Modares Civil Engineering Journal

Volume 26, Issue 1, 2026, 53-66
DOI: 10.48311/mcej.2025.27809

Tarbiat Modares University

Investigating the effect of buried depth of concrete tanks under explosive load in layered clay soils

Mohammad Amiri [1*], Mokhtar Dalvand[2] , Hadis Karimi[3]

1. Associate Professor, University of Hormozgan, Faculty of Engineering, Bandar Abbas, Iran.
2. Master Student, Islamic Azad University of Bandar Abbas, Faculty of Engineering, Bandar Abbas, Iran.
3. Ph.D. Candidate, University of Hormozgan, Faculty of Engineering, Bandar Abbas, Iran.

Abstract

Buried concrete tanks are critical components of national and strategic infrastructure, serving both public and military purposes. Damage to these structures can result in severe social, security, and environmental crises. Therefore, designing such structures to withstand the impact of explosive loads is of paramount importance. Additionally, understanding the behavior of silty clay soils under such loading conditions is essential for structural safety. This study examines the influence of burial depth on the performance of concrete tanks subjected to explosive loading in silty clay soils. The investigation utilized AUTODYN and FLAC 2D software for numerical modeling and analysis. The study modeled the behavior of a rectangular buried concrete tank with a height of 6.5 m and a length of 9 m at burial depths of 3 m, 6 m, 8 m, and 10 m, subjected to explosive loads equivalent to 50, 100, and 200 kg of TNT. The scenario assumes surface explosions at a defined distance and pressure from the tank structure. Soil, structural properties, and the pressure exerted by the fluid inside the tank were considered in the analysis. The results reveal that increasing the burial depth significantly reduces the displacement of the tank's roof and floor under explosive loading, primarily due to the attenuation of explosive energy by the surrounding soil. Specifically, for a 50 kg TNT explosion, increasing the burial depth from 3 m to 6 m, 8 m, and 10 m decreased the roof displacement by 54%, 70%, and 78%, respectively. Similarly, stress levels in the tank structure showed a notable reduction with increased burial depth. For instance, the stress caused by a 50 kg TNT explosion at a depth of 3 m was 17.22×10^6 Pa, which dropped to 2.83×10^6 Pa at a depth of 6 m. Beyond 8 m, however, further increases in burial depth yielded diminishing returns in stress reduction. Higher explosive loads, such as 200 kg TNT, induced significantly higher stress levels but followed a similar trend of stress reduction with burial depth. The maximum stress decreased by approximately 73% when burial depth increased from 3 m to 6 m, 50% from 6 m to 8 m, and 39% from 8 m to 10 m. The reduction in stress and displacement becomes less pronounced at greater depths due to soil compaction and the overburden pressure of the soil layers above the tank, which facilitate better transmission of the residual explosion energy. The findings indicate that burial depth is a critical factor in mitigating the effects of explosive loading on buried structures. Increased burial depth reduces displacement and stress on the tank, thereby enhancing structural resilience and reducing the likelihood of failure. This research highlights the importance of considering soil-structure interaction and burial depth in the design of underground concrete tanks subjected to explosive loads. The insights gained can guide the design and construction of resilient underground structures in silty clay soils to minimize damage from explosive threats.

Review History

Received: Nov 24, 2024
Revised: Feb 3, 2025
Accepted: Nov 8, 2025

Keywords

Numerical analysis
Concrete tanks
Explosive loads
Burial depth
TNT explosions

* Corresponding Author Email: amirii@hormozgan.ac.ir - ORCID: 0000-0002-3751-0261

مجله علمی مهندسی عمران مدرس

دوره ۲۶، شماره ۱، سال ۱۴۰۵ - صفحات ۵۳ تا ۶۶

DOI: 10.48311/mcej.2025.27809

تحلیل اثر عمق مدفون مخازن بتنی تحت بار انفجاری در خاک‌های رسی لای‌دار

محمد امیری[۱*]، مختار دالوند[۲]، حدیث کریمی[۳]

۱. دانشیار؛ گروه مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

۲. کارشناس ارشد؛ مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندرعباس، بندرعباس، ایران.

۳. دانشجوی دکتری؛ مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

چکیده

مخازن بتنی مدفون به عنوان زیرساخت‌های عمومی و نظامی با اهمیت ملی و استراتژیک، در صورت آسیب دیدن، می‌توانند منجر به بحران‌های اجتماعی، امنیتی و زیست‌محیطی شوند. از این‌رو، طراحی این سازه‌ها برای مقاومت در برابر بارهای ضربه‌ای ناشی از انفجار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین، رفتار خاک‌های رسی لای‌دار در مواجهه با این نوع بارگذاری نیازمند بررسی دقیق است. در این مقاله، به بررسی تأثیر عمق دفن مخازن بتنی تحت بار انفجاری در خاک‌های رسی لای‌دار پرداخته شده است. مدل‌سازی و تحلیل این پدیده با استفاده از نرم‌افزار AUTODYN و نرم‌افزار المان محدود FLAC 2D انجام شده است. در این تحقیق، رفتار مخزن بتنی مدفون در عمق‌های مختلف (۳، ۶، ۸ و ۱۰ متر) تحت بارهای انفجاری ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم TNT مورد بررسی قرار گرفته است. فرض بر این بوده که انفجار سطحی با فشار و فاصله مشخصی از ساختار مخزن رخ داده است و در تحلیل‌ها، ویژگی‌های خاک، سازه و فشار سیال داخل مخزن در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عمق مدفون مخزن بتنی، میزان جابه‌جایی سقف و کف مخزن تحت بار انفجاری کاهش می‌یابد. این کاهش ناشی از استهلاک انرژی انفجار در خاک‌های اطراف مخزن است. به‌طور خاص، پس از اعمال بار انفجاری ۵۰ کیلوگرم TNT، با افزایش عمق مدفون مخزن بتنی از ۳ متر به ۶، ۸ و ۱۰ متر، جابه جایی سقف مخزن به ترتیب ۵۴٪، ۷۰٪ و ۷۸٪ کاهش یافته است. این نتایج نشان می‌دهد که عمق دفن مخزن تأثیر قابل توجهی بر عملکرد آن در برابر بار انفجاری دارد و می‌تواند به‌طور چشمگیری از آسیب‌های وارد بر سازه جلوگیری کند.

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۴

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۷

کلمات کلیدی

بررسی عددی

مخزن بتنی

بار انفجاری

عمق مدفون

افزایش عمق

مواد منفجره TNT

۱- مقدمه

سازه‌های زیرزمینی با توجه به ماهیت حیاتی، همواره به عنوان اهداف کلیدی برای حملات تروریستی ظاهر می‌شوند. بتن مسلح (Reinforced Concrete یا به‌اختصار RC) به عنوان یک مصالح ساختمانی پرکاربرد در هر دو زمینه نظامی و غیرنظامی می‌باشد، ویژگی‌های ذاتی بتن آرمه مانند دوام بالا، مقاومت در برابر خوردگی و مقاومت در برابر آتش‌سوزی، آن را برای ساخت سازه‌های زیرزمینی مناسب می‌سازد [1-2].

پس از انفجارهای بزرگ، امواج فشاری ناشی از انفجار با سرعت مافوق صوت در هوای اتمسفر منتشر می‌شوند [3]. امواج انفجاری به‌سرعت ماده منفجره را به گازی بسیار داغ، متراکم و پرفشار تبدیل می‌کند. حجم گاز این ماده منفجره باعث ایجاد امواج

* رایانامه نویسنده مسئول: amirii@hormozgan.ac.ir - ORCID: 0000-0002-3751-0261

انفجاری قوی در هوا می‌شود. تنها حدود یک‌سوم کل انرژی تولید شده در بیشتر مواد منفجره قوی در فرآیند انفجار آزاد می‌شود. دوسوم انرژی باقیمانده در هنگام انفجارها به‌آرامی در هوا آزاد می‌شود زیرا مواد انفجاری با هوا مخلوط می‌شوند و می‌سوزند. یک انفجار به صورت امواج ضربه‌ای متشکل از شوک‌ها با شدت بالا است که از سطح ماده منفجره به سمت خارج به هوای اطراف منبسط می‌شود. همان‌طور که‌موج ناشی از انفجار در محیط گسترش می‌یابد، به دلیل استهلاک انرژی، قدرت و سرعت آن‌ها کاهش می‌یابد [4].

نیروی ایجادشده توسط بارهای انفجاری تا حد زیادی از بار طراحی موردنظر یک سازه فراتر می‌رود و آثار خود را در یک بازه زمانی بسیار کوتاه ایجاد می‌کند. درنتیجه، هنگامی که سازه بتنی تحت بارهای انفجاری و بالستیک قرار می‌گیرد، پاسخ سازه به دلیل تأثیر متقابل عوامل بسیار پیچیده می‌شود [1].

