخزن برای حالت‌های متفاوت تکیه‌گاهی، شامل تکیه‌گاه ثابت (Fixed Base) و سه نوع جزیره خاک، نشان داده شده است. توزیع فشار در هر دو حالت با رابطه تحلیلی پیشنهادی توسط مرجع [۲۸] با فرض جداره مخزن صلب مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که توزیع فشار هیدرودینامیک در مخازن عریض با جداره انعطاف‌پذیر، با توزیع فشار در مخزن با جداره صلب شبیه است؛ ولی در مخازن بلند تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای بین نتایج فشار هیدرودینامیک مخزن انعطاف‌پذیر و مخزن با جداره صلب وجود دارد.

در این مقاله ابعاد جزیره خاک بر اساس ابعاد پیشنهادی مطالعات پیشین و مراجع [۲۰ و ۲۱] انتخاب شده است. همچنین تحلیل حساسیت برای اطمینان بیش‌تر صورت گرفته است. سه مقدار مختلف ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ متر برای بررسی اثر طول جزیره خاک بر روی نتایج تحلیل ارتعاش آزاد مخزن در نظر گرفته شده است. در شکل (۷) نتایج فرکانس مد ضربانی مخزن روی خاک نوع S-III با ابعاد مختلف جزیره خاک ارائه شده است. مطابق شکل (۷)، اختلاف بین نتایج برای طول‌های ۱۲۰ و ۱۶۰ متر ناچیز است. بنابراین پیشنهاد مراجع مربوطه برای طول جزیره خاک به اندازه چهار برابر قطر مخزن یعنی ۱۲۰ متر مناسب است.

جدول ۴- پریودهای ارتعاش طبیعی جزیره خاک (ثانیه)

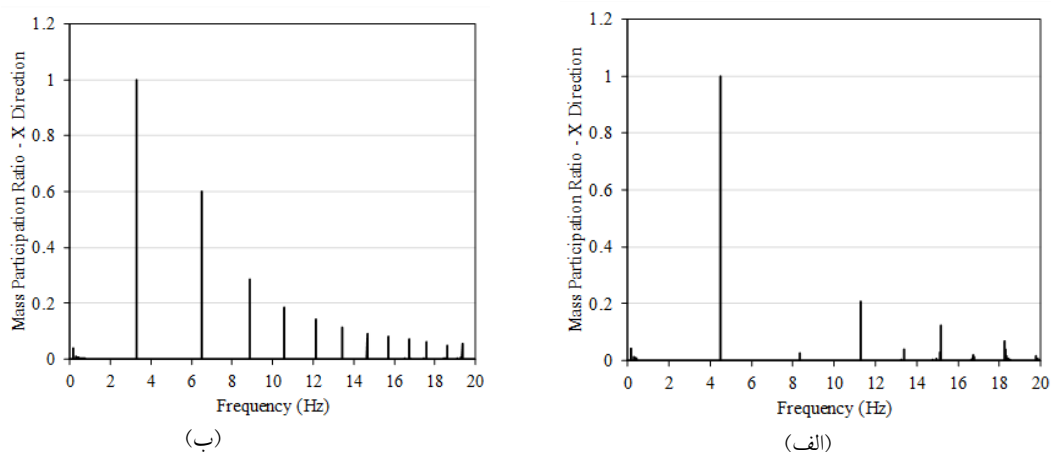
مود ارتعاش	تحلیل اجزای محدود	رابطه (۴)	اختلاف (%)
اول ($n=0$)	0.1997	0.2	0.15
دوم ($n=1$)	0.0665	0.0666	0.15



