

Buckling of Above-ground Steel Tank with Additional Stiffening Rings under Tsunami Pressure

Shahrokh Parvar¹ , Mehran S. Razzaghi^{2✉} , Armin Aziminejad³

1. Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Qa.C., Qazvin, Iran. Email: shahrokh.parvar@iau.ac.ir

2. Corresponding author, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Qa.C., Qazvin, Iran. Email: mehran.razzaghi@iau.ac.ir

3. Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, SR.C., Tehran, Iran. Email: Arminaziminejad@gmail.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received

2026-07-10

Received in revised form

2026-08-25

Accepted

2026-09-11

Available online

2026-10-01

Keywords:

Aboveground Storage Tank

Buckling

Stiffening Rings

Tsunami

Computational Fluid Dynamic

ABSTRACT

Steel cylindrical storage tanks are among the critical infrastructures for liquid storage and are vulnerable to severe environmental forces, such as tsunamis. The integrity of these tanks is essential to prevent catastrophic failures, leakages, and environmental damage when exposed to tsunami events. This study analyzes the buckling behavior of an anchored, open-top service tank subjected to tsunami-induced hydrodynamic pressure. The objective of this study was to investigate how the addition of stiffening rings to the tank shell can enhance its stability. Computational fluid dynamics (CFD) was employed to simulate the tsunami bore flow in order to determine the pressure distribution around the tank. The obtained pressure distribution was then used in linear buckling analysis (LBA) and geometric nonlinear analysis including imperfections (GNIA) to compute the buckling pressure. The present study revealed that the shape of the stiffener, do not play a significant role in the buckling behavior of tanks. Placing stiffening rings at a distance greater than twice the bore depth does not improve the buckling resistance of the tank. Nevertheless, stiffener placement in the bottom parts of the tank's shell may lead to notable enhancement in the buckling capacity. The most optimal configuration occurs when the stiffeners are positioned approximately at half the bore depth above the tank base.

Cite this article: Parvar, Shahrokh., S. Razzaghi, Mehran., & Aziminejad, Armin. (2026). Buckling of Above-ground Steel Tank with Additional Stiffening Rings under Tsunami Pressure. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 3(3),86-102. DOI: 10.22126/amcen.2026.14355.1104



© The Author(s).

Publisher: Razi

DOI: 10.22126/amcen.2026.14355.1104

Introduction

Over the past two decades, devastating events such as the 2004 Indian Ocean tsunami, the 2011 Tohoku tsunami, the 2018 Palu tsunami, and the 2018 Sunda Strait tsunami have inflicted irreparable economic and environmental losses on coastal communities. These massive waves, often generated by submarine earthquakes or seafloor landslides, propagate across the ocean at high speeds and, upon approaching shorelines, transform into highly rapid and turbulent bore flows. The occurrence of such flows has caused extensive damage to various structures, including bridges, buildings, and industrial facilities. Field and experimental studies have demonstrated that, unlike wind loads and storm surge waves, tsunami-induced pressure can target only specific portions of a structure. Due to the non-uniform and pulse-like nature of tsunami pressure, many structures designed solely to resist wind or ordinary waves have exhibited inadequate performance under tsunami loading. Consequently, a precise understanding of tsunami–structure interaction and the development of retrofitting strategies tailored to this type of loading has become a research priority in coastal regions.

Given the widespread deployment of oil, gas, and chemical storage facilities in coastal zones, aboveground steel storage tanks (ASTs) are among the structures most severely exposed to tsunami risk. These tanks, with their thin shells and lightweight walls, are inherently vulnerable to horizontal forces induced by floodwaters. Field evidence from the 2004 and 2011 tsunamis indicates that damage to such tanks has included sliding, flotation, overturning, and local or global buckling of the shell walls. In addition to structural damage, the leakage of hazardous materials from damaged tanks can result in irreversible environmental catastrophes. Therefore, assessing the stability of these tanks under tsunami loading and proposing effective strengthening measures is of paramount importance, not only from a structural engineering perspective but also from an environmental risk management standpoint.

Method

This study investigates the use of an additional stiffening ring to improve the buckling performance of an open-top aboveground storage tank with a fixed base under tsunami-induced pressure. The geometry of the investigated tank is presented in Table 1. The selected tank is assumed to be in service, and the shell thickness of each course is provided in Table 2. The stiffening rings installed at the upper portions of open-top tanks to enhance stability under wind loads are classified as wind girders. The objective of this study is to repurpose wind girders as auxiliary stiffening rings at various elevations to evaluate their effect on the buckling capacity of tanks under tsunami loading. This study compares the buckling behavior of tanks with and without stiffeners at different heights under tsunami pressure. Two load patterns were applied to the tank models: gravitational force for the self-weight of the structure and tsunami pressure as an external load. Linear buckling analysis (LBA) and geometric nonlinear analysis including imperfections (GNIA) are performed in this study using the finite element software ANSYS.

Results

The pressure-displacement curves extracted from numerical studies indicated that with proper placement of stiffeners into the tank shell, buckling resistance of more than 70% can be achieved. Other results showed that the tank with stiffener not only has better stability against the pressure caused by tsunami flood flow, but also shows good performance despite having geometric imperfections.

Conclusions

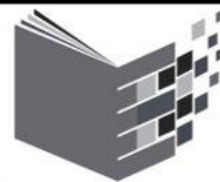
The primary objective of this paper was to investigate the effect of stiffening rings on the stability of open-top steel storage tanks under tsunami-induced pressure. Three types of stiffeners, selected in accordance with API 650, were added to the tank as auxiliary appendages. Computational fluid dynamics (CFD) was employed to determine the pressure exerted by the fluid on the tank walls, enabling the extraction of the external tsunami pressure distribution on the shell. Following the extraction of the pressure distribution, linear buckling analysis (LBA) and geometric nonlinear analysis including imperfections (GNIA) were utilized to examine the influence of the stiffeners on the stability of the sample tank. From the analyses, it can be concluded that the optimal location for placing the stiffener is approximately at half the liquid filling depth above the tank base, whereas positioning them at twice the filling depth above the base does not alter the buckling resistance of the tank under tsunami pressure. The use of stiffeners alone increased the buckling resistance of the model by more than 70%. A larger cross-sectional area of the stiffener does not necessarily enhance the buckling resistance of the tank, and comparable high resistance can be achieved with smaller cross-sections. Hence, further complementary studies with a greater number of specimens are warranted. The relative positioning of tanks and their proximity to one another can influence the magnitude of tsunami pressure exerted on their walls. Therefore, the performance of tanks with additional stiffeners under dense configurations could be examined in future studies. The use of stiffening rings in steel storage tanks significantly enhances their resistance to tsunami-induced pressures. Proper design and placement of stiffeners contribute to reducing failures, lowering repair costs, and mitigating environmental hazards. This renders them a valuable consideration in the design of tanks located in coastal regions.

Author Contributions

All authors participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



بررسی کمانش مخازن فولادی روزمینی با حلقه های سخت کننده اضافی تحت فشار سونامی

شاهرخ پروار^۱، مهران سیدرزاقی^۲✉، آرمین عظیمی نژاد^۳

۱. گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران. رایانامه : shahrokh.parvar@iau.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران. رایانامه : Mehran.razzaghi@iau.ac.ir

۳. گروه مهندسی عمران، دانشگاه علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه : Arminaziminejad@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۱۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۰ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۹ کلیدواژه ها: مخزن روزمینی، کمانش، حلقه های سخت کننده، سونامی، مکانیک سیالات محاسباتی	مخازن ذخیره سازی فولادی از جمله زیرساخت های حیاتی برای نگهداری مایعات هستند و در برابر نیروهای محیطی شدید، مانند سونامی، آسیب پذیر می باشند. این در حالی است که حفظ یکپارچگی مخازن برای جلوگیری از خرابی های فاجعه بار، نشت و آسیب های زیست محیطی زمانی که در معرض سونامی قرار می گیرند، ضروری است. این مطالعه رفتار کمانشی یک مخزن روباز تحت بهره برداری که در معرض فشار ناشی از سونامی قرار دارد را ارزیابی می کند. هدف این پژوهش بررسی چگونگی تأثیر افزودن حلقه های سخت کننده به پوسته مخزن بمنظور افزایش پایداری آن است. از دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه سازی جریان سیلابی سونامی بمنظور تعیین توزیع فشار در اطراف مخزن استفاده شد. سپس از توزیع فشار بدست آمده برای تحلیل خطی (LBA) و تحلیل هندسی غیرخطی شامل نقص هندسی (GNIA) برای محاسبه فشار کمانشی استفاده شد. این مطالعه نشان داد که شکل سخت کننده تأثیری بر بهبود رفتار کمانشی پوسته ندارد و موقعیت قرار گیری آن ها عامل مهم تری است. قرار دادن حلقه های سخت کننده در فاصله ای بیش از دو برابر عمق آبگیری، مقاومت کمانش مخزن را بهبود نمی بخشد، اما در صورتی که سخت کننده در یک چهارم پایینی پوسته قرار گیرد می تواند موجب بهبود رفتار کمانشی مخزن شود. مناسب ترین حالت زمانی رخ می دهد که سخت کننده ها تقریباً در نصف عمق آبگیری، بالاتر از بستر سازه قرار گیرند.