سازه‌های زیرزمینی بسته به شکل هندسی، عمق دفن و پارامترهای مختلف ژئوتکنیکی و وزن مواد منفجره رفتارمتفاوتی را از خود نشان می‌دهند [5]. بار ایجاد شده در اثر انفجار می‌تواند پوشش سازه‌های زیرزمینی را بی‌ثبات کرده و منجر به تجمع تدریجی آسیب در سازه زیرزمینی و درنهایت شکست ناگهانی شود. این آسیب به اشکال مختلفی ازجمله ترک خوردگی، تغییر شکل و خستگی ظاهر می‌شود [6-7].

به دلیل توانایی استهلاک خوب خاک و ایجاد یک پوشش ایمن، سازه‌های زیرزمینی در مواجه با انفجار از امنیت قابل توجهی برخوردارند. این سازه‌ها با هر کاربری که دارند به عنوان یک سازه امن به حساب می‌آیند. این مزیت منجر به توجه بیشتر حملات و تلاش برای تخریب این سازه‌ها شده است [8]. از این رو بسیاری از پژوهشگران، تحقیقات متعددی برای درک و بررسی پاسخ سازه‌های زیرزمینی تحت تاثیر بارهای انفجاری انجام داده‌اند.

هاتف و رحیمی (۲۰۰۲) با بررسی رفتار خاک رس لای‌دار تحت بار متناوب بیان کردند طی بارگذاری دینامیکی رفتار تنش کرنشی خاک‌های رسی و لای‌ها به صورت غیرخطی و استهلاکی (Hysteretic) است [9].

گوی و چین (۲۰۰۶) به بررسی عددی تونلی واقع در زیر فرودگاه سونگشان تایپه در برابر انفجار سطحی پرداختند. پژوهشگران نشان دادند، پارامترهایی که سطح آسیب سازه‌های زیرزمینی را کنترل می‌کنند شامل شدت بارگذاری انفجار، مدول یانگ و نسبت میرایی خاک می‌باشد و شدت انفجار از عوامل مؤثر بر میزان افزایش لنگر خمشی و تنش وارد بر تونل است [10].

قدس و شنائی (۲۰۱۴) به بررسی تأثیر بار دینامیکی زلزله بر مخزن بتنی مدفون پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد، نیروهای غالب در زمان زلزله نیروی هیدرودینامیکی آب بر دیواره‌های مخزن است [11].

فراست و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی تاثیر تغییرات مخازن مدفون نسبت به، عمق مدفون مخزن، جنس خاک اطراف مخزن و توزیع فشار دینامیکی سیال‌های متفاوت پرداختند و نتایج این پژوهش حاکی از آن است که هرچه میزان عمق مخزن افزایش پیدا کند باعث افزایش تنش و جابه‌جایی شده و با نرم‌تر شدن خاک اطراف مخزن نتایج بحرانی‌تری حاصل خواهد شد. همچنین توزیع فشار دینامیکی سیال، بشدت به وزن مخصوص سیال مرتبط می‌باشد [12].

تقوی پارسا و پیمان (۲۰۲۰) نیز به بررسی آثار انفجار سطحی روی سازه‌های زیرزمینی در اعماق متفاوت با شبیه سازی عددی پرداختند. بررسی نتایج نشان داد مرکز سطح سقف و دیوارهای کناری سازه زیرزمینی بیشترین مقدار بار را دریافت می‌کند که افزایش عمق سازه زیرزمینی در کاهش آثار مخرب انفجار موثر است [13].

اسمی و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی واکنش سازه‌های زیرزمینی در معرض انفجار خارجی پرداختند. نتایج نشان داد تونل در برابر انفجارهای سطحی که مستقیماً بالای مرکز تونل رخ می‌دهد آسیب پذیرتر از انفجارهایی است که دور از تونل رخ می‌دهد [14].

ژو و همکاران (۲۰۲۴) بر اساس یک مدل المان محدود، به بررسی ویژگی‌های دینامیکی و ارزیابی آسیب سازه‌های تونلی تحت بارهای انفجار تماسی پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد، در اثر انفجار مواد منفجره TNT، تونل‌ها به‌طور جزئی تا متوسط آسیب می‌بینند [15].

فان و همکاران (۲۰۲۴) به منظور تجزیه و تحلیل رفتار دینامیکی و آسیب تونل مدفون کم عمق در اثر انفجارهای زیر آب، آثار پوشش خاک اشباع، وزن انفجاری، عمق مدفون و عمق آب بر رفتار دینامیکی و آسیب تونل مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان

داد، بار انفجار مستقیماً روی تونل تأثیر می گذارد که به راحتی می‌تواند باعث آسیب ساختاری شود ولی پوشش خاک اشباع شده می‌تواند به طور موثری تاثیر بار انفجار بر تونل را کاهش دهد. علاوه بر این افزایش عمق مدفون می‌تواند آثار انفجار بر سازه را کاهش دهد [2].

با پیشرفت‌های مهندسی ژئوتکنیک و دانش ساخت سازه‌های مدفون در خاک، پژوهش‌ها پیرامون بارهای انفجاری و تأثیر آن‌ها بر سازه‌های مدفون گسترش یافته است. همچنین با توسعه تکنولوژی و فراهم شدن ابزارهای تجزیه‌وتحلیل عددی و شبیه‌سازی مدل‌های واقعی در نرم‌افزارهای مختلف، بررسی رفتار سازه‌های زیرزمینی تحت بارهای انفجاری با دقت و عمق بیشتری امکان‌پذیر شده است [16].

بررسی تعامل بین سازه‌های مدفون و خاک در مواجهه با انفجار و درک رفتار خاک، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بارگذاری‌های ناشی از انفجارهای عمدی یا تصادفی می‌توانند به طور جدی به یکپارچگی مخازن مدفون آسیب برسانند. در این میان، عمق دفن و نوع خاک اطراف سازه نیز از عوامل تاثیرگذار در رفتار سازه‌های مدفون به شمار می‌آیند.

در حالی که مطالعات متعددی در زمینه تحلیل رفتار مخازن بتنی تحت بار انفجاری وجود دارد، بیشتر آن‌ها به نوع خاک یا تأثیر عمق دفن در خاک‌های خاص توجه نکرده‌اند. به‌ویژه، خاک‌های رسی لای‌دار به دلیل ویژگی‌های خاص خود نظیر چگالی بالا، قابلیت تراکم‌پذیری و ویژگی‌های الاستیک غیرخطی، می‌توانند تأثیر متفاوتی بر رفتار سازه‌های بتنی در برابر بار انفجاری داشته باشند که در تحقیقات پیشین کمتر به آن پرداخته شده است. بر همین اساس، هدف مقاله حاضر مطالعه رفتار سازه مدفون بتنی تحت بارهای انفجاری، با در نظر گرفتن اندرکنش سیال و سازه، و استفاده از روش تفاضل محدود در نرم‌افزار FLAC 2D است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- زمین‌شناسی عمومی منطقه مورد مطالعه

طبق بررسی‌های ژئوتکنیکی، در منطقه مورد مطالعه، نوع غالب لایه‌های خاک رسوبات آبرفتی است که در برخی نقاط رسوبات ریزدانه و در برخی نقاط درشت‌دانه است. مکان احداث سازه مدفون، عناصر غالب خاک سیلت و رس هستند.

بافت لایه‌های خاک در نواحی احداث مخزن مورد مطالعه از جنس رسوبات ریزدانه رس و لای با خاصیت خمیری کم (ML-CL) باضخامت‌هایی بین ۵ تا ۵۰ متر است. برخی از پارامترهای ژئوتکنیکی خاک منطقه موردمطالعه در جدول (۱) ارائه‌شده است.

زاویه اصطکاک داخلی (φ) و چسبندگی (C) خاک بر اساس استاندارد ASTM,D3080 و دانسیته (γ) بر اساس استاندارد ASTM, D854 تعیین‌شده است [17-18].

۲-۲- مشخصات مصالح

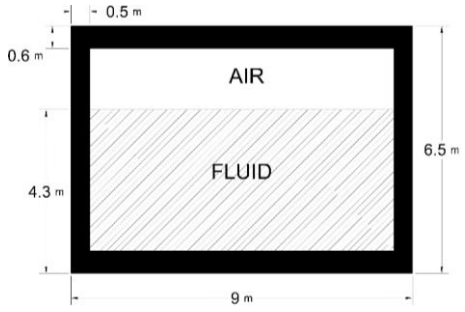
مدل‌سازی سازه‌های زیرزمینی با در نظر گرفتن پوشش بتنی با هندسه مستطیلی به ارتفاع ۶/۵ متر و طول ۹ متر اجراشده است (شکل ۱). مدل رفتاری که برای پوشش بتنی تعریف شده است مدل رفتاری الاستیک است. خواص مصالح به کار رفته در ساخت مخزن بتنی در جدول (۲) ارائه شده است.

مدول بالک (K) و مدول برشی (G) با استفاده از پارامترهای مدول الاستیسیته (E) و ضریب پواسون (υ) و با استفاده از روابط (۱ و ۲) محاسبه‌شده‌اند [19].

