



بررسی تاثیر اندرکنش سازه - سیال - خاک در مخازن بتنی مسلح مدفون تحت اثر بار ناشی از انفجار سطحی

امیرعلی عرب بافرانی^{۱*}، دکتر قاسم دهقانی اشکذری^۲، فرزاد پیچکاه^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد؛ دانشکده عمران، سازه های هیدرولیکی، دانشگاه آزاد اسلامی رودهن، amiraliarab2000@yahoo.com

۲- استادیار؛ مجتمع دانشگاهی آمایش و پدافند غیرعامل - سازه، دکتری مهندسی عمران و سازه، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۳- دانشجوی دکتری عمران - سازه، دانشگاه صنعتی شاهرود

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۳/۰۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۶/۲۱

چکیده

در طراحی سازه‌ها و بررسی پاسخ‌های آنها به بارهای دینامیکی و در حالتیکه سازه با محیط خاک در ارتباط است، اثرات متقابل خاک و سازه بریکدیگر می‌بایست در نظر گرفته شود. میزان تأثیر اندرکنش خاک و سازه، به مشخصات آنها و نیز فرکانس‌های بارگذاری بستگی خواهد داشت. لحاظ نمودن اثر اندرکنش بستگی به اهمیت سازه دارد و در طراحی پروژه‌های مهم همانند مخازن ذخیره، این اثر بر پاسخ سیستم لحاظ می‌شود. در طراحی مخازن علاوه بر سازه مخزن، سیال داخل آن نیز جرم عمده‌ای داشته و در بارگذاری‌ها نقش عمده‌ای را ایفا می‌کند. در این مورد نیز می‌بایست اثرات اندرکنش سیال و سازه لحاظ گردد. در این مقاله تأثیر اندرکنش خاک-سازه-سیال بر پاسخ مخزن بتنی مسلح، تحت بار انفجار بررسی گردیده است. برای بررسی اثر نوع خاک در اندرکنش خاک و سازه تحت بار زلزله، دو نوع خاک نرم و سخت و برای بررسی اثر نوع سیال، دو نوع سیال شامل آب و نفت مورد ارزیابی قرار گرفته و در نهایت با استفاده از نرم‌افزار آباکوس نسبت به شبیه‌سازی مدل اقدام گردیده است.

واژگان کلیدی

اندرکنش سیال، سازه، خاک
مخزن بتنی
مسلح
مدفون
بارانفجار سطحی

۱- مقدمه

از جمله تأسیسات مهم در یک کشور می‌توان به مخازن زیرزمینی سیالات اشاره نمود که می‌بایست در برابر آسیب‌های گوناگون از ایمنی لازم برخوردار باشند. مخازن زیرزمینی عمدتاً برای ذخیره آب و فرآورده‌های نفتی استفاده می‌گردد. استفاده از مخازن فلزی بطور گسترده در ایران و سایر نقاط جهان، رایج بوده لیکن پیشرفت سازه‌های بتنی در سال‌های اخیر ضرورت مطالعه در مورد این سازه‌ها را اجتناب ناپذیر نموده است. طراحی مخازن زیرزمینی ایمن در برابر بلایای طبیعی (مانند زلزله) و غیرطبیعی (مانند انفجار) از اهمیت بسیار زیادی برخوردار می‌باشد. تحلیل و طراحی اینگونه سازه‌ها، نه تنها برای بارهای متعارف انجام می‌پذیرد، بلکه مقاومت سازه در برابر بارهای ناشی از انفجار نیز باید

ارزیابی گردد. شکست سازه مخازن در نتیجه وقوع انفجار، علاوه بر زیان‌های اقتصادی، ممکن است عواقبی همچون قطع آب و یا نشت مواد سمی را به همراه داشته باشد. لذا بررسی مخازن بتنی مسلح مدفون تحت اثر بار ناشی از انفجار سطحی بسیار مفید می‌تواند باشد.

۲- تاریخچه‌ی طراحی و ساخت مخازن بتنی مسلح

در سالیان گذشته بسیاری از محققین اقدام به تحلیل و بررسی تأثیرات زلزله بر روی مخازن نموده‌اند. یاکوبسن از جمله اولین محققینی است که مطالعات گسترده‌ای بر روی رفتار دینامیکی مخازن آب انجام داده است (سال ۱۹۴۹) [۱]. پس از وی هاووزنر تحقیقات وسیعی در زمینه پدیدآوری مدل

خواص نیمه بینهایت خاک است، می‌توان به جنبه‌های مهم این آنالیز پی برد. آنالیزهای دینامیکی در دو فضای زمانی و فرکانسی قابل انجام است که در حوزه‌ی زمانی، زمان به عنوان یک پارامتر وابسته در محاسبات وارد می‌شود. از محدودیت‌های حوزه‌ی فرکانسی می‌توان به عدم در نظر گرفتن رفتار غیرخطی برای سیستم خاک و سازه اشاره نمود.