استناد: پروار، شاهرخ؛ سیدرزاقی، مهران؛ و عظیمی نژاد، آرمین. (۱۴۰۵). بررسی کمانش مخازن فولادی روزمینی با حلقه های سخت کننده اضافی تحت فشار سونامی. *مجله مدل سازی پیشرفته در مهندسی عمران*، ۳(۳)، ۸۶-۱۰۲.

DOI: 10.22126/amcen.2026.14355.1104

© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی.



۱. مقدمه:

طی دو دهه اخیر، رویدادهای سونامی ویرانگری همچون اقیانوس هند (۲۰۰۴)، توهوگو (۲۰۱۱)، پالو (۲۰۱۸) و تنگه سوندا (۲۰۱۸)، خسارات جانی، اقتصادی و زیست محیطی را به جوامع ساحلی تحمیل کرده‌اند. امواج قدرتمند سونامی که اغلب در اثر زمین لرزه‌های زیردريا یا رانش‌های زمین بستر دریا پدید می‌آیند، با سرعت بالا در سراسر اقیانوس حرکت کرده و هنگام برخورد به کرانه‌ها، به جریان‌های سیلابی بسیار سریع و متلاطم (Bore) تبدیل می‌شوند. وقوع این جریان‌ها بر سازه‌های مختلف از جمله پل‌ها، ساختمان‌ها و تأسیسات صنعتی خسارت‌های فراوانی وارد می‌نماید [۱-۳]. مطالعات میدانی و آزمایشگاهی نشان داده که فشار ناشی از سونامی بر خلاف بارهای باد و امواج طوفان (Surge)، می‌تواند تنها بخش‌هایی از سازه را هدف قرار دهد. به دلیل ماهیت غیریکنواخت و پالس‌گونه‌ی فشار ناشی از سونامی، بسیاری از سازه‌هایی که صرفاً برای مقاومت در برابر باد یا امواج معمولی طراحی شده‌اند، در برابر سونامی عملکرد مناسبی از خود نشان نداده‌اند [۴]. از این رو، درک دقیق اندرکنش سونامی با سازه‌ها و ارائه راهکارهای تقویتی متناسب با این نوع بارگذاری، به یکی از اولویت‌های پژوهشی در مناطق ساحلی تبدیل شده است. با توجه به استقرار گسترده تأسیسات ذخیره سازی نفت، گاز و مواد شیمیایی در نواحی ساحلی، مخازن ذخیره فولادی روزمینی (ASTs) از جمله سازه‌هایی هستند که به شدت در معرض خطر سونامی قرار دارند. این مخازن با پوسته‌های نازک و جداره‌های سبک، ذاتاً در برابر نیروهای افقی ناشی از سیلاب آسیب پذیرند. شواهد میدانی از سونامی‌های ۲۰۰۴ هند و ۲۰۱۱ ژاپن نشان می‌دهد که خسارات وارده به این مخازن شامل لغزش، شناورشدن، واژگونی و کماتش موضعی یا کلی دیواره‌ها بوده است [۵،۶]. افزون بر خسارات ساختاری، نشت مواد خطرناک از مخازن آسیب دیده می‌تواند فاجعه‌های زیست محیطی جبران ناپذیری به همراه داشته باشد [۴]. بنابراین، ارزیابی پایداری این مخازن تحت بار سونامی و ارائه روش‌های تقویتی کارآمد، نه تنها از منظر مهندسی سازه، بلکه از دیدگاه

مدیریت ریسک زیست محیطی حائز اهمیت و قابل توجه است.

۲. پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های گسترده‌ای بر روی تقویت پوسته‌های استوانه‌ای نازک در برابر بارهای لرزه‌ای، باد و فشار خارجی متمرکز شده است. استفاده از سخت‌کننده‌های طولی (stringers) و حلقه‌های سخت‌کننده (stiffening rings) به عنوان روش‌های متداول و مؤثر شناخته می‌شود. سخت‌کننده‌های طولی عمدتاً برای افزایش مقاومت کماتش محوری و حلقه‌ها برای بهبود پایداری در برابر فشارهای خارجی به کار می‌روند [۷]. پژوهش‌های جدیدتر، کارایی این روش‌ها را در شرایط مختلف بارگذاری تأیید کرده‌اند. برای نمونه، شکرزاده و سهرابی (۲۰۱۶) نشان دادند که پله‌های مارپیچی می‌توانند مقاومت کماتش دیواره مخازن را به طور چشمگیری افزایش دهند. همچنین، کامشوار و پادجت^۱ (۲۰۱۹) با مطالعه مخازن دارای سقف مخروطی تحت موج طوفان (storm-surge) گزارش کردند که افزودن حلقه سخت‌کننده میانی، ظرفیت باربری بحرانی را بین ۷/۵ تا ۲۰ درصد بهبود می‌بخشد و این پژوهشگران همچنین نشان دادند که آثار دینامیکی امواج بر بار کماتش بحرانی ناچیز است و یک تحلیل استاتیکی ساده‌تر می‌تواند تخمین مناسبی از ظرفیت کماتشی ارائه دهد [۸،۹]. در زمینه بارگذاری باد، پژوهشگران متعددی به بررسی نقش سخت‌کننده‌های فوقانی (wind girders) پرداخته‌اند [۱۰-۱۳]. زیبک و همکاران^۲ (۲۰۱۹) با نقد آیین‌نامه‌های موجود، نشان دادند که رفتار حلقه‌های سخت‌کننده به شدت به سختی نسبی آن‌ها نسبت به پوسته وابسته است و چارچوب طراحی فعلی برای ارزیابی یکپارچگی این سخت‌کننده‌ها ناکارآمد است. بررسی تأثیر افزودن یک سخت‌کننده حلقوی میانی بر روی پایداری مخازن در برابر بار باد، به‌ویژه در مرحله ساخت (زمانی که سقف نصب نشده) توسط زیبک و همکاران^۲ (۲۰۲۳) انجام شده است و معادلات طراحی برای تعیین سختی و مقاومت مورد نیاز این حلقه‌ها ارائه شده است [۱۴]. در پژوهشی نوآورانه، دراهوراد و همکاران^۳ (۲۰۲۳) طرح جدیدی از حلقه سخت‌کننده با مقطع

² Zeybek³ L. Drahoradl¹ Kameshwar and Padgett

۰/۵) انتخاب می شود. سپس، فشار ناشی از جریان سونامی در نظر گرفته شده با استفاده از شبیه سازی CFD سه بعدی بر روی دیواره مخزن محاسبه می گردد. در گام بعدی تحلیل کماتش به روش اجزای محدود (FEM) برای حالت های مختلف بدون سخت کننده و با سخت کننده انجام می شود. در نهایت، ظرفیت کماتش بحرانی و مودهای تغییر شکل در هر حالت استخراج و با یکدیگر مقایسه خواهند شد. یافته های این مطالعه می تواند به طراحان سازه های ساحلی در انتخاب آرایش مناسب سخت کننده ها در مخازن ذخیره سازی کمک کرده و مبنایی برای بروزرسانی آیین نامه های موجود نظیر API650 و Eurocode 3 در زمینه بارگذاری سونامی فراهم آورد.

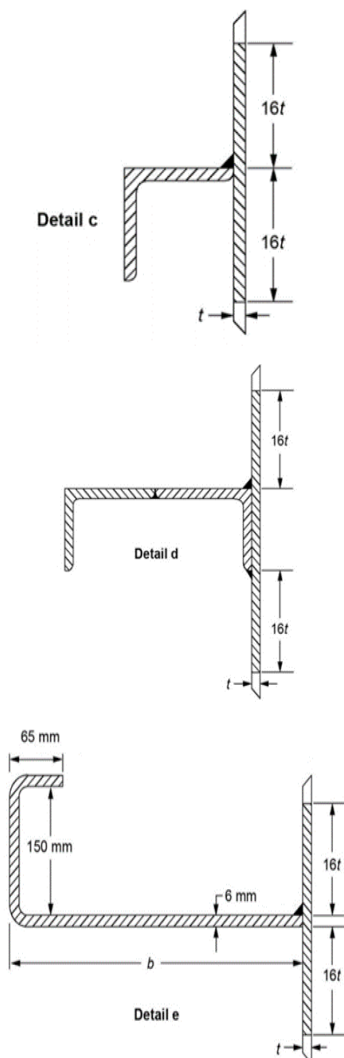
۳. روش شناسی پژوهش

این مطالعه به بررسی استفاده از یک حلقه تقویت کننده اضافی علاوه بر سخت کننده بادگیر بالای پوسته برای بهبود عملکرد کماتشی مخزن ذخیره سازی روزمینی سقف باز با بستر گیردار تحت فشار سونامی می پردازد. هندسه مخزن مورد بررسی در جدول ۱ نشان داده شده است. مخزن انتخاب شده برای بررسی تحت بهره برداری است و ضخامت پوسته هر لایه برای هر کدام از آن ها در جدول ۲ نشان داده شده است. حلقه های تقویت کننده که در قسمت های فوقانی مخازن روباز نصب می شوند تا پایداری را تحت بارهای باد افزایش دهند به عنوان سخت کننده های بادگیر طبقه بندی می شوند. هدف این مطالعه، استفاده از سخت کننده های بادگیر به عنوان حلقه های تقویت کننده کمکی در ارتفاعات مختلف برای ارزیابی تأثیر آن ها بر ظرفیت کماتش مخازن تحت فشار ناشی از سونامی است. این مطالعه رفتار کماتش مخازن با و بدون سخت کننده ها را در ارتفاعات مختلف تحت فشار سونامی مقایسه می کند. دو الگوی بار به مدل های مخزن اعمال شد: نیروی جاذبه برای وزن خود سازه و فشار سونامی به عنوان یک بار خارجی. تحلیل کماتش خطی (LBA) و تحلیل نقص هندسی غیرخطی (GNIA) در این مطالعه با استفاده از برنامه المان محدود ANSYS انجام شد [۲۲].