جدول ۱. برخی پارامترهای ژئوتکنیکی خاک منطقه موردمطالعه

Table 1. Some geotechnical parameters of the soil of the studied area

مصالح	γ (kN/m³)	υ	E (MPa)	C (kPa)	φ
Alluvial Deposits (ML-CL)	21.5	0.4	110	120	23



شکل ۱. نمای شماتیک مخزن بتنی مورد مطالعه

Fig. 1. Schematic view of the studied concrete tank

جدول ۲. ویژگی‌های مکانیکی پوشش بتنی مخزن

Table 2. Mechanical characteristics of the tank's concrete cover

E (Pa)	υ	γ (kN/m³)	Thickness of Tank Walls (mm)	Thickness of Tank Floor and Roof (mm)
$2.1*10^{10}$	0.3	25	500	600

$$G = \frac{E}{2(1+\upsilon)} \quad (۱)$$

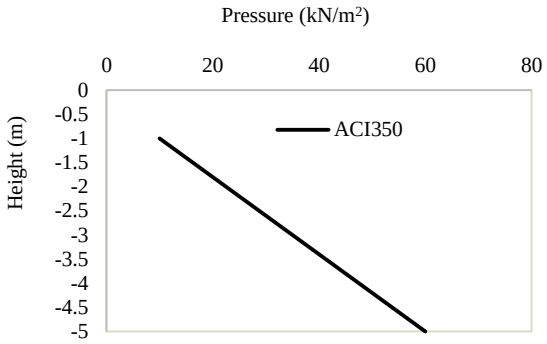
$$K = \frac{E}{3(1-2\upsilon)} \quad (۲)$$

در تمام مدل‌سازی‌ها ارتفاع سیال داخل مخزن برابر $\frac{2}{3}$ ارتفاع مخزن (۴/۳ متر) در نظر گرفته‌شده است.

چگونگی توزیع نیروی هیدرودینامیکی برای مخزن بتنی مطابق شکل (۲) است. با توجه به اینکه نرم‌افزار FLAC 2D قادر به شبیه‌سازی ویژگی‌های سیالات نیست، برای بررسی عملکرد المان فشار حاصل از سیال بر اساس آیین‌نامه ACI با توجه به ارتفاع آب مخزن و همچنین چگالی آب ($۱۰\frac{kN}{m^3}$) مطابق با رابطه (۳) بر دیواره مخزن اعمال‌شده است. دیاگرام فشار سیال وارد شده به دیواره مخزن در شکل (۳) ارائه شده است.

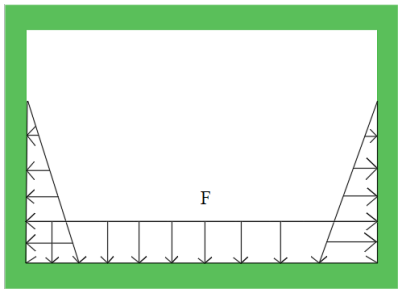
$$F = \gamma \times h \quad (۳)$$

با توجه به اهمیت سازه‌های مدفون و وجه تمایز آن‌ها به خاطر اندرکنش خاک و سازه نسبت به حالت سطحی، در مطالعه حاضر سعی شد رفتار مخزن بتنی مدفون در عمق‌های متفاوت (۳، ۶، ۸ و ۱۰ متری) تحت تأثیر بار انفجاری (۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم TNT) بررسی شود.



شکل ۲. چگونگی توزیع بار هیدرودینامیکی

Fig. 2. How to distribute the hydrodynamic load



شکل ۳. دیاگرام فشار سیال وارده به دیواره مخزن

Fig. 3. Fluid pressure diagram on the tank wall

۲-۳- مدل‌سازی هندسی

با توجه به اینکه یکی از اهداف پژوهش بررسی آثار امواج ناشی از انفجار سطحی روی مخزن بتنی مدفون در خاک است، مدل‌سازی محیط و مخزن بتنی با استفاده از روش تفاضل محدود و به وسیله نرم‌افزار FLAC 2D و شبیه‌سازی انفجار به وسیله نرم‌افزار AUTODYN انجام‌شده است. برای بررسی اثر انفجار بر مخزن بتنی مراحل به شرح ذیل انجام‌شده است:

۱- مدل‌سازی محیط پیرامونی و مخزن بتنی به صورت استاتیکی تا قبل از اعمال فشار انفجار، که مدل به تعادل استاتیکی رسانده شود.

۲- تعریف شرایط مرزی و اعمال بارهای استاتیکی به مدل.

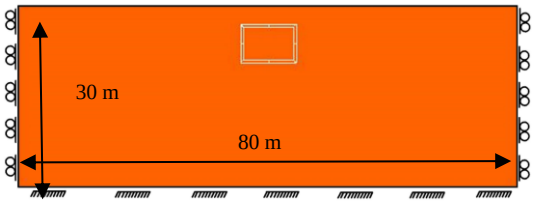
۳- اعمال بارهای دینامیکی و همچنین اعمال سایر پارامترهای مورد نیاز تا بتوان تحلیل دینامیکی محیط خاک اطراف و مخزن بتنی را در اثر انفجار بررسی کرد.

مدل‌سازی به صورت یک سیستم کاملاً متقارن و در فضایی دوبعدی و با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، سیال و سازه و رفتار غیرخطی همه مصالح انجام‌شده است. سیستم شبیه‌سازی‌شده به دو فاز خاک و سازه مدفون تقسیم می‌شود. با توجه به اینکه موج حاصل از انفجار در خاک اتساع پیداکرده و سپس به سازه مدفون برخورد می‌کند، اندرکنش سازه و خاک دربردارنده سازه نیز در مدل‌سازی تعریف شده است.

۲-۳-۱- ساخت مدل در نرم‌افزار FLAC 2D

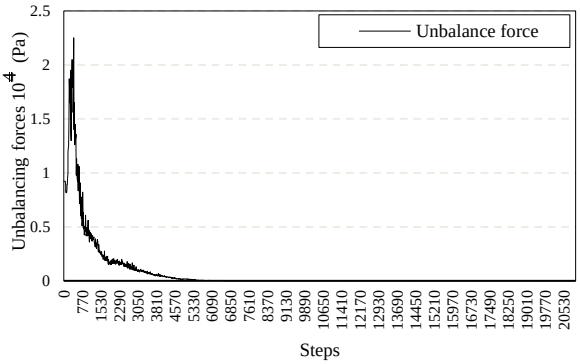
در ابتدا به مدل‌سازی شمای کلی محیط پروژه پرداخته‌شده است. هندسه مدل از دو قسمت خاک و سازه مدفون تشکیل شده است. مدل‌سازی در این مرحله به‌وسیله ابزارهای ترسیمی در فضای دوبعدی انجام شده است که در شکل (۴) هندسه کلی مدل ارائه شده است. هنگام ترسیم هندسه مدل، تمام مرزهای فیزیکی که باید در مدل ایجاد شوند، قبل از تجزیه‌وتحلیل ترسیم شده‌اند. پس از ترسیم هندسه مدل، اجزای مختلف مدل با استفاده از المان‌های مختلف و تعریف مصالح از یکدیگر جدا می‌شود.

ازآنجا که هدف این است که محیط نامحدود خاک به صورت محدود مدل شود، ابعاد مدل خاک طوری انتخاب شده که در عین محدودیت و کوچک بودن، کمترین تأثیر را بر نتایج داشته باشد. در واقع سعی شده است با مدل کوچک و زمان تحلیل کمتر، نتایج دقیقی حاصل شود.



شکل ۴. هندسه کلی، ابعاد و شرایط مرزی مدل

Fig. 4. General geometry, dimensions and boundary conditions of the model



شکل ۵. چگونگی به تعادل رسیدن نیروهای نامتعادل کننده

Fig. 5. How to balance unbalanced forces

برای بررسی رفتار انـدرکنش خـاک و سـازه روی توزیـع فشـار روی دیواره مخزن بتنی تحت بار انفجار، مخـزن بـا هندسـه مکعبـی مدل‌سازی شده است. مخزن در حالت نیمه‌پر ($\frac{2}{3}$ مخـزن) تحـت بـار انفجار قرارگرفته است و فشارهای ایجـاد شـده روی دیـواره مخـزن ناشی از اندرکنش سازه و ساختار خاک کنترل می‌شود. در ایـن مقالـه مخزن مدفون در خاک بر اساس ضوابط طراحـی و محاسـبه مخـازن (نشریه شماره ۱۲۳ سازمان برنامه و بودجه) طراحی شده است [20].

مدل‌سازی خاک در اطراف سـازه بـر اسـاس شـرایط مـرزی و حجم محاسبات به گونه‌ای انتخاب می‌شـود کـه درحـالی‌کـه تـأثیر مرزها بر آنالیز بی‌تأثیر است، حجم مدل به حـداقل ممکـن کـاهش یابد، بنابراین با استفاده از آزمون‌وخطا ارتفاع مؤثر مـدل ۳۰ متـر و طول مدل ۸۰ متر در نظر گرفته شده است (شکل ۴).