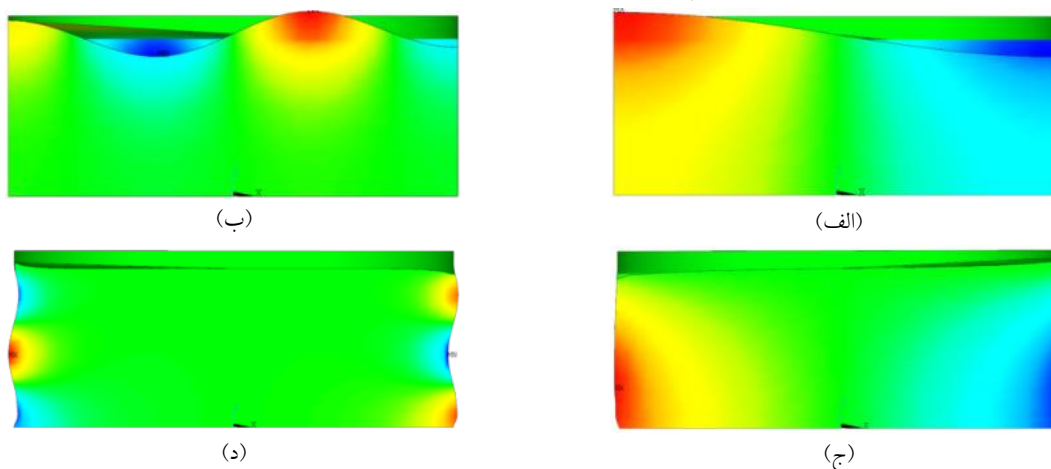
شکل ۷- مقایسه فرکانس مود ضربانی مخزن روی خاک نوع S-III با طول‌های مختلف جزیره خاک

جدول ۵- فرکانس‌های ارتعاش طبیعی حاصل از تحلیل مودال (هرتز)

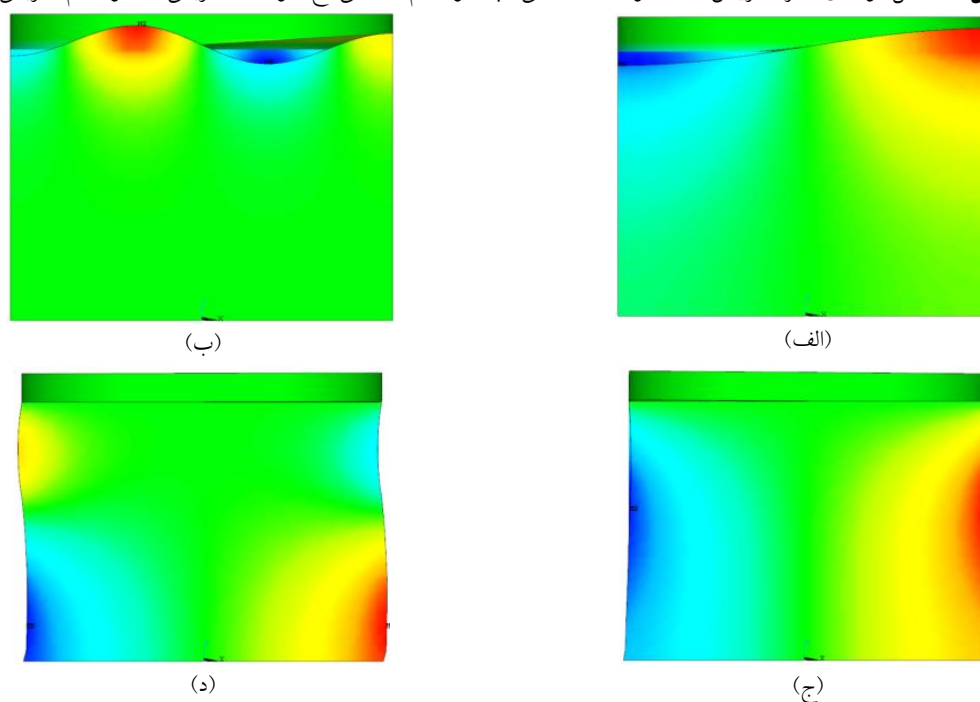
مخزن بلند				مخزن عریض				مود ارتعاش
با جزیره خاک			بدون خاک	با جزیره خاک			بدون خاک	
S-III	S-II	S-I		S-III	S-II	S-I		
0.17	0.17	0.17	0.17	0.16	0.16	0.16	0.16	اول تلاطمی
0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	دوم تلاطمی
2.12	2.80	3.04	3.28	3.40	4.11	4.35	4.50	اول ضربانی
6.10	6.32	6.41	6.49	16.06	11.14	11.21	11.29	دوم ضربانی