غیرمتعارف ارائه کردند که عملکرد کماتشی بهتری نسبت به نمونه های معمولی داشت [۱۵]. همچنین، استفاده از کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با الیاف (FRP) به عنوان روشی نوین برای افزایش ظرفیت کماتش پوسته های فلزی نازک مورد بررسی قرار گرفته است [۱۶]. علیرغم این پیشرفت ها، تقریباً تمامی مطالعات پیشین بر بارهایی نظیر باد و زلزله و نظایر آن متمرکز بوده اند و تأثیر فشار غیریکنواخت سونامی بر روی مخازن تقویت شده با حلقه های اضافی، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. یکی از چالش های اساسی در تحلیل مخازن تحت سونامی، ماهیت پیچیده جریان سیال و توزیع غیرخطی فشار بر دیواره آن ها است. با پیشرفت ابزارهای محاسباتی، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به عنوان روشی کارآمد برای شبیه سازی اندرکنش جریان سونامی با سازه ها شناخته شده است [۱۷]. طبق تحقیقات پیشین، مدل های عددی بویژه شبیه سازی CFD می توانند با دقت مناسب و قابل قبولی اندرکنش سونامی با سازه را مدل سازی کنند [۲۰-۱۸]. از بررسی دیگرام های نیرو بر حسب زمان می توان دریافت که معمولاً نیروی وارده از طرف سیال بر سازه در شبیه سازی سونامی شامل سه بخش ضربه ای، گذرا و بخش هیدرودینامیکی می باشند. نیرویی که در فاز هیدرودینامیکی به سازه وارد می شود بیشترین نقش را در خسارت به آن را ایفا می کند [۲۱]. با استفاده از حلگرهای حجم محدود و مدل های توربولانسی نظیر $k-\omega$ و $k-\epsilon$ می توان میدان فشار بیشینه را با دقت قابل قبولی برآورد کرد و سپس آن را به عنوان ورودی تحلیل های سازه ای بکار گرفت. تاکنون مطالعه جامعی که تأثیر موقعیت سخت کننده اضافی را بر ظرفیت کماتش مخازن تحت فشار حاصل از سونامی بررسی کرده باشد، انجام نشده است. این شکاف پژوهشی، انگیزه اصلی مطالعه حاضر را شکل می دهد.

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی عددی پایداری مخازن فولادی روزمینی تقویت شده با حلقه های سخت کننده، تحت اثر جریان سونامی انجام شده است. سؤال اصلی پژوهش این است که افزودن حلقه های سخت کننده در ترازهای میانی و پایینی مخزن چه تأثیری بر ظرفیت کماتش مخزن تحت فشار ناشی از سونامی دارد. برای پاسخ به این سؤال، ابتدا یک مخزن مرجع با مشخصات هندسی و مکانیکی مشخص (ارتفاع ۱۲ متر، نسبت ارتفاع به قطر

مخازن نیمه پر نیز بحرانی گردند. اما از آنجا که این موارد خاص و بسیار محدود هستند در این بخش از پژوهش از بررسی دقیق تر این عامل خودداری گردید.



شکل ۱. سخت کننده های مورد استفاده در این پژوهش

۲-۳. مدل های اجزاء محدود (FEM)

پوسته استوانه‌ای با استفاده از المان SHELL181 مدل سازی شده است. SHELL181 برای تحلیل سازه‌های پوسته‌ای نازک تا نسبتاً ضخیم مناسب است. این المان چهار گره‌ای دارای شش درجه آزادی در هر گره است: جابجایی در جهات x ، y و z و چرخش حول محورهای x ، y و z . حلقه‌های سخت کننده با استفاده از المان BEAM188 شبیه سازی می‌شوند. این المان تیر دو گره‌ای

جدول ۱. مشخصات هندسی مخزن

	H (m) ارتفاع	D (m) قطر	H/D	V (m ³) حجم ذخیره سازی
مخزن نمونه (T)	۱۲	۲۴	۰/۵	۵۴۰۰

جدول ۲. ضخامت ورق ها برای مخزن (میلیمتر). ارتفاع ورق ها ۲/۴ متر است.

	۱ (بخش ابتدایی)	۲	۳	۴	۵ (بخش انتهایی)
ضخامت (t) برحسب میلیمتر	۹	۷/۴	۶/۴	۶/۴	۶/۴

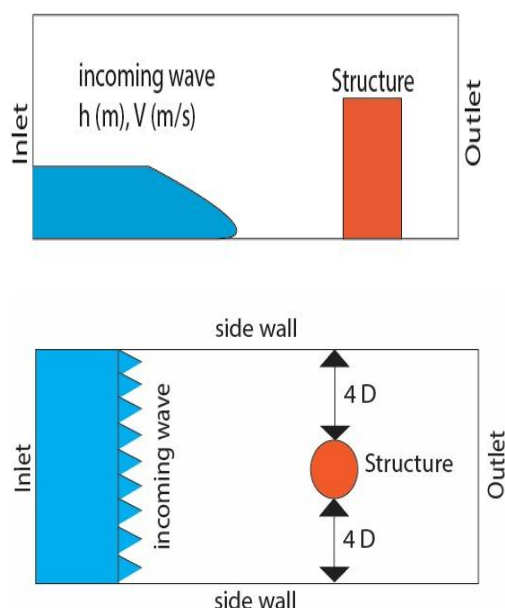
سه نوع سخت کننده در این پژوهش مورد استفاده قرار می گیرد که سطح مقطع هر کدام در شکل ۱ نشان داده شده است. مدول مقطع هر کدام از دیتیل های c، d و e بترتیب ۶۰/۵۹ و ۲۴۹/۱۷ و ۶۱۵ سانتی متر مکعب (cm³) می باشد [۲۳].

فشار کمانش بحرانی مخازن با حلقه سخت کننده در موقعیت های قرار گیری مختلف استخراج شده و با فشار کمانش بحرانی مخازن بدون سخت کننده مقایسه می شود. از آنجایی که وجود سیالات درونی (ذخیره شده) در مخزن فشاری در جهت خلاف سیال بیرونی به سازه وارد می کند، انتظار می رود همانند شرایط قرارگیری در برابر تندباد، وضعیت مخزن خالی در برابر سونامی بدتر از مخازن پر یا نسبتاً پر باشد. یوماتسو^۴ و همکاران و همچنین ژائو^۵ و همکاران خالی بودن مخازن را در مواجهه با فشارهای بیرونی مورد بررسی قرار داده و نشان دادند پر بودن مخازن ظرفیت کمانشی آن ها را افزایش می دهد [۲۴، ۲۵]. لذا در پژوهش حاضر مخزن خالی فرض شده است تا حالت بحرانی کمانش را در نظر گرفته و تاثیر افزودن سخت کننده بر جداره ی سازه به دست آورده شود. این امر توسط پژوهشگران دیگری نیز مورد اشاره قرار گرفته است. البته در شرایط خاص بویژه در شرایط رفتار غیر خطی مصالح، ممکن است حالاتی از

⁵ Y. Zhao

⁴ Y. Uematsu

بسیار غیرخطی و نامنظم است، بنابراین از روش $k-\epsilon$ برای اجرای شبیه سازی آشفتگی در Fluent استفاده شده است. شکل ۴ شبیه سازی جریان سونامی و تعامل آن با مخزن را بصورت شماتیک نشان می دهد. شایان ذکر است انتخاب حوزه حل سیالاتی (ابعاد حوزه حل) با مطالعات حساسیت توسط نویسندگان صورت پذیرفت بگونه ای که دیواره های کناری نیروی اضافی بر مخزن اعمال نکنند.



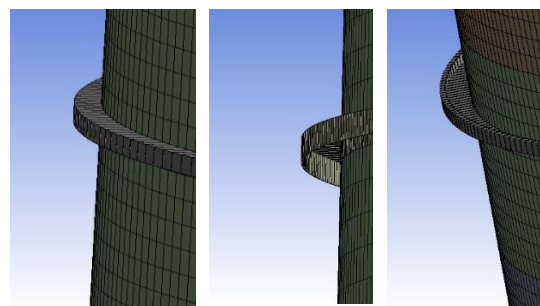
شکل ۴. جریان سونامی شبیه سازی شده در این مطالعه که در آن D قطر مخزن است.