بخش اول مدل‌سازی ایجاد تنش‌ها و جابه‌جایی‌های اسـتاتیکی در مدل است. این بخش به دو بخش ایجاد محدودیت‌های درجا و ساخت سازه زیرزمینی در مدل عددی تقسیم مـی‌شـود. در مرحلـه مدل‌سازی استاتیکی شرایط تکیه‌گاهی به گونه‌ای باید تعریف شـود که از حرکات افقی به سـمت مرزهـای جـانبی جلـوگیری شـود و همچنین مرز انتهـای مـدل نیـز بایـد بـه شـکلی اعمـال شـود کـه جابه‌جایی‌های قائم را در مدل مقید کنـد و درجـه آزادی خـارج از صفحه مدل بسته شود (شکل ۴). بعد از به تعادل رسـیدن مـدل در حالت استاتیکی تمامی نیروهای نامتعادل به صفر میل مـی‌کننـد. در شکل (۵) به تعادل رسیدن نیروهای نامتعادل کننده در مدل پـس از تحلیل استاتیکی نشان داده‌شده است.

در مرحله بعد سازه مخزن بتنی مدفون نیمه پر در مدل طراحی شد. به این صورت کـه المـان‌هـای پوششـی بـرای سـازه تعریـف می‌شود و مشخصه‌های هر قسمت به آن اعمـال و درنهایـت مـدل تحلیل می‌شود. در این بخش از تحلیل، بار خاک اطـراف بـه سـازه مدفون نیمه‌پر وارد می‌شود و تنش‌ها و جابه جایی‌ها محاسبه شـده است.

۲-۳-۲- تعیین پارامترهای انفجار و ساخت مدل در نـرم‌افـزار AUTODYN

با توجه به اینکه نرم‌افزار FLAC 2D قادر به شبیه‌سازی فرآینـد انفجـار نیسـت، شـبیه‌سـازی انفجـار در نـرم‌افـزار AUTODYN انجـام‌شـده اسـت. بـا اسـتفاده از نـرم‌افـزار AUTODYN انفجـار مدل‌سازی شده و تاریخچـه انفجـار پـس از اسـتخراج بـه‌صـورت کدهایی به نرم‌افزار FLAC 2D اعمال شده است.

برای شبیه‌سازی انفجار در ابتدا اجـزای تشـکیل‌دهنـده محـیط تعریف شد که در این گام هوا و ماده منفجره در نظـر گرفتـه شـد. ازآنجا که مدل‌سازی هـوا و مـاده منفجـره مـدنظر بـود، از تحلیـل اویلری استفاده‌شـده اسـت، زیـرا تحلیـل اویلـری بـرای مصـالحی انتخاب می‌شود که کرنش‌های بسیار زیادی دارند.

در نرم‌افزار دو شعاع تعریف شـده اسـت، اولـی تحـت عنـوان کمترین شعاع است که به‌منظور ایجاد فاصله‌ای بین مرکـز گـوه تـا نقطه انتهای گوه که در زمان دوران به حجم کره‌ای در مرکز انفجار بتواند ایجاد کند که عموماً مقدار ۱ میلی‌متر برای آن تعریف شـد و شعاع بیشینه که بستگی دارد چه ابعادی از هوا هـدف مـدل‌سـازی باشد. که بدین منظور ابتدا شعاع تـأثیر مـاده منفجـره از رابطـه (۴) محاسبه شده است.

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad (۴)$$

ρ= چگالی ماده منفجره TNT برابر با $1630\frac{kg}{m^3}$ می‌باشد.

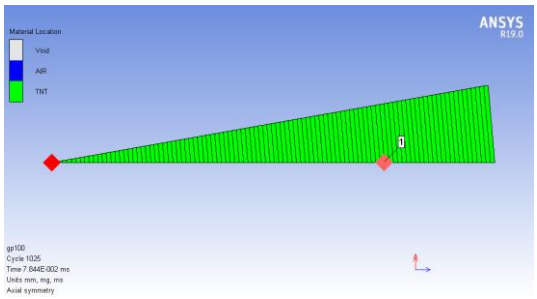
m= جرم ماده منفجره برحسب kg

V= حجم کره ($V = \frac{4}{3}\pi R^3$)

جدول ۳. شعاع تأثیر انفجار مقادیر مختلف ماده منفجره TNT (kg)

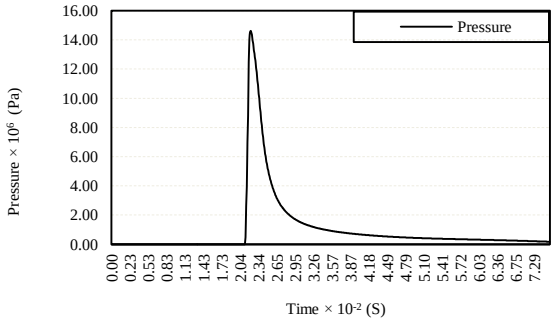
Table 3. The impact radius of the explosion of different amounts of explosive TNT (kg)

Weight of Explosive (kg)	50	100	200
Effect Radius (mm)	193	243	308



شکل ۶. شمای کلی محیط انفجار و نحوه اتساع فشار جبهه موج حاصل از انفجار ۵۰۲ کیلوگرم TNT

Fig. 6. The general scheme of the explosion environment and the expansion of the pressure wave front resulting from the explosion of 502 kg of TNT



شکل ۷. تاریخچه انفجار ۵۰ کیلوگرم TNT

Fig. 7. History of 50 kg TNT explosion

در واقع برای ۵۰ کیلوگرم TNT، شعاع تأثیر ماده منفجره برابر ۱۹۳ میلی‌متر و شعاع بیشینه ۴۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در گام بعدی به تعریف مش‌بندی مدل پرداخته شده که بسته به شعاع بیشینه تعداد مش‌ها اعمال می‌شود. برای شعاع بیشینه ۴۰۰ میلی‌متر، تعداد ۲۰۰ مش در راستای R برای مدل در نظر گرفته‌شده است. در جدول (۳) شعاع تأثیر محاسبه شده با استفاده از رابطه (۴) برای مقادیر مختلف ماده منفجره ارائه شده است.

گام بعدی در ادامه مدل‌سازی در نرم‌افزار AUTODYN، ابعاد محاسبه شده شعاع تأثیر مواد منفجره در مدل تعریف‌شده است (۱۹۳ میلی‌متر). چگالی ماده منفجره (ρ) TNT که مقدار آن برابر $1630\frac{kg}{m^3}$ است و انرژی داخلی TNT نیز به‌طور پیش‌فرض برای ماده منفجره برابر (Pa)^{۶}۱۰×۳/۶۸ در نظر گرفته شده است [21].

در گام بعد به تحلیل مدل پرداخته‌شده است. به مدل تا رسیدن جبهه موج به مخزن بتنی فشارسنج تعبیه‌شده و در مسیر انفجار اجازه تحلیل داده شد. در شکل (۶) شمای کلی مدل‌سازی شده از محیط انفجار و همچنین چگونگی اتساع فشار جبهه موج ایجادشده توسط ماده منفجره نشان داده‌شده است.

فشارسنج تعبیه‌شده در مسیر انتشار موج انفجار به فاصله شعاع تأثیر برای اندازه‌گیری فشار حاصل از انفجار قرار داده‌شده است (شکل ۶).در این قسمت پس از اعمال فشار انفجار، اجازه داده شد تا موج حاصل از انفجار به فشارسنج برسد و سپس تحلیل را متوقف کرده چون حداکثر فشار در همین فاصله رخ می‌دهد. به‌صورت موردی برای ۵۰ کیلوگرم TNT کمتر از ۷/۸۴ میلی‌ثانیه زمان لازم بود که موج انفجار به فشارسنج تعبیه شده برسد.

در انتها کدهای استخراج‌شده از نرم‌افزار AUTODYN، به‌صورت نموداری شکل (۷) به‌عنوان خروجی به نرم‌افزار FLAC 2D اعمال شده است.

در آخرین مرحله مدل مورد تحلیل دینامیکی قرار گرفته است، بدین منظور ابتدا شرایط مرزی برای تحلیل دینامیکی تغییر داده شد. به این صورت که در تمامی مدل‌ها مرزهای چپ و راست مدل به مرزی آزاد و مرز تحتانی مدل در جهات x و y را برای جلوگیری از انعکاس امواج، به‌صورت ویسکوز در نظر گرفته‌شده تا رفتار محیط در مدل‌سازی تا حد امکان به شرایط طبیعی پروژه نزدیک شود. در این مرحله تمامی جابه جایی‌ها و سرعت‌هایی که ناشی از بار استاتیکی بود صفر در نظر گرفته شد.

بر اساس MANUAL نرم‌افزار FLAC 2D بهترین نوع میرایی برای انفجار و بارهای دینامیکی، میرایی مصنوعی است که a_n و a_l دو پارامتر ثابتی هستند که باید به نرم‌افزار اعمال شوند و مقدارشان برای نیروی انفجار برابر یک در نظر گرفته می‌شود. درواقع اساس تعریف میرایی مصنوعی توسط فون‌نویمان (Von Neumann) و ریچتمایر (Richtmyer) به‌منظور شبیه‌سازی عددی مسائل دینامیکی تحت امواج قوی مانند انفجار انجام شده است.