ایده‌ی ساخت مخازن بتنی برای اولین بار در توکیو و در سال ۱۹۱۴ مطرح شد [۱۰]. در خلال جنگ جهانی دوم ایالات متحده برای ذخیره سازی سوخت کشتی‌های خود، اقدام به ساخت اینگونه مخازن کرد. بین سال‌های ۱۹۴۰ تا ۱۹۶۳، تقریباً ۲۱۰ مخزن بتنی برای ذخیره نفت و سایر فرآورده‌های آن ساخته شد [۳]. در طرح اولیه‌ی ساخت مخازن بتنی عامل بازدارنده نشتی نفت بود، لکن با توسعه اختراعات نوین مهندسی در خصوص پوشش‌ها و سیستم‌های داخلی مخازن به همراه استفاده از روش‌های پیش تنیده و پس‌تنیده این مشکل برطرف گردید.

پژوهش‌های بین‌المللی درباره مخازن به سال ۱۹۲۰ بر می‌گردد. بویژه دانشگاه شفیلد از ابتدای دهه هفتاد میلادی تحقیقات گسترده‌ای در رابطه با تاثیرات جانبی نفت و مواد شیمیایی محلول در بتن آغاز نمود [۱۱]. تکامل سازه‌های مخازن بتنی در دوره کوتاه ۱۲ الی ۱۵ سال انجام شده است. ساخت مخازن بتنی برای ذخیره‌ی نفت خام و مشتقات آن در کشورهای بزرگ صنعتی و کشورهای ساحلی خلیج فارس، با احجام مختلف انجام شده است. در اتحاد جماهیر شوروی سابق طراحی این مخازن با ظرفیت‌های ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ مترمکعب انجام شد و آیین نامه خاصی توسط انستیتو Soyuzvodo Kanal Proekt برای طراحی اینگونه مخازن تدوین شده است [۱۲].

اساس سازه مخازن بتنی را می‌توان در سه گروه اصلی طبقه‌بندی نمود:

۱. مخازن بتنی مسلح عادی
 ۲. مخازن سیلندری که از قطعات پیش‌ساخته شده بتن مسلح ساخته شده است و دیواره‌های مخازن، پیش‌تنیده و کف و پوشش مخازن، عادی بودند.
 ۳. مخازن سیلندری که از قطعات پیش‌ساخته شده بتن مسلح ساخته شده است و کلیه سازه‌ها و اتصالات بین آنها پیش‌تنیده‌اند.
- در مخازن مستطیلی که از قطعات پیش‌تنیده نبودند، بروز ترک در اتصالات پیش‌ساخته مجاز بود، لذا عایق بودن این مخازن نسبت به مخازن نوع گروه دوم کمتر می‌باشد. دیواره‌های پیش‌ساخته مخازن سیلندری در جهت دایره‌ای پیش‌تنیده هستند و در اتصالات ترک ندارند، به همین دلیل از مخازن گروه اول عایق‌ترند. کلیه اجزاء مخازن گروه سوم (کف، دیوارها، سقف و اتصالات بین آنها) از قبل پیش‌تنیده

دینامیکی ساده‌ای برای مخازن، تحت مسئله اندرکنش خاک برای انواع سازه‌های مستطیلی و استوانه‌ای انجام داد [۲]. بررسی بار دینامیکی از سال ۱۹۶۰ در طراحی پی‌های مستطیلی مطرح شد. پیش از آن نیز پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه‌ی آنالیز رفتار دینامیکی سازه‌ها انجام گرفته بود [۳]. در این آنالیزها پاسخ سازه با در نظر گرفتن درجات آزادی وقتی اثر زلزله مستقیم بر آن اعمال می‌شود، با استفاده از معادلات حرکت سازه بدست می‌آید، اما در حالتی که اطراف سازه خاک داشته باشیم، اثر زلزله به خاک وارد شده و مستقیماً به سازه وارد نمی‌شود. در این حالات روشن شد که رفتار سازه از تغییرات دینامیکی سیستم پی، فنداسیون، تاثیر می‌پذیرد که این تاثیر پایه گذار رویکردی نوین تحت عنوان اندرکنش خاک و سازه در بررسی رفتار دینامیکی سازه‌ها نامیده شد [۳].