مدل سازی سونامی به صورت عددی با ایجاد یک جریان متغیر با زمان در مرز ورودی محقق می شود. برای مدل هیدرودینامیکی، جریان سیال بر اساس معادلات ناویر-استوکس میانگین گیری شده رینولدز (RANS) تراکم ناپذیر و ناپایدار (معادلات پیوستگی و مومنتوم) به همراه مدل آشفتگی $k-\epsilon$ حل می شود. بجز دیوار پایین دست و بالای حوضه جریان، سایر شرایط مرزی به عنوان "مرز دیوار ثابت بدون لغزش" تنظیم می شوند. دیوار پایین دست و بالای حوضه حل جریان به عنوان مرزهای خروجی فشار در نظر گرفته می شوند که اجازه خروج آب از دامنه محاسباتی را می دهند (pressure outlet). با توجه به رفتار پیچیده برهمکنش بین آب و هوا در مدل سازی عددی سونامی، باید یک شبیه سازی جریان چند فازی انجام شود [۳۱]. ارتفاع سطح آزاد سیال توسط روش حجم سیال (VOF) در

سه بعدی با شش یا هفت درجه آزادی در هر گره است: جابجایی در جهات x ، y و z و چرخش حول محورهای x ، y و z . درجه آزادی هفتم (مقدار تابیدگی) اختیاری است [۲۶، ۲۷]. شکل های ۲ و ۴ مدل های اجزاء محدود سه بعدی مورد استفاده در این مطالعه را نشان می دهند. در مدل های اجزاء محدود، مواد استفاده شده الاستیک و ایزوتروپیک است که مدول الاستیسیته $(E) \times 10^5$ و 250 مگاپاسکال، تنش تسلیم (σ_y) و 7850 کیلوگرم بر متر پواسون (ν) و 0.3 و جرم حجمی (ρ) است. مکعب است.



شکل ۲. مدل سه بعدی سازه

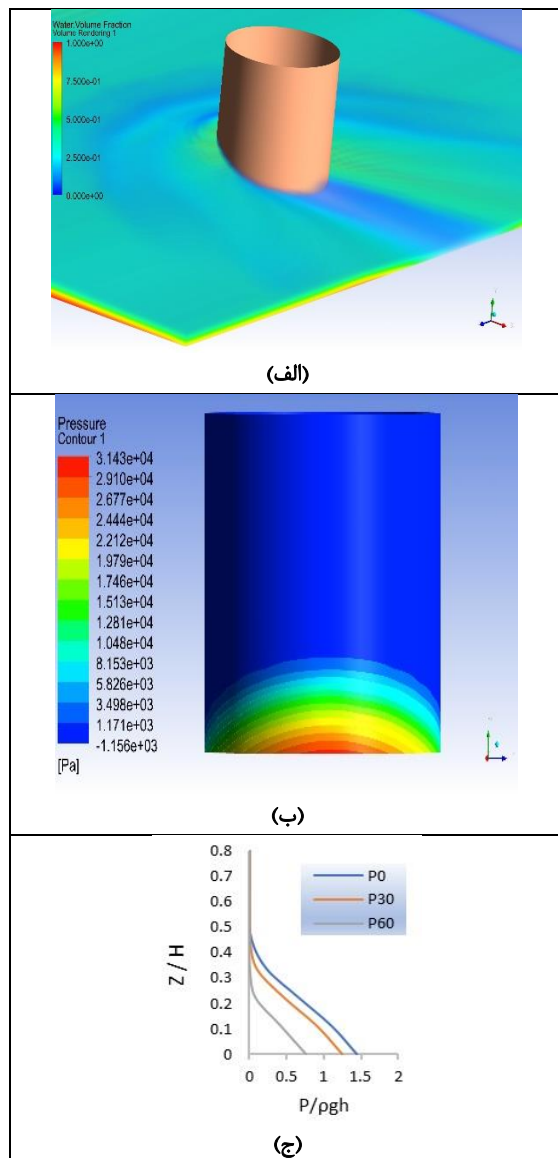


شکل ۳. مدل اجزاء محدود حلقه های سخت کننده (الف) (ب) (ج)

۳-۳. مکانیک سیالات محاسباتی (CFD)

استخراج نیروهای وارد بر دیواره خارجی مخازن اولین گام در تعیین رفتار کمانش آن ها در حین تحمل فشار خارجی سونامی است. توزیع فشار دقیق و صحیح بر روی دیواره های خارجی مخازن را می توان با استفاده از CFD استخراج کرد که شبیه سازی آن با استفاده از نرم افزار Ansys Fluent انجام شده است. دقت روش های CFD برای استخراج فشار وارده از طرف سیال به سازه در تحقیقات مختلفی به اثبات رسیده است [۲۸-۳۰]. طبق مشاهدات قبلی در مورد جریانات سیلابی سونامی، الگوی این امواج

اثرات باد و سایر امواج خارجی به طور قابل توجهی متفاوت است. برای مقایسه این امر می‌توان به مراجع ذکر شده مراجعه کرد [۳۵،۳۶].



شکل ۵. توزیع فشار هیدرودینامیکی حداکثر در اطراف مخزن. (الف) مدل سه بعدی اندرکنش سیال. (ب) توزیع سه بعدی فشار. (ج) توزیع فشار در ارتفاع مخزن برای ارتفاع مستغرق سه متر.

۴-۳. روش‌های کماتش خطی (LBA) و غیرخطی (GNIA)

کمانش مخزن یک پدیده غیرخطی است که در آن مخزن نمی‌تواند بار اضافی را با همان هندسه ساختاری (پیکربندی) تحمل کند و شکل مخزن به یک ساختار تعادلی جایگزین تغییر می‌کند [۳۷]. گام اولیه در تحلیل

ANSYS Fluent و حل‌کننده مبتنی بر فشار^۶ برای حل جریان سیال استفاده می‌شوند. کوپلینگ فشار-سرعت با الگوریتم PISCO برای حل عددی معادلات RANs انجام می‌شود. ANSYS Fluent از روش حجم محدود (FVM) برای حل معادلات استفاده می‌کند. معادلات RANs با استفاده از FVM بر روی یک سیستم شبکه بدون ساختار گسسته‌سازی می‌شوند. نتایج حاصل از همه مطالعات نشان می‌دهد که CFD داده‌های تجربی را با دقت نسبتاً بالایی بازتولید می‌کند [۳۲،۳۳].

انتشار سونامی در خشکی با عمق آبگرفتگی (h)، سرعت جریان (V) و جهت جریان مشخص می‌شود. ASCE 7-22 دو روش، تحلیل خط شیب انرژی و تحلیل احتمالاتی خطر سونامی ویژه محل (PTHA)، را برای ارزیابی عمق آبگرفتگی (h) و سرعت جریان (V) ارائه می‌دهد [۳۴]. طبق رابطه ارائه شده توسط ASCE، نیروی هیدرودینامیکی را می‌توان با تعیین مقادیر عمق آبگرفتگی و سرعت در محل سازه محاسبه کرد.

$$F_{dx} = \frac{1}{2} \rho_s I_{tsu} C_d C_{cx} B (h_{sx} V^2) \quad (1)$$

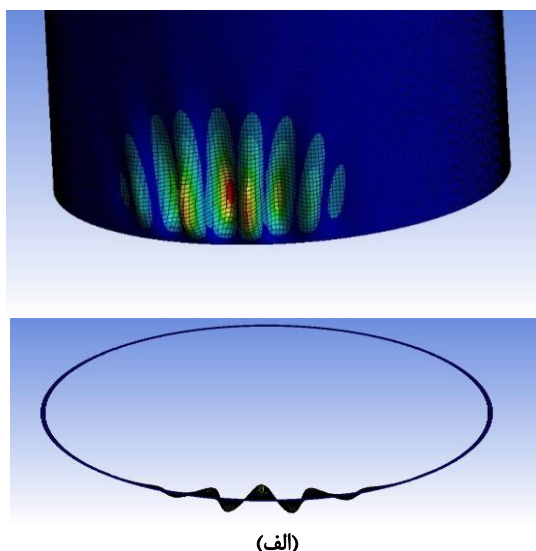
که در آن p ، g و h به ترتیب نشان دهنده چگالی، شتاب گرانشی و عمق آبگیری هستند، B پهنای سازه در مواجهه با موج سونامی است، C_d و C_{cx} ضرایب ثابت هستند. طبق ASCE 7-22، حداقل سرعت موج سونامی ۳ متر بر ثانیه باید در نظر گرفته شود که این سرعت در تمام مدل‌های CFD ثابت فرض شد. تحلیل کماتش را می‌توان با محاسبه توزیع فشار بار سونامی بر روی دیواره مخزن انجام داد. شکل ۵ توزیع فشار بر روی دیواره مخزن در حالت سه بعدی (ب) زمانی که عمق جریان سه متر است را نشان می‌دهد. شایان ذکر است این توزیع فشار در لحظه ای از جریان گذرا استخراج شده است که بیشترین نیرو را به مخزن اعمال کرده است. در شکل ۵ (ج) محور افقی فشار نرمال شده را نشان می‌دهد، که در آن P60 به نقاط مختلف ارتفاع سازه در زاویه ۶۰ درجه نسبت به جهت سونامی اشاره دارد. شکل ۵ نشان می‌دهد که توزیع فشار مؤثر بر سازه در مقایسه با

^۶ Pressure-based solver

بارهای سونامی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج و بحث در این بخش ارائه شده است.