به دلیل انفجار حفره‌ای ایجاد می‌شود که به آن گودال انفجار گفته می‌شود. مهم‌ترین متغیرهایی که در شکل‌گیری گودال انفجار نقش دارند، وزن ماده منفجره، جنس خاک و عمق انفجار است. در کل فاصله انفجار از سطح و وزن ماده انفجاری به‌عنوان مهم‌ترین پارامترها برای پیش‌بینی عمق و شکل چاله می‌باشند. در مورد

انفجارهای سطحی که در این پروژه مورد بررسی قرارگرفته است، اطلاعات بسیار کمی در دسترس است. بر اساس رابطه (۵) قطر گودال انفجار بر اساس وزن ماده منفجره محاسبه شد و خاک‌برداری گودال در مدل‌سازی منظور شده است [22].

$$D = 0.8\,W^{1/3} \qquad (۵)$$

D: قطر گودال ناشی از انفجار برحسب متر

W: وزن ماده منفجره برحسب کیلوگرم

در جدول (۴) اندازه قطر گودال برای وزن‌های مختلف TNT ارائه‌شده است.

زمانی که شرایط برای اعمال فشار انفجار به مدل مهیا شد، تاریخچه انفجار استخراج‌شده از نرم‌افزار AUTODYN در نرم‌افزار FLAC 2D فراخوان شده و به‌صورت پالس فشار به صورت شعاعی به سطح گودال وارد شد و از گودال به سمت سازه زیرزمینی منتشر شد. درواقع هنگامی‌که انفجار رخ می‌دهد، امواج از یک نقطه شروع می‌شوند و از این نقطه دور می‌شوند و به‌تدریج در محیط پخش می‌شوند.

جدول ۴. قطر گودال انفجار برای مقادیر مختلف ماده منفجره (kg)

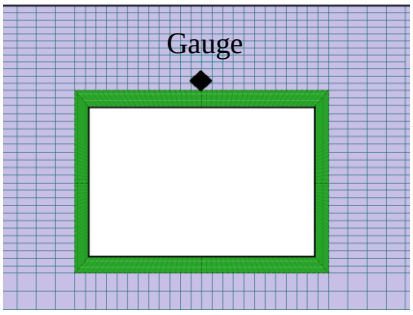
Table 4. The diameter of the explosion pit for different amounts of explosive (kg)

Weight of Explosive (kg)	50	100	200
Crater Diameter (m)	2.95	3.71	4.68

جدول ۵. تنش‌های حاصل از انفجار با توجه به عمق مدفون مخزن (Pa)

Table 5. The stresses resulting from the explosion according to the buried depth of the tank (Pa)

Weight of Explosive (kg)	Depth of Buried Tank (m)			
	3	6	8	10
50	$17.22*10^6$	$28.3*10^5$	$20.1*10^5$	$69.3*10^3$
100	$21.5*10^6$	$40.72*10^5$	$22.6*10^5$	$15.66*10^5$
200	$29*10^6$	$12.9*10^6$	$26.7*10^5$	$21.04*10^5$



شکل ۸. محل سنجش میزان تنش حاصل از انفجار

Fig. 8. The place to measure the amount of stress resulting from the explosion

تنش ایجادشده حاصل از انفجار ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم TNT در مرز قسمت مرکزی سقف مخزن و خاک بالاسری مخزن مدفون شکل (۸) در عمق‌های ۳، ۶، ۸ و ۱۰ متری مطابق جدول (۵) است.

۲-۴- بیشترین جابه‌جایی مجاز پوشش بتنی

با توجه به چگونگی و سرعت انتقال موج انفجار و همچنین مقدار تنشی که در محیط ایجاد می‌کند، امکان بروز خسارت مورد بررسی قرارگرفته است. معیارهای متفاوتی برای محاسبه حد مجاز خسارت و جابه‌جایی مخزن بتنی تحت بار دینامیکی توسط پژوهشگران مختلف ارائه شده است. در این مقاله به منظور به دست آوردن جابه‌جایی مجاز از معیار ساکورایی استفاده‌شده است. ساکورایی برای این مهم کرنش بحرانی رابطه (۶) را پیشنهاد کرده است [23]:

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E} \qquad (۶)$$

که در آن σ_c مقاومت فشاری تک‌محوری و E مدول یانگ برحسب kg/cm^2 است. باید توجه داشت که کرنش بحرانی همیشه کوچک‌تر از کرنش در لحظه شکست است. مقدار کرنش مجاز با استفاده از رابطه (۷) در سه رده سطح هشدار توسط ساکورایی معرفی شد [23].

$$\log \varepsilon_c = -0.25\log E - 0.85 \qquad (۷)$$

پس از محاسبه مقدار کرنش مجاز، بیشترین جابه‌جایی مجاز در مخزن بتنی با استفاده از رابطه (۸) حاصل‌شده است:

$$\varepsilon_c = \frac{u_c}{a} \qquad (۸)$$

u_c جابه‌جایی مجاز و پارامتر a بزرگ‌ترین بعد مخزن بتنی است. در مقاله حاضر با توجه به ضخامت ۶۰۰ میلی‌متری پوشش بتنی مخزن با عیار سیمان (kg/cm^3 ۲۵۰) و با در نظر گرفتن مدول یانگ پوشش بتنی، کرنش بحرانی برابر ۰/۰۰۶۵۶ و بیشترین میزان جابه‌جایی مجاز پوشش بتنی ۵۹/۱۱ میلی‌متر تعیین شد.

۳- بحث و بررسی نتایج

هنگام وقوع انفجار، انرژی به‌طور ناگهانی آزاد می‌شود. تأثیر این آزادسازی انرژی به دو بخش تشعشع حرارتی و انتشار موج در زمین و هوا تقسیم می‌شود. امواج حاصل با سرعتی بالاتر از

سرعت صوت حرکت کرده و به ساختارها برخورد می‌کنند. بررسی نتایج مدل‌سازی عددی انفجار نشان می‌دهد که عبور این امواج از هر نقطه‌ای، حالت تعادل آن نقطه را تغییر می‌دهد [24]. شکل (۹) چگونگی انتشار موج انفجار در محیط را نشان می‌دهد.

عمق مدفون مخزن بتنی به دلیل برخورد امواج به هدف حائز اهمیت است و از طرف دیگر مسافت طی شده موج باعث استهلاک بخشی از انرژی و یا تمام انرژی حاصل از انفجار می‌شود. ازاین‌رو پس از شبیه‌سازی بارهای انفجاری مختلف (۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم)، مقادیر جابه‌جایی سقف و کف مخزن مدفون در عمق‌های مختلف (۳، ۶، ۸ و ۱۲متر) در خاک رسی لای‌دار بررسی شد.

۳-۱- تأثیر عمق مدفون بر میزان جابه جایی‌های ایجادشده در سقف مخزن مدفون

در این مرحله جابه‌جایی پوشش مخزن بتنی از ناحیه سقف تحت بارهای انفجاری ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرمی TNT در عمق‌های ۳، ۶، ۸ و ۱۰ متری بررسی‌شده است. در واقع در این مقایسه ضخامت خاک بالاسری در حدفاصل مرکز سقف و محل انفجار متغیر فرض شده است. مقادیر مختلف ماده منفجره درست در بالای محل قرارگیری تونل اعمال شده است. شکل (۱۰) میزان جابه‌جایی سقف مخزن بتنی مدفون در اعماق مختلف را نشان می‌دهد.

براثر وقوع انفجار موجی تولید می‌شود که موجب ایجاد یک جبهه پرفشار از نقطه انفجار به سمت اطراف می‌شود. این فشار با زیادشدن فاصله از مرکز انفجار مستهلک می‌شود. درواقع ضربه‌ای که خیلی سریع پس از انفجار تولید می‌شود با سرعت بسیار زیادی در محیط گسترش می‌یابد و فشار محیط را به حداکثر فشار انفجار می‌رساند و در کسری از ثانیه تا فشار محیط کاهش می‌یابد، به این مرحله اصطلاحاً فاز مثبت گفته می‌شود. درنتیجه انتشار موج اندکی پس‌ازاینکه فاز مثبت طی می‌شود، گازهای حاصل از انفجار سرد شده و باعث می‌شود که فشار آن‌ها از فشار اتمسفر کمتر شود که این اتفاق باعث ایجاد مکش و به وجود آمدن تنش‌های کششی در محیط خاک رسی لای‌دار می‌شود، به این مرحله فاز منفی گفته می‌شود.