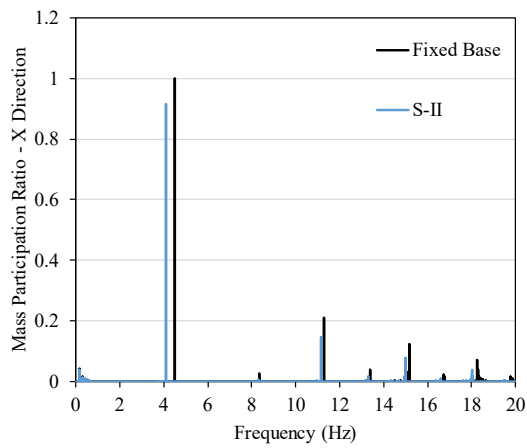
شکل ۸- مدل مقادیر مشارکت نرمال شده جرم مؤثر مخزن در راستای صفحه تقارن (محور X): الف) مخزن عریض، ب) مخزن بلند



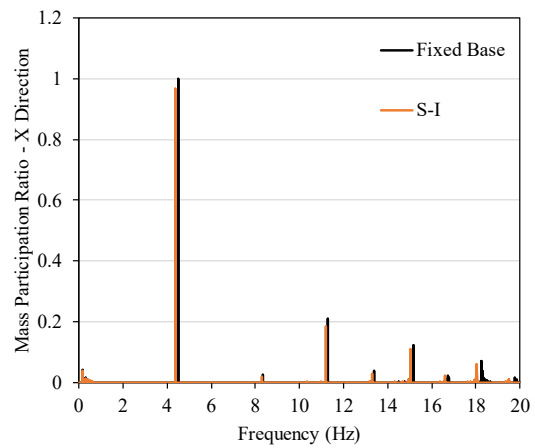
شکل ۹- شکل مدهای مخزن عریض: الف) مود اول تالطمی، ب) مود دوم تالطمی، ج) مود اول ضربانی، د) مود دوم ضربانی



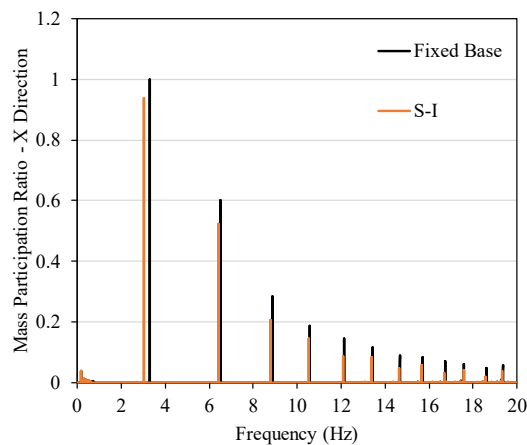
شکل ۱۰- شکل مدهای مخزن بلند: الف) مود اول تالطمی، ب) مود دوم تالطمی، ج) مود اول ضربانی، د) مود دوم ضربانی



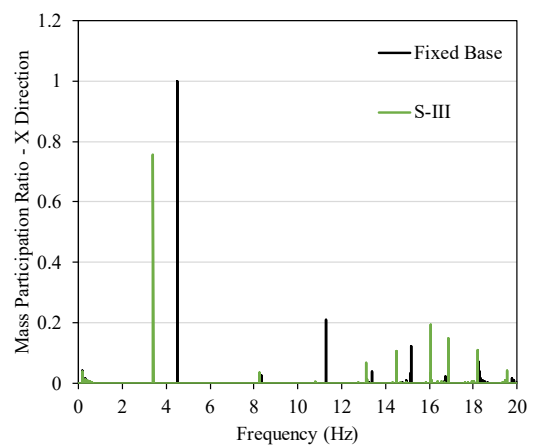
(ب)