۴-۱. نتایج تحلیل خطی (LBA)

همانگونه که پیش از این نیز گفته شد، تجزیه و تحلیل LBA ابزاری ضروری برای پیش‌بینی رفتار کمانش مخازن و ارزیابی مقاومت آن‌ها در برابر فشار خارجی است. در طول تجزیه و تحلیل LBA، تغییر در مقاومت کمانش مخازن به دقت محاسبه شد. این تجزیه و تحلیل شامل در نظر گرفتن وجود سخت‌کننده‌های اضافی (P_{LBA}^{cr}) و استخراج حداکثر فشار بحرانی بدون هیچ حلقه سخت‌کننده اضافی (P_{LBA}^o) بود. این پارامتر نشان دهنده نقطه‌ای است که مخزن در آن بیشترین آسیب‌پذیری را در برابر کمانش و شکست دارد. با شناسایی این سطح فشار بحرانی، مهندسان می‌توانند خطرات مرتبط با طراحی مخزن را ارزیابی کرده و در مورد نیاز به تقویت اضافی تصمیمات آگاهانه‌ای بگیرند. تحت بارگذاری، سخت‌کننده منتخب در سازه و در موقعیت‌های مختلف قرار داده می‌شود تا فشار بحرانی کمانش با حضور این سخت‌کننده‌ها ارزیابی شود. شکل ۶ مد کمانش برای حالت بدون سخت‌کننده و برای SR1 (سخت‌کننده یک متر بالاتر از بستر سازه) را نشان می‌دهد.



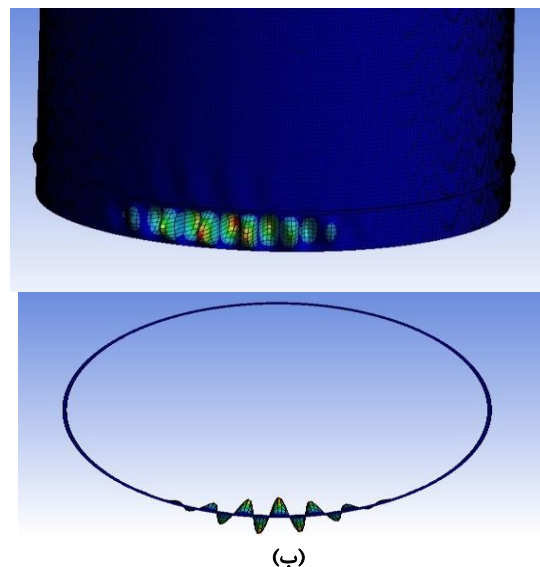
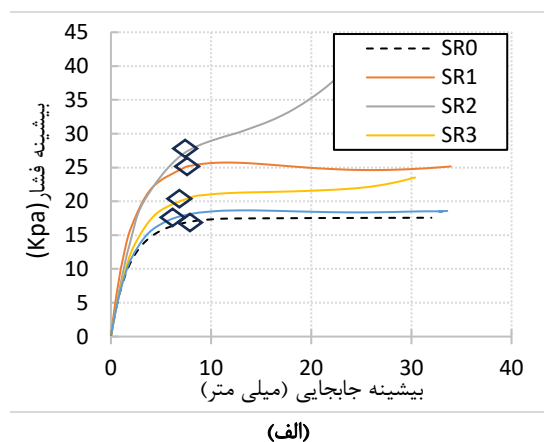
کمانش، تحلیل الاستیک خطی (LBA) است که کمترین مقدار ویژه‌ای را که در آن پوسته ممکن است به یک حالت تغییر شکل متفاوت کمانش کند را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از حالت‌های کمانش خطی را می‌توان به عنوان نقص‌های اولیه در تحلیل غیرخطی استفاده کرد. الگویی که از اولین مقدار ویژه کمانش خطی بدست آمده به عنوان نقص هندسی در نظر گرفته می‌شود. در سطح فشار بحرانی، جایی که فشار به حداکثر مقدار خود می‌رسد، پیکربندی سازه به سرعت به حالت تعادل بعدی منتقل می‌شود. برای تعیین مقادیر فشار بحرانی کلاسیک (P_{LBA}^{cr}) و حالت‌های ویژه مرتبط با آن‌ها، الگوی فشار بدست آمده از روش CFD در نظر گرفته می‌شود. الگوی فشار غیر یکنواخت توسط ضریب بار λ مقیاس می‌شود. روند دستیابی به فشار بحرانی کمانش به این گونه است که ابتدا توزیع فشار بدست آمده از تحلیل CFD به مدل سازه‌ای اعمال می‌شود. سپس در نرم افزار یک تحلیل کمانش خطی انجام می‌شود که خروجی آن ضریب کمانش برای هر مد است. با ضرب این ضریب در بار وارده مقدار فشار بحرانی کمانش بدست می‌آید. نتایج LBA تنها تقریبی از رفتار کمانش یک پوسته است و برای به دست آوردن رفتار کمانش دقیق‌تر، باید یک تحلیل غیرخطی هندسی (GNIA) انجام شود. در این پژوهش از شیوه ارائه شده آیین نامه اروپا برای انجام تحلیل غیر خطی کمانش استفاده می‌شود. روش آنالیز کمانش با در نظر گرفتن نقص یکی از روش‌های ارائه شده توسط این آیین نامه است که در آن اثرات غیر خطی مصالح در نظر گرفته نمی‌شود. با استفاده از روش طول قوس (arc length)، فشار اعمالی بصورت جزئی و گام به گام افزایش می‌یابد و جابجایی روی پوسته استخراج می‌شود [۳۸]. لحظه‌ای که با ثابت ماندن فشار خارجی یا کاهش آن، جا به جایی افزایش یابد کمانش صورت پذیرفته است.

۴. بررسی نتایج و بحث

روش‌های LBA و GNIA برای مخزن، هم با سخت‌کننده و هم بدون سخت‌کننده، مورد استفاده قرار گرفتند. تأثیر افزودن سخت‌کننده بر بار کمانش مخزن ناشی از

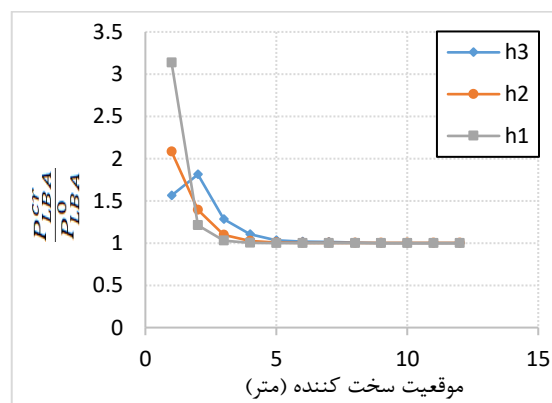
۲-۴. نتایج و بحث بر طبق تحلیل‌های غیر خطی هندسی (GNIA)

برای انجام انجام تحلیل غیر خطی هندسی نیاز به در نظر گرفتن نقص هندسی در سازه است. در پژوهش حاضر این نقص هندسی از مود اول کماتش خطی بدست می‌آید و بسته به میزان در نظر گرفتن نقص هندسی نتایج استخراج می‌شود. در مدل‌های اجزاء محدود، برای انجام تحلیل‌های غیر خطی، مقدار نقص هندسی (i) برابر با 0.2 t تنظیم شده است، که در آن (t) نشان‌دهنده ضخامت لایه بالایی پوسته است. منحنی فشار-جابجایی برای مخزن در شکل ۸ رسم شده است. منحنی‌ها با انتخاب حداکثر جابجایی داخلی در پوسته مخزن در نقطه کماتش بحرانی محاسبه شده‌اند. محورهای افقی نشان‌دهنده حداکثر جابجایی در مخزن و محورهای عمودی نشان‌دهنده فشار روی پوسته‌های مخزن تحت حالت بارگذاری معرفی شده در بخش‌های پیشین هستند. در تمام شکل‌ها، خطچین‌ها نشان‌دهنده منحنی‌های فشار-جابجایی در مخازن بدون سخت‌کننده اضافی هستند، در حالیکه خطوط توپر نشان‌دهنده منحنی‌های مخازن با سخت‌کننده اضافه شده هستند. شایان ذکر است با توجه به اینکه با قرارگیری سخت‌کننده در ارتفاع بالاتر از ۵ متر، عملاً منحنی فشار - جابجایی تغییر محسوسی نمی‌نماید از این رو از ترسیم آن‌ها در نمودار خوداری شده است.



شکل ۶. شکل کماتشی مخزن در حالت (الف) بدون سخت‌کننده و (ب) با سخت‌کننده.