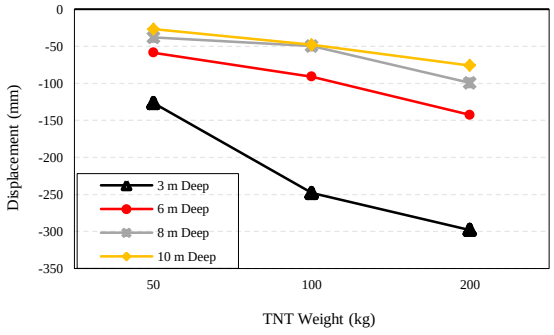
خاک تحت بار انفجاری به صورت غیر خطی و الاستیک پلاستیک رفتار می‌کند. به عبارتی دیگر، خاک در برابر بار انفجاری ابتدا ممکن است به صورت الاستیک رفتار کند، اما با افزایش شدت بار انفجاری، به حالت پلاستیک می‌رود و تغییر شکل‌های دائمی در آن ایجاد می‌شود. در خاک‌های رسی لای‌دار، رفتار ناپایدار و مقاومت برشی پایین این خاک‌ها در برابر بارهای دینامیکی، باعث می‌شود که خاک در برابر انفجارها بیشتر به همگرا شدن و تغییر شکل‌های قابل توجه تمایل داشته باشد، که می‌تواند آثار مهمی بر عملکرد سازه داشته باشد.

نتایج نشان می‌دهد هنگامی‌که مخزن مدفون در عمق ۳ متری تحت بار ۵۰ کیلوگرم TNT قرارگرفته است، نقطه مرکزی سقف مخزن مدفون، ۱۲۶/۵۹ میلی‌متر به سمت پایین جابه‌جا می‌شود. مقدار جابه‌جایی پس از اعمال بار انفجاری ۱۰۰ کیلوگرم TNT، ۲۴۸ میلی‌متر و پس از اعمال بار انفجاری ۲۰۰ کیلوگرم TNT نیز ۲۹۸ میلی‌متر به سمت پایین بوده است.

با توجه به مقدار مجاز کرنش و جابه‌جایی پوشش بتنی مخزن، مخزن بتنی مدفون در عمق ۳ متری از سطح خاک قادر به تحمل بارهای انفجاری ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرمی TNT نبوده است. درواقع با توجه به فاصله انفجار تا عمق قرارگیری بتن، خواص مقاومتی خاک توان مستهلک کردن تنش‌های حاصل از انفجار را ندارند و همین باعث تخریب در ناحیه سقف مخزن مدفون می‌شود.

شکل ۹. چگونگی انتشار موج انفجار در محیط

Fig. 9. How the blast wave propagates in the environment



شکل ۱۰. جابه‌جایی وسط سقف مخزن مدفون در عمق‌های متفاوت

Fig. 10. Moving the middle of the roof of the buried tank at different depths

ارتعاشات ناشی از انفجار نقش مهمی در تخریب سازه‌های زیرزمینی دارند؛ اما حساسیت بالا و مقاومت برشی کم خاک‌های رسی لای‌دار از جمله عواملی هستند که ناپایداری سازه تحت بار انفجاری را تشدید می‌کنند. همچنین، تنش‌های دینامیکی ایجاد شده توسط بارگذاری انفجار ممکن است فشار منفذی در خاک‌های رسی لای‌دار را افزایش دهد، که این امر می‌تواند تا حدی توضیح‌دهنده سازوکار خرابی در این شرایط باشد [25].

هنگامی که مخزن مدفون در عمق ۶ متری تحت بارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم TNT قرارگرفته است، مقدار جابه‌جایی‌ها به ترتیب ۵۸/۶۸، ۹۱/۰۵ و ۱۴۲/۵۶ میلی‌متر به سمت پایین بوده است که از جابه‌جایی مجاز بیشتر است و موجب تخریب در سازه می‌شود. با افزایش عمق مدفون از ۳ متر به ۶ متر، میزان جابه‌جایی سقف مخزن تحت بارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم TNT به ترتیب حدود ۵۳٪، ۶۳٪ و ۵۲٪ کاهش‌یافته است. در واقع با توجه به خاصیت میرایی خاک رسی لای‌دار و تنش ایجاد شده حاصل از انفجار، هر چقدر عمق مدفون مخزن بیشتر می‌شود، مقدار جابه جایی‌ها به شدت کاهش پیدا می‌کند.

در حالتی که مخزن مدفون در عمق ۸ متری تحت بارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم TNT قرارگرفته است، مقدار جابه‌جایی‌ها در سقف مخزن به ترتیب ۳۸/۱۴، ۴۹/۶۷ و ۹۹/۳۸ میلی‌متر به سمت پایین بوده است.

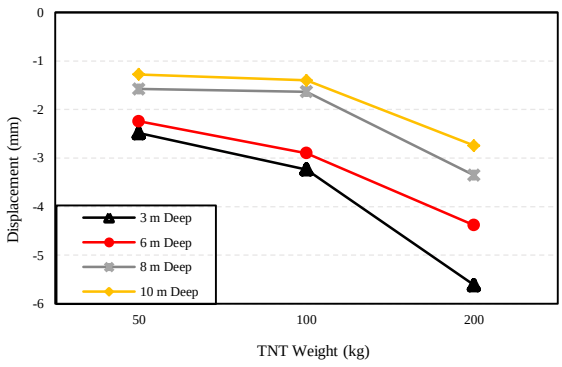
در حالتی که مخزن مدفون در عمق ۱۰ متری تحت بار ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم TNT قرارگرفته است، مقدار جابه‌جایی‌ها به ترتیب ۲۶/۸۷، ۴۷/۹۵ و ۷۵/۸ میلی‌متر به سمت پایین بوده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش عمق مدفون از ۳ متر به ۱۰ متر، میزان جابه جایی سقف مخزن تحت بارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم TNT به ترتیب حدود ۷۹٪، ۸۱٪ و ۷۴٪ کاهش‌یافته است. در واقع، زمانی که عمق مدفون سازه زیرزمینی افزایش می‌یابد، به دلیل میرایی محیط خاک رسی لای‌دار مدت زمان رسیدن موج افزایش می‌یابد، شکل بار اعمال شده بر سازه زیرزمینی از بار نقطه‌ای به بار سطحی تغییر می‌کند و حالت شکست سازه از شکست برشی موضعی به شکست فشاری و خمشی تغییر می‌یابد [26].

تجزیه و تحلیل عددی ارتعاشات انفجار نشان می‌دهد که تقویت ارتعاشات در نزدیکی مرز بین خاک و سازه مدفون رخ می‌دهد، که این امر می‌تواند منجر به افزایش کرنش در خاک‌های رسی لای‌دار شود. ارتعاشات انفجار غالباً باعث ایجاد شکست‌های موضعی در خاک‌های نزدیک به محل انفجار می‌شوند و این ارتعاشات ممکن است در امتداد صفحات بستر خاک رسی لای‌دار انتشار یابند. قابل‌توجه است که خاک رس می‌تواند نامطلوب‌ترین واکنش را به بارگذاری انفجار نشان دهد، زیرا در خاک‌های رسی بزرگ‌ترین دهانه‌های قابل مشاهده برای یک انفجار مشخص شکل می‌گیرد.

۳-۲- تأثیر عمق مدفون بر میزان جابه جایی‌های ایجادشده در کف مخزن مدفون

در این بخش به بررسی میزان جابه‌جایی کف مخزن مدفون تحت بارهای انفجاری ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرمی TNT در اعماق ۳، ۶، ۸ و ۱۰ متری پرداخته شده است. شکل (۱۱) میزان جابه‌جایی کف مخزن بتنی مدفون در اعماق مختلف را نشان می‌دهد. در حالتی که مخزن مدفون در عمق ۳ متری تحت بار ۵۰ کیلوگرم TNT قرارگرفته است، مقدار جابه‌جایی ایجاد شده در کف مخزن ۲/۴۸ میلی‌متر است. مقدار جابه‌جایی پس از اعمال بار انفجاری ۱۰۰ کیلوگرم TNT، ۳/۲۳ میلی‌متر و پس از اعمال بار انفجاری ۲۰۰ کیلوگرم TNT نیز ۵/۶۱ میلی‌متر است.

با افزایش عمق مدفون به ۶ متر، تحت بارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم TNT ، مقدار جابه جایی‌ها در کف مخزن به ترتیب ۲/۲۴، ۲/۸۹ و ۴/۳۸ میلی‌متر است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش عمق مدفون از ۳ متر به ۶ متر، میزان جابه‌جایی کف مخزن تحت بارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم TNT به ترتیب حدود ۱۰٪، ۱۱٪ و ۲۲٪ کاهش‌یافته است.



شکل ۱۱. جابه‌جایی وسط کف مخزن مدفون در اعماق متفاوت

Fig. 11. Moving the middle of the bottom of the buried tank at different depths

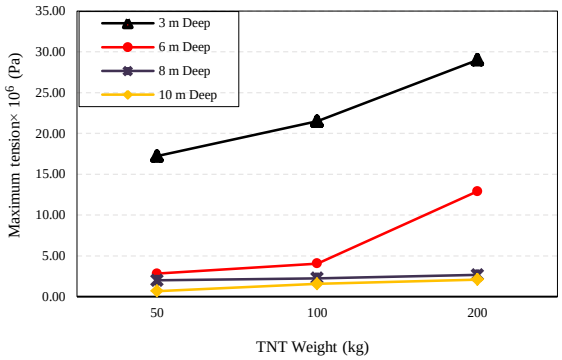
در حالتی که مخزن مدفون در عمق ۸ متری تحت بارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم TNT قرارگرفته است، مقدار جابه‌جایی‌ها در کف مخزن به ترتیب ۱/۵۷، ۱/۶۳ و ۳/۳۵ میلی‌متر است.