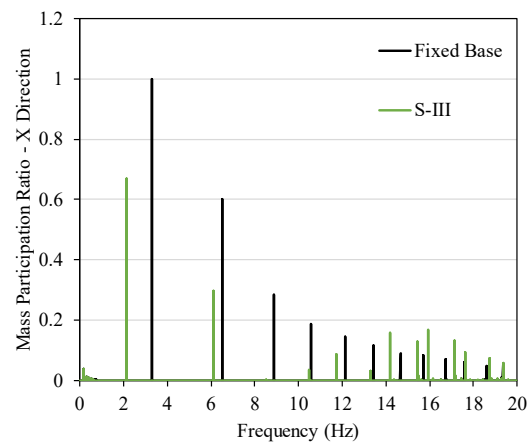
(الف)



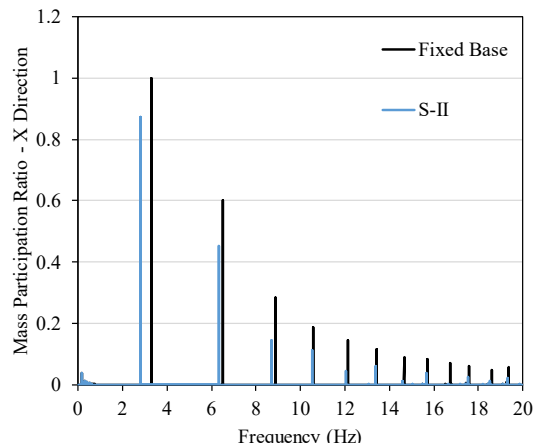
(د)



(ج)



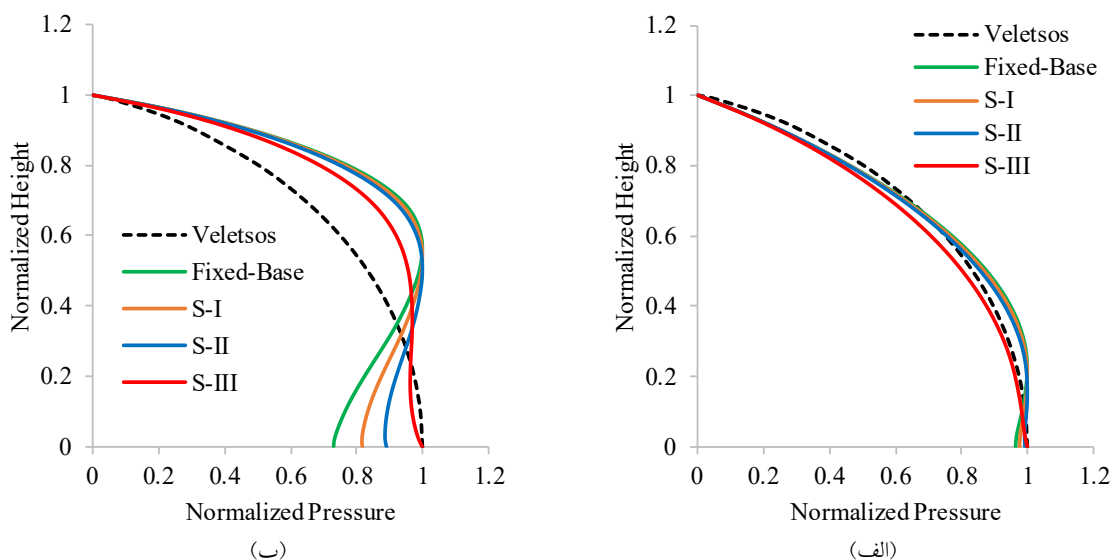
(و)



(ه)

شکل ۱۱- مقایسه مقادیر مشارکت جرم موثر مودی نرمال شده برای مخزن در شرایط تکیه گاهی مختلف:

الف، ب، ج) مخزن عریض، د، ه، و) مخزن بلند



شکل ۱۲- مقایسه توزیع فشار هیدرودینامیک وارد بر جداره مخزن در شرایط تکیه گاهی مختلف: (الف) مخزن عریض، (ب) مخزن بلند

۶- بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر اندرکنش سازه و خاک بر فرکانس‌های طبیعی ارتعاش سیستم مخزن و سیال، توزیع فشار هیدرودینامیک وارد بر جداره و شکل مودی پوسته مخزن با استفاده از روش اجزای محدود بررسی شد. دو مخزن استوانه‌ای مهارشده عریض و بلند با نسبت ارتفاع به قطر به ترتیب $0/4$ و $0/8$ بر اساس آیین‌نامه طراحی شده است. مخازن در شرایط تکیه گاهی مختلف شامل تکیه‌گاه ثابت و بدون خاک زیر مخزن و سه نوع مختلف جزیره خاک S-I، S-II و S-III زیر مخزن تحلیل شدند. نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج تحلیلی موجود در ادبیات فنی تطابق نزدیکی دارد.

در این تحقیق، نتایج تحلیل مودال نشان داد که مدهای ارتعاش محیطی به صورت $\cos(n\theta)$ ضریب مشارکت مودی ناچیزی داشته و مود غالب مخزن، مود محیطی با $n=1$ است. اندرکنش سازه و خاک موجب کاهش مشارکت جرم مؤثر در مود اساسی مخازن عریض و بلند شده است؛ این کاهش در جزیره خاک نوع ۳ (S-III) برای مخزن عریض به مقدار حداکثر ۲۵ درصد و در مخزن بلند به مقدار ۳۳ درصد است. همچنین نتایج به دست آمده حاکی از آن است که به هر میزان خاک زیر مخزن نرم‌تر باشد فرکانس ارتعاش طبیعی سیستم کاهش و به طبع آن پیروید طبیعی ارتعاش افزایش می‌یابد که با تحقیقات گذشته هم‌خوانی دارد.

مطابق با نتایج تحقیقات گذشته نظیر مرجع سبحان و همکاران، توزیع فشار هیدرودینامیک در مخازن عریض با پوسته انعطاف‌پذیر شبیه توزیع فشار هیدرودینامیک با فرض جداره صلب است. همچنین مشاهده شد که با کاهش سختی خاک زیر مخزن، فشار هیدرودینامیک وارد بر پوسته مخزن کاهش می‌یابد. توزیع فشار هیدرودینامیک در مخزن عریض با تغییر نوع خاک زیر مخزن، تغییر قابل ملاحظه‌ای نکرد؛ اما در مخزن بلند با نرم‌تر شدن خاک زیر مخزن، توزیع فشار هیدرودینامیک وارد بر جداره، تغییر قابل توجهی دارد. در حالت خاک نوع ۳ (S-III) اثر انعطاف‌پذیری جداره مخزن در تغییر توزیع فشار هیدرودینامیک در مقایسه با توزیع فشار مخزن با جداره صلب، کم‌تر است. در نتیجه استفاده از الگوی توزیع فشار هیدرودینامیک با فرض جداره صلب برای تحلیل استاتیکی غیرخطی مخازن بلند مناسب نخواهد بود.