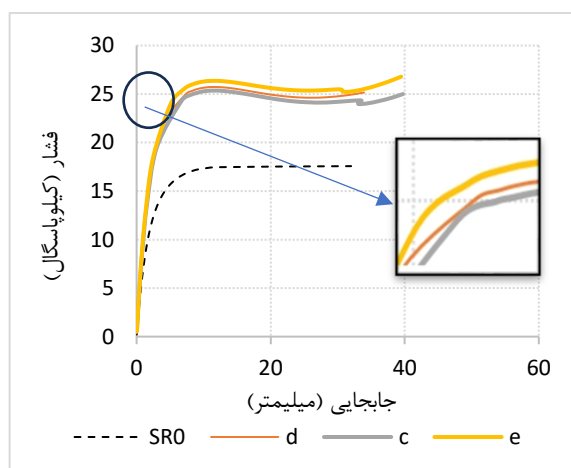
شکل ۷ تغییرات فشار بحرانی مخزن مورد تحقیق را به عنوان تابعی از موقعیت سخت‌کننده بر اساس تحلیل کماتش خطی نشان می‌دهد. محور عمودی نسبت بین فشارهای بحرانی با سخت‌کننده‌ها (P_{LBA}^{cr}) و بدون سخت‌کننده‌ها (P_{LBA}^0) را نشان می‌دهد، در حالی که محور افقی موقعیت قرارگیری را نسبت به پایه مخزن نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل دیده می‌شود، یک برآورد اولیه از فشار بحرانی کماتش برای مخزن نشان می‌دهد ظرفیت کماتشی مخزن می‌تواند تا سه برابر افزایش یابد. همچنین با افزایش ارتفاع سخت‌کننده از پای مخزن، از ارتفاع ۵ متر به بالا وجود سخت‌کننده تأثیری بر ظرفیت کماتشی ندارد.



شکل ۷. تأثیر موقعیت سخت‌کننده بر کماتش خطی پوسته

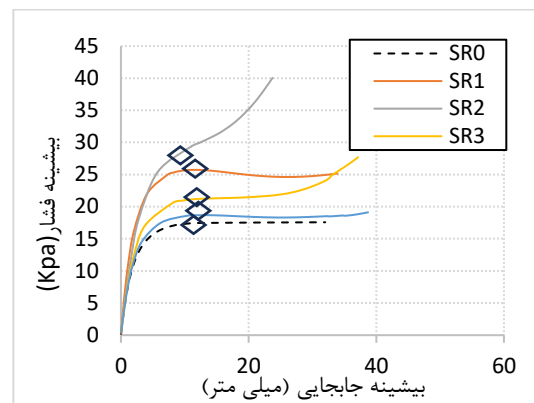
کمانشی در آن‌ها رخ نداد و تنها پوسته مخزن دچار کمانش شد. به عبارت دیگر، کمانش موضعی در نتایج مشاهده نشد.

مقایسه بین عملکرد مخزن با هر سه نوع سخت کننده در شکل ۹ به نمایش درآمده است. در این نمودار عملکرد مخزن با هر سه نوع سخت کننده در حالتی که آن‌ها ۱ متر فاصله از بستر دارند (SR1) به نمایش درآمده است. با اینکه سخت کننده‌های نوع d و e برتریب سطح مقطع‌های ۱/۵۶ و ۴/۴۲ برابر سخت کننده نوع c دارند اما اختلاف محسوسی در افزایش پایداری مخزن تحت فشار وارده با هم ندارند. این امر برای سایر پیکربندی‌ها هم صادق بود. از این رو با لحاظ مسائل اقتصادی، انتخاب سخت کننده نوع c مناسبتر بنظر می‌آید. هر چند انتخاب حالت بهینه و همچنین نوع رفتار پس کمانشی مخازن با سخت کننده‌های حلقوی تحت فشار سونامی نیاز به مطالعات بیشتر دارد.

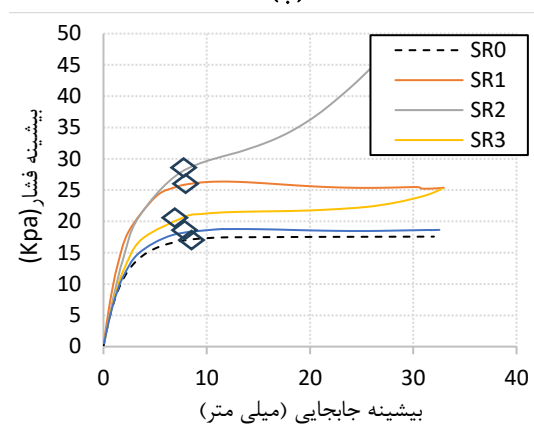


شکل ۹. منحنی های فشار جابجایی برای حالت SR1

فرآیند مورد استفاده برای تحلیل LBA جهت بررسی تأثیر تقویت کننده‌های اضافی بر کمانش پوسته مخزن، برای تحلیل غیر خطی نیز اعمال شد و نتایج در شکل ۱۰ نشان داده شده است. محور افقی در این شکل‌ها نشان دهنده محل قرارگیری تقویت کننده‌ها و محور عمودی نشان دهنده نسبت فشار بحرانی در حضور سخت کننده اضافی (P_{GNIA}^0) به فشار بحرانی بدون تقویت کننده (P_{GNIA}^c) است. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که قرار دادن تقویت کننده‌ها در محل بهینه می‌تواند مقاومت کمانشی مخزن را تا ۳۰۰ درصد نسبت به حالت بدون تقویت کننده



(ب)

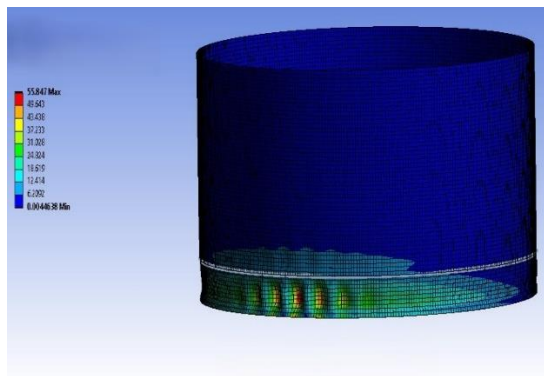


(ج)

شکل ۸. منحنی های فشار جابجایی برای مخزن. (الف) مخزن با سخت کننده نوع c. (ب) مخزن با سخت کننده نوع d. (ج) مخزن با سخت کننده نوع e.

فشار اعمال شده تا رسیدن به نقطه بحرانی افزایش می‌یابد و پس از آن، یا شروع به کاهش می‌کند یا ثابت می‌ماند. پس از رسیدن به نقطه بحرانی، جابجایی به سرعت افزایش می‌یابد. در برخی موارد، هنگامی که سازه به همراه سخت کننده وجود دارد، الگوی تغییر فشار-جابجایی با سایر موارد متفاوت است. در این موارد، یک بار بحرانی مشخص به وضوح به دست نمی‌آید. در این حالت، شیب نمودار فشار-جابجایی افزایش می‌یابد و پس از یک نقطه خاص، شیب تغییر می‌کند. این نقطه، نقطه بحرانی کمانش تحت تحلیل GNIA است [۳۹]. این مورد برای مخزن زمانی که سخت کننده در فاصله ۲ متری از بستر سازه قرار دارد اتفاق می‌افتد. در این شرایط رفتار سازه به گونه ای است که یک سخت شوندگی ثانویه را تجربه می‌کند. این مورد برای هر سه نوع سخت کننده مشاهده شد. در تمام تحلیل‌ها، سخت کننده‌ها با پوسته اتصال کامل را داشتند و هیچ

پوسته‌های مخزن و تقویت‌کننده‌ها کمتر از تنش تسلیم ماده بود، بنابراین رفتار پوسته‌های مخزن و سخت‌کننده در همه موارد ارتجاعی بود و نیازی به مدل‌سازی پلاستیسیته نبود.