در حالتی که مخزن مدفون در عمق ۱۰ متری تحت بار ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم TNT قرارگرفته است، مقدار جابه‌جایی‌ها به ترتیب ۱/۲۸، ۱/۴۰ و ۲/۷۴ میلی‌متر است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش عمق مدفون از ۳ متر به ۱۰ متر، میزان جابه‌جایی کف مخزن تحت بارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم TNT به ترتیب حدود ۴۹٪، ۵۷٪ و ۵۱٪ کاهش‌یافته است.

بحرانی‌ترین و بیشترین رفتار سازه مدفون تحت بار انفجاری در حالتی است که خاک اطراف سازه مدفون از جنس رس و اشباع باشد. خاک رس نرم و شکننده است و تغییر شکل پلاستیک برای خاک رس نرم می‌تواند تحت بارهای ناشی از امواج انفجاری ایجاد شود. بسیاری از مشکلات مهندسی ژئوتکنیک و زمین شناسی در منطقه خاک‌های رسی که در معرض بارهای ارتعاشی مکانیکی، امواج و سایر بارهای چرخه‌ای طولانی مدت قرار دارند، دخیل هستند [27].

هر چه خاک متراکم تر و چسبنده تر باشد، حجم و قطر گودال ایجادشده درون زمین ناشی از انفجار، کمتر است. وجود ریزدانه‌های رسی درون خاک که علت اصلی ایجاد چسبندگی در انواع خاک‌ها است، یک نوع نیروی مقاوم در برابر از هم گسیختگی خاک محسوب می‌شود و انسجام خاک را در هنگام انفجار حفظ می‌کند. در انفجارهای شدید چسبندگی خاک، قطر گودال را کنترل می کند اما وجود چسبندگی در خاک، رفتار حوزه دور آن را دچار تغییر نمی‌کند. تراکم خاک که وابسته به مدول یانگ و چگالی آن است در رفتار حوزه دور خاک در برابر موج انفجار کاملاً تأثیرگذار است. در نظر گرفتن میرایی ذاتی خاک با مدل ویسکوالاستیک می‌تواند سازوکار استهلاک انرژی در پدیده انفجار را که به دلیل وجود حفرات داخل خاک و تغییر شکل‌های ناشی از فاز هوای درون خاک است، به درستی مدل کند [28].

بر اساس نتایج حاصل‌شده هر چه عمق مدفون مخزن بتنی بیشتر شود، میزان جابه‌جایی سقف و کف به شدت کاهش پیدا می‌کند. با توجه به خاصیت میرایی خاک موجود در منطقه، تنش ایجادشده حاصل از انفجار، هر چه مسافت بیشتری برای رسیدن به مخزن بتنی مدفون طی کند از شدت آن به‌طور چشمگیری کاسته می‌شود.



شکل ۱۲. تنش ناشی از انفجار در قسمت بالای سقف مخزن مدفون در عمق‌های متفاوت

Fig. 12. The stress caused by the explosion in the upper part of the roof of the buried tank at different depths

۳-۳- تأثیر عمق مدفون بر میزان تنش‌های ایجادشده در سقف مخزن مدفون

در این مرحله تأثیر عمق مدفون مخزن بر میزان تنش‌های ایجاد شده در سقف مخزن مدفون بررسی شد. یکی دیگر از عوامل تعیین کننده تاثیر مدفون بودن مخزن علاوه بر حداکثر تغییرمکان، تنش های به وجود آمده در مخزن می‌باشد [12]. همان‌طور که در شکل (۱۲) نشان داده شده است، میزان فشار و تنش‌های حاصل از بار انفجاری در اعماق زمین کاهش پیدا می‌کند که نشان دهنده روند استهلاک انرژی انفجار به وسیله خاک رسی لای‌دار است. درواقع هرچقدر فاصله قائم محل انفجار نسبت به محور مرکزی مخزن مدفون بیشتر شود، مقدار تنش و در نتیجه جابه‌جایی به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد.

بر اساس نتایج حاصل شده میزان تنش ایجاد شده به دلیل انفجار ۵۰ کیلوگرم TNT در عمق ۳ متر برابر $۱۷/۲۲\times۱۰^{۶}$ Pa است، در حالی که با افزایش عمق به ۶ متر این مقدار کاهش قابل توجهی داشته و به $۲۸/۳\times۱۰^{۵}$ Pa رسیده است. شایان ذکر است که با افزایش عمق به ۸ و ۱۰ متر روند کاهش تنش ناشی از انفجار ۵۰ کیلوگرم TNT بسیار کند شده است. برای ۲۰۰ کیلوگرم ماده منفجره TNT مقدار تنش برای اعماق مدفون ۳، ۶، ۸ و ۱۰ متر به ترتیب ۲۹×۱۰^{۶} Pa، $۱۲/۹\times۱۰^{۶}$ Pa، $۲۶/۷\times۱۰^{۵}$ Pa و $۲۱/۰۴\times۱۰^{۵}$ Pa است، همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش عمق مدفون از ۸ به ۱۰ متر مقدار کاهش تنش قابل توجه نیست.

تنش حداکثری با افزایش عمق دفن از ۳ متر به ۶ متر به طور متوسط ۷۳ درصد کاهش پیدا می‌کند. به همین ترتیب افزایش عمق

مدفون از ۶ متر به ۸ متر باعث ۵۰ درصد کاهش و افزایش عمق از ۸ متر به ۱۰ متر ۳۹ درصد تنش حداکثری را کاهش می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود میزان درصد کاهش تنش با افزایش عمق کم می‌شود با توجه به جنس رسی لای‌دار و مشخصات مکانیکی خاک در اعماق زیاد به دلیل افزایش فشار خاک حاصل از وزن خاک بالاسری و همچنین متراکم‌تر بودن ذرات خاک، انتقال انرژی‌های باقی‌مانده حاصل از موج انفجار بهتر صورت می‌گیرد. به بیان دیگر در اعماق زیاد درصد اختلاف افت تنش‌های حداکثری کمتر می‌شود.

با افزایش قدرت انفجار، میزان تنش وارد شده بر سازه مدفون افزایش ناگهانی داشته که منجر به ایجاد لرزش در سازه مدفون می‌شود. بیشترین تمرکز تنش در ناحیه‌های نزدیک به محل انفجار بوده و کرنش‌های خمیری که منجر به آسیب رسیدن به پوشش بدنه مخزن مدفون می‌شود، در همین ناحیه رخ می‌دهد [23-12].

به طور کلی فشار وارد بر پوشش مخزن بتنی مدفون با افزایش وزن مواد منفجره افزایش می‌یابد ولی با افزایش عمق مدفون به دلیل استهلاک انژری انفجار کاهش می‌یابد. در اثر انفجار پوشش مخزن مدفون و خاک اطراف آن دچار تغییر شکل قابل توجهی می شوند. با افزایش عمق مدفون به دلیل کاهش تنش، تغییر شکل پوشش مخزن مدفون کاهش می‌یابد.

همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود جابه‌جایی قائم وسط سقف مخزن با توجه به کاهش تنش‌های حاصل از انفجار با افزایش عمق دفن کاهش‌یافته است. به دنبال آن احتمال تخریب سازه هم با افزایش عمق دفن کاهش پیداکرده است. بر این اساس با افزایش عمق مدفون برای احداث سازه‌های زیرزمینی به نتایج بهتری از میزان جابه‌جایی و تنش‌های ایجادشده می‌توان دست پیدا کرد.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت سازه‌های مدفون و وجه تمایز آن‌ها به خاطر اندرکنش خاک و سازه نسبت به حالت سطحی، در این تحقیق رفتار مخزن مدفون در خاک رسی لای دار تحت تأثیر بار انفجاری با استفاده از نرم‌افزار FLAC 2D مورد بررسی قرارگرفته است. برای این منظور مخزن بتنی نیمه پر مدفون در عمق‌های متفاوت (۳، ۶، ۸ و ۱۰ متری) با هندسه مستطیلی مدل‌سازی شده است. برای بررسی تأثیر بار انفجار از ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم ماده منفجره TNT در این پژوهش استفاده شده است. در این مطالعه به بررسی تأثیر وزن‌های مختلف مواد منفجرهTNT و عمق قرارگیری سازه زیرزمینی بر جابه‌جایی سقف و کف مخزن بتنی پرداخته شد. برخی از مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش به شرح ذیل است:

۱- تأثیر انفجار روی هر سازه‌ای به وزن و اندازه ماده منفجره بستگی دارد. علاوه بر این، پارامترهای محیط اطراف بر پاسخ‌ها تأثیر دارند. عمق مدفون سازه زیرزمینی، اندرکنش خاک و سازه زیرزمینی، خواص فیزیکی و مکانیکی خاک، وزن ماده منفجره، مقدار میرایی انرژی در اعماق مختلف، ازجمله عوامل مؤثر بر فشار انفجاری برسازه زیرزمینی است.