- Infrastructure Researches, 8(1), pp.21-34. (in Persian)
- [16] Sobhan, M.S., and Dehghani, E. (2024), "Numerical study of buckling of steel storage tank under horizontal and vertical ground motions", *Journal of Structure and Steel*, 34(46), pp.19-29. (in Persian)
- [17] Alemzadeh, H., and Shakib, H. (2017), "Numerical study on the response of steel ground tanks with free rocking motion under horizontal earthquake excitation", *Journal of Structure and Steel*, 10(20), pp.71-79. (in Persian)
- [18] 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.
- [19] API Standard 650 (2007), "Welded Tanks for Oil Storage" American Petroleum Institute.
- [20] Wolf, J. (1985), "Dynamic soil-structure interaction", Prentice Hall, Incorporated.
- [21] Cayci, B.T., Inel, M., and Ozer, E. (2021), "Effect of soil-structure interaction on seismic behavior of mid-and low-rise buildings", *International Journal of Geomechanics*, 21(3), pp.04021009.
- [22] ASCE, (2022) "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE 7-22", American Society of Civil Engineers.
- [23] Tabatabaiefar, S.H.R., Fatahi, B., and Samali, B. (2013), "Seismic behavior of building frames considering dynamic soil-structure interaction", *International Journal of Geomechanics*, 13(4), pp.409-420.
- [24] ANSYS, I. (2012), "ANSYS Mechanical APDL Theory Reference ", ANSYS, Incorporated.
- [25] Sadjadi, M., Fadaee, M., Ghannad, M.A., and Jahankhah, H. (2023), "Seismic performance of deformable rocking soil-structure systems subjected to pulse-type excitations", *Journal of Earthquake Engineering*, 27(12), pp.3290-3318.
- [26] Malhotra, P. (2000), "Practical nonlinear seismic analysis of tanks", *Earthquake Spectra*, 16(2), pp.473-492.
- [27] Kramer, S.L. (1996), "Geotechnical earthquake engineering", Prentice Hall, New York.
- [28] Veletsos, A.S. (1984), "Seismic response and design of liquid storage tanks", *Guidelines for the seismic design of oil and gas pipeline systems*, pp.255-370.
- [1] Fingas, M. (2022), "Above ground storage tank oil spills: applications and case studies", Gulf Professional Publishing.
- [2] Niwa, A., and Clough, R.W. (1982), "Buckling of cylindrical liquid-storage tanks under earthquake loading", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 10(1), pp.107-122.
- [3] Buratti, N., and Tavano, M. (2014), "Dynamic buckling and seismic fragility of anchored steel tanks by the added mass method", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 43(1), pp.1-21.
- [4] Brunesi, E., and Nascimbene, R. (2024), "Evaluating the seismic resilience of above-ground liquid storage tanks", *Buildings*, 14(10), pp.3212.
- [5] Housner, G.W. (1963), "The dynamic behavior of water tanks", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53(2), pp.381-387.
- [6] Haroun, M.A. (1983), "Vibration studies and tests of liquid storage tanks", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 11(2), pp.179-206.
- [7] Amabili, M. (2008), "Nonlinear vibrations and stability of shells and plates", Cambridge University Press.
- [8] 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.
- [9] Dodge, F.T. (2000), "The new dynamic behavior of liquids in moving containers", Southwest Research Institute, San Antonio, TX.
- [10] Barton, D.C., and Parker, J.V. (1987), "Finite element analysis of the seismic response of anchored and unanchored liquid storage tanks", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 15(1), pp.299-322.
- [11] Malhotra, P.K., and Wenk, T. (2000), "Simple procedure for seismic analysis of liquid-storage tanks", *Structural Engineering International*, 3(1), pp.197-201.
- [12] Hosseinzadeh, N., and Masoumi Goudarzi, A. (2008), "Evaluation of seismic failure modes and retrofitting methods for unanchored cylindrical steel tanks in an oil complex", *Journal of Structure and Steel*, 2(3), pp.25-34. (in Persian)
- [13] Khoshnoudian, F., and Jalali, R. (2008), "Behavior factor of elevated reinforced concrete water tanks with shaft staging", *Journal of Structure and Steel*, 2(3), pp.35-47. (in Persian)
- [14] Sobhan, M.S., Rofooei, F.R., and Attari, N.K.A. (2017), "Buckling behavior of the anchored steel tanks under horizontal and vertical ground motions using static pushover and incremental dynamic analyses", *Thin-Walled Structures*, 112, pp. 173-183.
- [15] Sobhan, M.S., and Hosseini, P. (2022), "A study of the buckling behavior of above ground cylindrical steel tank under seismic loading", *Civil*