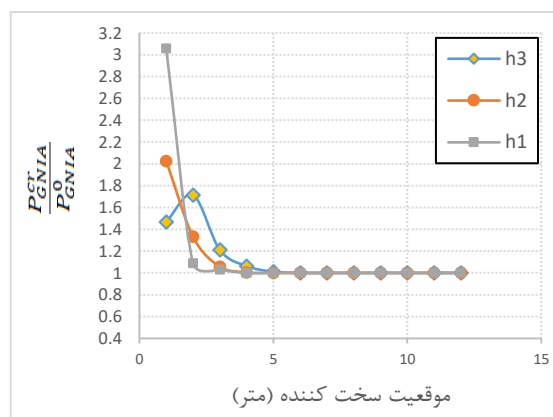


شکل ۱۱. توزیع تنش فون-میسز در پوسته در لحظه کماتش

۳-۴. تحلیل حساسیت مخزن به‌مراه سخت‌کننده

به طور کلی مخازن واقع معمولاً با نقص‌های هندسی ساخته می‌شوند و این امر اجتناب‌ناپذیر است. وجود چنین نقص‌هایی، پاسخ کماتش آن‌ها را هنگام قرار گرفتن در معرض فشارهای خارجی تغییر می‌دهد. بنابراین، این بخش از پژوهش، به تحلیل کماتش مخزن ذخیره‌سازی مورد پژوهش تحت نقص‌های اولیه معرفی می‌پردازد. شکل ۱۲ منحنی بار - جابجایی مخزن با نقص‌های مختلف تحت فشار سونامی را نشان می‌دهد، که در آن حلقه‌های سخت‌کننده اضافی ۲ متر بالاتر از بستر قرار گرفته‌اند. با افزایش دامنه نقص هندسی علاوه بر اینکه بار بحرانی کماتش به تدریج کاهش می‌یابد، شکل منحنی فشار - جابجایی جانبی نیز دستخوش تغییر می‌شود و به دلیل وجود نقص در مخازن، بار کماتش را نمی‌توان با تئوری خطی تخمین زد. شکل ۱۲-ب حساسیت به وجود نقص مخزن با و بدون سخت‌کننده را در هنگام قرار گرفتن در معرض فشار سونامی نشان می‌دهد، که در آن حلقه‌های اضافی ۲ متر بالاتر از بستر قرار گرفته‌اند. محور افقی دامنه‌های نقص (i/t_{min}) و محور عمودی نسبت فشار بحرانی مخزن ناقص (P_{Gi}) به فشار بحرانی مخزن بدون هیچ نقصی (P_{G0}) را نشان می‌دهد. در این قسمت از شکل، خط منقطع نمایش دهنده حالتی است که مخزن بدون سخت‌کننده است. نتایج شکل

افزایش دهد. شایان ذکر است میانگین اختلاف بین تحلیل‌های خطی و غیر خطی در پژوهش حاضر ۲۰ درصد بود. این امر نتایجی مانند مطالعات پیشین داشت که برای تقریب نیروی بحرانی می‌توان از تحلیل‌های خطی با هزینه محاسباتی کمتر مانند LBA استفاده کرد اما تحلیل دقیق‌تر نیاز به مدل‌سازی‌های غیر خطی دارد.



شکل ۱۰. تاثیر موقعیت سخت‌کننده بر کماتش غیرخطی پوسته

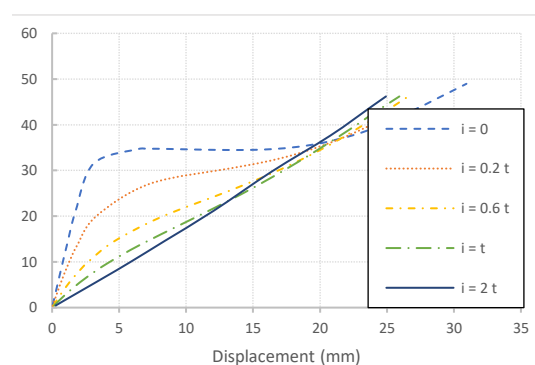
از آنجایی که فشار ناشی از موج سونامی در درجه اول بر قسمت پایینی سازه تأثیر می‌گذارد، می‌توان نتیجه گرفت که این قسمت از سازه مناسب‌ترین مکان برای قرار دادن سخت‌کننده اضافی برای افزایش پایداری است. می‌توان نتیجه گرفت که محل سخت‌کننده اضافی رابطه مستقیمی با عمق سیال دارد و بهینه‌ترین حالت زمانی اتفاق می‌افتد که آن‌ها در بالای پایه سازه و تقریباً در ارتفاعی برابر با نیمی از عمق آبگیری قرار گیرند. تحت هر دو روش LBA و GNIA، نتیجه گرفته شد که نصب سخت‌کننده در قسمتی از سازه که دو برابر عمق آبگیری قرار دارد، هیچ تأثیری بر افزایش مقاومت مخازن در برابر فشار سونامی ندارد. از این رو استفاده از سخت‌کننده‌های بادگیر که برای افزایش پایداری مخازن در برابر بار باد و در بخش فوقانی مخزن مورد استفاده قرار می‌گیرند، به تنهایی تأثیری در افزایش پایداری تحت فشار سونامی نخواهند داشت. شکل ۱۱ تنش فون میزس را در مخزن با سخت‌کننده ۱ متر بالاتر از پای سازه هنگام شروع کماتش نشان می‌دهد. در لحظه کماتش، حداکثر تنش برای مخزن برابر با ۵۶ مگاپاسکال بود. شایان ذکر است که تنش معادل فون میزس

650 انتخاب شدند و به عنوان یک بخش الحاقی اضافی به مخزن اضافه شدند. دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای تعیین فشار اعمال شده توسط سیال بر دیواره های مخزن معرفی شد تا قادر به استخراج فشار خارجی سونامی بر جداره مخزن باشیم. پس از استخراج توزیع فشار، از روش های تحلیل خطی (LBA) و غیر خطی (GNIA) برای بررسی تأثیر سخت کننده ها بر پایداری مخزن نمونه، استفاده شد. نتایج نشان می دهد، استفاده از سخت کننده های حلقوی می تواند بر رفتار کمانشی مخازن در برابر سونامی تأثیر قابل توجهی داشته باشد. اما میزان این تأثیر حساسیت زیادی به موقعیت قرار گیری سخت کننده ها دارد. بر اساس نتایج به دست آمده، مناسب ترین مکان برای قرار دادن سخت کننده می تواند به فاصله نصف عمق آگیری بالاتر از بستر سازه باشد. در حالی که قرار دادن آن ها در فاصله دو برابر عمق آگیری نسبت به پای مخزن، مقاومت کمانشی مخزن تحت فشار سونامی را تغییر نمی دهد. استفاده از سخت کننده ها به تنهایی مقاومت کمانشی مدل را برای ارتفاع سیال کم بیش از ۳۰ درصد افزایش داد. سطح مقطع بیشتر سخت کننده لزوماً مقاومت کمانشی مخزن را افزایش نمی دهد و با سطح مقطع کمتر هم می توان به مقاومت های بالا دست پیدا کرد.

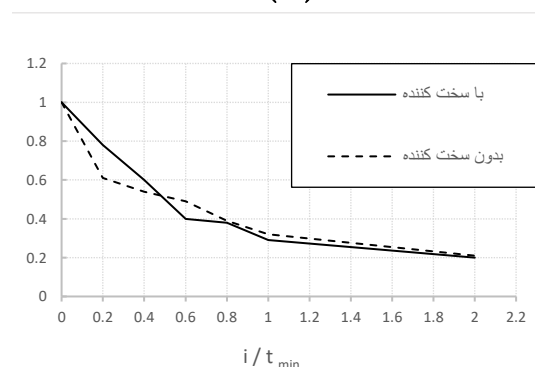
نتایج همچنین نشان داد وجود نقص هندسی تأثیر زیادی بر تنش کمانش مخزن در برابر سونامی دارد. با افزایش دامنه نقص تا دو برابر ضخامت نازک ترین ورق پوسته، ظرفیت پوسته در برابر کمانش می تواند تا ۲۰ درصد مقدار مربوطه در مخزن بدون نقص کاهش یابد. تفاوت قابل ملاحظه ای بین مخازن دارای سخت کننده و بدون سخت کننده در حساسیت به نقص هندسی مشاهده نشد.

در مجموع استفاده از حلقه های سخت کننده در مخازن ذخیره سازی فولادی، مقاومت آن ها را در برابر فشارهای ناشی از سونامی را به طور قابل توجهی افزایش می دهد. طراحی و جایگذاری درست سخت کننده ها به کاهش خرابی ها، کاهش هزینه های تعمیر و محافظت در برابر خطرات زیست محیطی کمک می کنند. این امر آن ها را به یک ملاحظه ارزشمند در طراحی مخازن در مناطق ساحلی

۱۲ نشان می دهد وجود سخت کننده بویژه در دامنه های نقص بزرگتر، نقش موثری در حساسیت مخزن به نقص هندسی ندارد. با افزایش نقص، فشاری که قبل از کمانش قابل تحمل است کاهش می یابد. بنابراین، می توان استنباط کرد که هرچه نقص های اولیه در سازه بیشتر باشد، تفاوت بین تحلیل های LBA و GNIA بیشتر است. تحلیل GNIA نتایج واقع بینانه تری نسبت به LBA ارائه می دهد، زیرا نقص های اولیه و رفتار غیر خطی را در نظر می گیرد. تفاوت بین LBA و GNIA بر اهمیت در نظر گرفتن نقص ها و غیر خطی بودن در تحلیل های کمانش تحت نیروهای سونامی تأکید می کند.



(الف)



(ب)

شکل ۱۲. تحلیل حساسیت به وجود نقص هندسی. (الف) نمودار فشار-جابجایی با داشتن نقص هندسی. (ب) حساسیت مخزن با و بدون سخت کننده به وجود نقص.

۵. نتیجه گیری و پیشنهادها

هدف اصلی این پژوهش بررسی تأثیر حلقه های تقویت کننده بر پایداری مخازن ذخیره سازی روباز فولادی تحت فشار سونامی بود. سه نوع سخت کننده بر اساس API

cylindrical storage tanks," in *Proc. 7th Intl. Conf. & Exhibition on Liquefied Natural Gas (LNG 17)*, Houston, TX, 16-19 April, 2013.