۲- با افزایش عمق دفن مخزن، میزان جابه‌جایی سقف و کف به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. برای نمونه، تحت بار انفجاری ۵۰ کیلوگرمTNT ، جابه جایی سقف مخزن از ۱۲۶/۵۹ در عمق ۳ متر به ۲۶/۸۶ میلی‌متر در عمق ۱۰ متر کاهش یافته است که نشان‌دهنده کاهش ۷۸ درصدی جابه‌جایی است.

۳- میزان تنش ایجادشده در خاک در اعماق زیرین خاک کاهش‌یافته است که این نشان‌دهنده مستهلک شدن انرژی انفجار در خاک است. با توجه به اینکه در اعماق زیرین به دلیل فشار حاصل از وزن خاک بالاسری خاک ساختاری فشرده‌تر و متراکم‌تر دارد، می‌تواند امواج حاصل از انفجار را با سرعت بیشتری از خود عبور دهد و همین امر باعث تسریع روند استهلاک امواج و درنتیجه آن کاهش خسارات وارد شده به سازه مدفون را به دنبال داشته باشد.

۴- رفتار غیرخطی و الاستیک-پلاستیک خاک رسی لای‌دار نقش مهمی در کاهش دامنه جابه جایی‌ها و استهلاک انرژی انفجار دارد. این خاک به دلیل چسبندگی و تراکم بالاتر، اثر قابل توجهی بر کاهش جابه جایی و تنش‌های سازه مدفون در اعماق مختلف نشان داده است.

۵- با افزایش بار دینامیکی، سیستم خاک-سازه تعبیه شده در خاک رسی لای‌دار به صورت غیر خطی رفتار می کند که منجر به کاهش سختی و افزایش میرایی می شود. بیشترین دامنه جابه‌جایی تحت بار دینامیکی کاهش می‌یابد که عمدتاً به دلیل

میرایی هیسترتیک بالا ناشی از رفتار غیرخطی خاک‌های رسی لای‌دار است .

۶- افزایش عمق دفن به عنوان یک راهکار مهندسی مؤثر باعث بهبود عملکرد سازه‌های مدفون در برابر انفجار می‌شود. این نتایج می‌توانند به طراحی ایمن‌تر سازه‌های زیرزمینی، نظیر مخازن، تونل‌ها و پناهگاه‌ها، در شرایط بارگذاری انفجاری کمک کنند و راهنمایی برای انتخاب عمق دفن بهینه در پروژه‌های مهندسی باشند.

مشارکت نویسندگان

تمامی نویسندگان به یک اندازه در این تحقیق مشارکت داشتند.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ نوع تعارض منافعی وجود ندارد.

قدردانی

نویسندگان مراتب قدردانی خود را از داوران این تحقیق اعلام می دارند. نظرات سازنده آنها سبب بهبود کیفی تحقیق شد.

منابع مالی

این تحقیق بدون دریافت حمایت مالی از سوی مرکز و یا دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندرعباس صورت گرفت.

References

[1] Peyman, S. and Eskandari, A., 2023. Analytical and numerical study of concrete slabs reinforced by steel rebars and perforated steel plates under blast loading. *Results in Engineering*, 19, p.101319.

[2] Fan, Y., Tan, Z., Yang, G., Cui, X., Deng, K. and Tian, B., 2024. Analysis of dynamic behavior and damage mode of shallow buried tunnel due to underwater explosions. *Ocean Engineering*, 296, p.117015.

[3] Kostopoulos, V., Kalimeris, G.D. and Giannaros, E., 2022. Blast protection of steel reinforced concrete structures using composite foam-core sacrificial cladding. *Composites Science and Technology*, 230, p.109330.

[4] Olarewaju, A.J., Kameswara, R.N.S.V. and Mannan, M.A., 2012. Response of underground pipes to blast loads. In: M. Abbas, ed. *Earthquake-Resistant Structures*. Rijeka: IntechOpen, Ch. 20.

[5] Amiri, M., Ameri Siahouri, M., Ghasemi, S. and Salehian, R., 2021. Investigation of the effect of tunnel excavation on the surrounding structures with a superior attitude on the heights and widths of the structures (Case study: Isfahan's Metro Tunnel). *Journal of Tunneling and Underground Space Engineering*, 10(1), pp.57–69. (In Persian).

[6] Zheng, Q., Xu, Q., Shu, Z., Yang, D., Chen, W., Akkurt, N. et al., 2023. A review of advances in mechanical behaviors of the underground energy transmission pipeline network under loads. *Gas Science and Engineering*, 117, p.205074.

[7] Ye, W., Zhou, Z., Bai, Y., Wu, Y. and Chen, Y., 2024. Dynamic response and damage of subway tunnels subjected to explosion-induced loads. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.1–7.

[8] Amiri, M. and Dousti, H., 2021. Evaluation of the effects of soil improvement using injection technique on the values of displacement and damages inflicted on the buried structure subjected to the propagation of explosion waves (A case study of Isfahan subway tunnel, Soffeh-Azadi route). *Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)*, 10(4), pp.435–452.

[9] Hatef, N. and Rahimi, B., 2002. Behavior of Shiraz layered clay under alternating simple shear load. *Modares Technical and Engineering*, 8, pp.11–23.

[10] Gui, M. and Chien, M., 2006. Blast-resistant analysis for a tunnel passing beneath Taipei Shongsan airport–a parametric study. *Geotechnical & Geological Engineering*, 24, pp.227–248.

[11] Nader, Q. and Shanai, M., 2014. Reinforcement of concrete water tanks by FRP reinforced polymer fibers. In: *8th National Congress of Civil Engineering*. Tehran, Iran.

[12] Frost, N., Taghipur Birgani, M. and Frost, A., 2015. An overview of the studies done on buried storage tanks. In: *International Conference of New Achievements in Civil Engineering, Architecture, Environment and Urban Management*. Tehran, Iran.

[13] Taghavi Parsa, M.H., 2020. Analysis of explosive loading on underground structures under surface explosions. *Modares Civil Engineering Journal*, 19(6), pp.31–39.

[14] Osmi, S.K.C., Othman, M., Husen, H., Jelani, J. and Sojipto, S., 2023. Blast response of underground structures subjected to external explosion – a review. *Zulfaqar Journal of Defence Science, Engineering & Technology*, 6(1).

[15] Zhou, L., Li, X., Yan, Q., Li, S., Chang, S. and Ren, P., 2024. Test and damage assessment of shallow buried RC tunnel under explosion. *Underground Space*, 14, pp.118–137.

[16] Amiri, M. and Mohammad, D.H., 2022. The effect of

soil layering on the propagation of waves from surface explosions on buried tunnels (Case study of Isfahan metro tunnel, Sefeh-Azadi route). *Journal of Tunneling and Underground Space Engineering*, 10(3), pp.311–331. (In Persian).

[17] ASTM D854, 1999. *Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

[18] ASTM D3080, 2011. *Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

[19] Landau, L.D. and Lifshitz, E.M., 1970. *Theory of Elasticity*. (Course of Theoretical Physics, Vol. 7). Oxford: Pergamon Press.

[20] Program and Budget Organization, 1992. *Rules and criteria for the design and calculation of underground water reservoirs (Publication No. 123)*. Tehran: PBO.

[21] Rashiddel, A., Kharghani, M., Dias, D. and Hajihassani, M., 2020. Numerical study of the segmental tunnel lining behavior under a surface explosion – Impact of the longitudinal joints shape. *Computers and Geotechnics*, 128, p.103822.

[22] Itasca Consulting Group, 2019. *FLAC 2D User Manual, Version 8.10*. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc.

[23] Sakurai, S., 1997. Lessons learned from field measurements in tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 12(4), pp.453–460.

[24] Olarewaju, A., Mannan, M. and Kameswara, R., 2012. *Response of Underground Pipes to Blast Loads*. Rijeka: IntechOpen.

[25] Bouchard, S., L'Heureux, J.S., Johansson, J., Leroueil, S. and LeBoeuf, D., 2018. Blasting induced landslides in sensitive clays. In: *Landslides and Engineered Slopes: Experience, Theory and Practice*. London: CRC Press, pp.497–504.

[26] Xin, B., Shutao, L., Jingbo, L., Fei, W., Yeqing, C., Longming, C. and Qing, Z., 2023. Experimental study of deep-burial underground structures subjected to multiple 45° side–top far-field explosions. *International Journal of Impact Engineering*, 173, p.104432.

[27] Deng, Q.L. and Ren, X.W., 2017. An energy method for deformation behavior of soft clay under cyclic loads based on dynamic response analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 94, pp.75–82.

[28] Hosseini, S.A. and Hosseini, N., 2018. Numerical modeling of underground explosion and response of buried structures using coupled Eulerian-Lagrangian method. *Journal of Advanced Defense Science and Technology*, 9(3), pp.325–336.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Amiri, M., Dalvand, M. and Karimi, H., 2026. Investigating the Effect of Buried Depth of Concrete Tanks under Explosive Load in Layered Clay Soils, *Modares Civil Engineering journal*, 26(1). doi: 10.48311/mcej.2025.27809