- [7] J. Singer, "Stiffened cylindrical shells," in *Buckling of thin metal shells*, CRC Press, 2006, pp. 310-367.
- [8] A. R. Shokrzadeh and M. R. Sohrabi, "Strengthening effects of spiral stairway on the buckling behavior of metal tanks under wind and vacuum pressures," *Thin-Walled Structures*, vol. 106, pp. 437-447, 2016.
- [9] S. Kameshwar and J. E. Padgett, "Stiffening ring design for prevention of storm-surge buckling in aboveground storage tanks," *Journal of Structural Engineering*, vol. 145, no. 3, p. 04019002, 2019.
- [10] C. A. Burgos, J. C. Batista-Abreu, H. D. Calabró, R. C. Jaca and L. A. Godoy, "Buckling estimates for oil storage tanks: Effect of simplified modeling of the roof and wind girder," vol. 91, 2015.
- [11] Y. Zhao and Y. Lin, "Buckling of cylindrical open-topped steel tanks under wind load," vol. 79, pp. 83-94, 2014.
- [12] Y. Uematsu, Y. Uematsu and J. Yasunaga, "Effects of wind girders on the buckling of open-topped storage tanks under quasi-static wind loading," vol. 124, pp. 1-12, 2018.
- [13] Y. Sun, L. Liu, N. Su, Y. Wu and S. Peng, "Experimental study on the wind-induced buckling of open-top storage tanks with wind girders via 3D-DIC technique," vol. 213, p. 108357, 2024.
- [14] Zeybek, Özer :Özkılıç, Yasin Onuralp, "Effects of reinforcing steel tanks with intermediate ring stiffeners on wind buckling during construction," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 203, p. 107832, 2023.

تبدیل می‌کند. به طور کلی عدم قطعیت‌های مختلفی از جمله سرعت و ارتفاع موج سونامی، مشخصات هندسی مخزن، وضعیت ارتفاع مایع درون مخزن و شرایط هندسی و موقعیت قرار گیری سخت کننده‌ها در مساله موثر هستند که در این پژوهش تنها به تاثیر شکل و موقعیت سخت کننده‌ها پرداخته شد و سایر کمیت‌ها ثابت فرض شدند. از این رو نیاز به مطالعات تکمیلی در این زمینه همچنان وجود دارد.

References

- [1] P. L.-F. Liu, P. Lynett, H. Fernando, B. E. Jaffe, H. Fritz, B. Higman, R. Morton, J. Goff and C. Synolakis, "Observations by the international tsunami survey team in Sri Lanka," *Science*, vol. 308, no. 5728, pp. 1595-1595, 2005.
- [2] Palermo, Dan; Nistor, Ioan; Nouri, Younes; Cornett, Andrew, "Tsunami loading of near-shoreline structures: a primer," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 36, no. 11, pp. 1804-1815, 2009.
- [3] H. Yeh, S. Sato and Y. Tajima, "The 11 March 2011 East Japan earthquake and tsunami: Tsunami effects on coastal infrastructure and buildings," *Pure and Applied Geophysics*, vol. 170, no. 6, pp. 1019-1031, 2013.
- [4] G. Chock, I. Robertson, D. Kriebel, M. Francis and I. Nistor, "Tohoku, Japan, earthquake and tsunami of 2011: Performance of structures under tsunami loads," 2013.
- [5] Y. Goto, "Tsunami damage to oil storage tanks," in *The 14 World Conference on Earthquake Engineering, Beijing*, 2008.
- [6] T. Ibata and I. Nakachi, "Damage to storage tanks caused by the 2011 Tohoku earthquake and tsunami and proposal for structural assessment method for

- phase tsunami flow through buildings with openings," *Journal of Earthquake and Tsunami*, vol. 9, no. 03, p. 1550007, 2015.
- [26] B. E. Larsen and D. R. Fuhrman, "Full-scale CFD simulation of tsunamis. Part 1: Model validation and run-up," *Coastal engineering*, vol. 151, pp. 22-41, 2019.
- [27] B. Forouzan, D. S. A. Baragamage, K. Shaloudegi, N. Nakata and W. Wu, "Hybrid simulation of a structure to tsunami loading," *Advances in Structural Engineering*, vol. 23, no. 1, pp. 3-21, 2020.
- [28] Hirt, Cyril W; Nichols, Billy D, "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries," *Journal of computational physics*, vol. 31, no. 1, pp. 201-225, 1981.
- [29] T. Al-Faesly, D. Palermo, I. Nistor and A. Cornett, "Experimental modeling of extreme hydrodynamic forces on structural models," *International Journal of Protective Structures*, vol. 3, no. 4, pp. 477-505, 2012.
- [30] N. Asadollahi, I. Nistor and A. Mohammadian, "Numerical investigation of tsunami bore effects on structures, part I: drag coefficients," *Natural Hazards*, vol. 96, no. 1, pp. 285-309, 2019.
- [31] ASCE/SEI7-22, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, Reston, Virginia: AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, 2022.
- [32] C. Bernier and J. E. Padgett, "Dynamic buckling of aboveground storage tanks subjected to hurricane-induced waves," in *Structures Congress 2018*, 2018.
- [33] E. Azzuni and S. Guzey, "Stability of open top cylindrical steel storage tanks: Design of top wind girder," *Journal of*
- [15] L. Drahorad, P. Marsalek, J. Hroncek, D. Rybansky, M. Sotola, Z. Poruba and M. Larys, "Design and Non-Linear Modeling of New Wind Girder Used for Bolted Tanks," *Buildings*, vol. 13, no. 11, p. 2724, 2023.
- [16] M. Batikha, "Strengthening of thin metallic cylindrical shells using fibre reinforced polymers," 2008.
- [17] W. Yang, Z. Wen, F. Li and Q. Li, "Study on tsunami force mitigation of the rear house protected by the front house," *Ocean Engineering*, vol. 159, pp. 268-279, 2018.
- [18] FEMA, Guidelines for design of structures for vertical evacuation from tsunamis, Washington, DC: Applied Technology Council , 2019.
- [19] Chen, Xiaolin; Liu, Yijun, Finite element modeling and simulation with ANSYS Workbench, CRC press, 2018.
- [20] API, Welded tanks for oil storage, American Petroleum Institute, 2013.
- [21] Y. Uematsu, T. Yamaguchi and J. Yasunaga, "Effects of wind girders on the buckling of open-topped storage tanks under quasi-static wind loading," *Thin-Walled Structures*, vol. 124, pp. 1-12, 2018.
- [22] Y. Zhao, Q.-s. Cao and L. Su, "Buckling design of large circular steel silos subject to wind pressure," *Thin-Walled Structures*, vol. 73, pp. 337-349, 2013.
- [23] X. Chen and Y. Liu, Finite element modeling and simulation with ANSYS Workbench, CRC press, 2018.
- [24] Madenci, Erdogan; Guven, Ibrahim, The finite element method and applications in engineering using ANSYS®, Springer, 2015.
- [25] Hartana and K. Murakami, "Numerical and experimental simulation of two-

عددی "SSIIM, محیط زیست و مهندسی آب", vol. 2, no. 4, pp. 333-345, 2016.

Pressure Vessel Technology, vol. 139, no. 3, p. 031207, 2017.

- [34] L. A. Godoy, "Buckling of vertical oil storage steel tanks: Review of static buckling studies," *Thin-Walled Structures*, vol. 103, pp. 1-21, 2016.
- [35] E. Riks, "An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems," *International journal of solids and structures*, vol. 15, no. 7, pp. 529-551, 1979.
- [36] Azizi, E. Stranghöner, N, "Buckling of externally pressured cylinders with different degrees of ring-stiffening," in *Modern trends in research on steel, aluminium and composite structures*, Routledge, 2021, pp. 265-271.
- [37] Ö. Zeybek, C. Topkaya and J. M. Rotter, "Stress resultants for wind girders in open-top cylindrical steel tanks," *Engineering Structures*, vol. 196, p. 109347, 2019.
- [38] S. H. T. A. K. Z. I. M. O. L. S. Karim, "Analysis of Hydraulic Properties of Stepped Spillways with Alternating Steps," *Advances in Civil Engineering and Environmental Science*, vol. 3, no. 2, pp. 89-107, 2026.
- [39] S. H. T. A. K. Z. I. M. O. L. S. Karim, "Analysis of Hydraulic Properties of Stepped Spillways with Alternating Steps," *Analysis of Hydraulic Properties of Stepped Spillways with Alternating Steps*, vol. 3, no. 2, pp. 89-107, 2026.
- [40] F. B. J. D. A. Maleki, "Numerical analysis of geometrical and mechanical characteristics of the sliding mass influences on impulsive wave generation in dam reservoirs," *Environment and Water Engineering*, vol. 11, no. 3, pp. 326-335, 2024.

- [41] ح. ن. ه. س. ع. اصغر، "شبیه سازی آب شستگی و میدان جریان در اطراف تک شمع با استفاده از مدل