در سال ۱۹۶۰ لایزمر تئوری استفاده از مرزهای جاذب ویسکوز را در اطراف محیط محدود برای مدلسازی نیمه بینهایت جهت تحلیل مخازن مطرح نمود [۴]. مشکل اصلی نظریه مرزهای جاذب محدودیت در تحلیل حوزه‌ی فرکانسی بود. این مسئله سبب گردید لایزمر تحقیقات خود را در زمینه‌ی مرزهای جاذب ادامه داده و در سال‌های ۱۹۶۹ (لایزمر و کوهلمیر) و ۱۹۷۲ (لایزمر و لاس) مدل‌های تکمیلی دیگری بر مبنای تئوری مرزهای جاذب ارائه نماید [۴ و ۳].

در سال ۱۹۹۹ هارون، مطالعات هاوژنر را برای مخازن انعطاف‌پذیر گسترش داد و مدلی تجربی با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه ارائه نمود. وی با انجام آزمایش‌های متعدد توانست به مدلی دست یابد که پاسخ تلاطم سطح آب نیز در آن دیده شود [۵]. هارون مجموعه اطلاعات ارزشمندی در زمینه‌ی اندرکنش خاک و سازه مربوط به محققین سابق و آزمایشات خود را جمع‌آوری کرد. این تحقیقات سبب گردید اثر اندرکنش خاک و سازه به موضوعی اساسی در علم زلزله تبدیل شود.

مناسب‌ترین روش تحلیل دینامیکی سازه‌ها با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه، برپایه روش اجزاء محدود می‌باشد. روش اجزای محدود از پرکاربردترین روش‌های عددی در تحلیل سازه هاست که اثرات غیرخطی از نظر مادی یا هندسی را در بر می‌گیرد [۵].

در برخورد با مسئله‌ی اندرکنش یکی از موضوعات مهم، مدلسازی محیط نیمه بینهایت خاک است. آنالیز اندرکنش زمانی به واقعیت نزدیک‌تر است که فضای خاک به اندازه کافی بزرگ باشد. این کار بسیار وقت‌گیر بوده و هزینه زیادی دارد. با انتخاب یکی از دو روش مستقیم و زیرسازه، محیط خاک توسط مرزی به نام کران اندرکنش محدود شده و با انتخاب شرایط مرزی مناسب، که در برگیرنده

که با جایگذاری در معادلات بالا خواهیم داشت :

$$\nabla^2 \varphi - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

φ تابع پتانسیل =

۲-۱-۲- قانون حرکت

حال یک المان از سیال به ابعاد Δx ، Δy و Δz در نظر گرفته می‌شود. با توجه به قانون بقای جرم داریم:

$$\sum F = \rho(\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z) \cdot a \quad (8)$$

با صرف نظر کردن از ویسکوزیته سیال این فرمول به معادله اوپلر تبدیل می‌شود.

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} = \rho g - \nabla P \quad (9)$$

$$\rho \left[\left(\frac{\partial V}{\partial t} \right) + (V \cdot \nabla) V \right] = \rho g - \nabla p \quad (10)$$

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} = \rho g - \nabla P \quad (11)$$

با انتگرال گیری از رابطه بالا خواهیم داشت:

$$-\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \rho g(Z - H) = \rho \quad (12)$$

که در آن:

$$Ps = \rho g(H - Z) \quad (13)$$

$$Pd = \rho \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (14)$$

Ps و فشار استاتیکی Pd فشار دینامیکی

حال فرض می‌شود که مایع تراکم پذیر خطی است در زمان $\Delta t = t - t_0$ داریم:

$$\Delta Pd = -k \varepsilon_v \quad (15)$$

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = -\frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (16)$$

k مدول بالک ε_v حجمی کرنش

در رابطه فوق m ، ρ_0 ، V_0 ، حجم اولیه و چگالی اولیه و جرم هستند.

$$\Delta Pd = \frac{k}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (17)$$

سرعت انتشار موج در سیال از رابطه $c = \sqrt{\frac{k}{\rho}}$

بوده و ترکی در آنها مشاهده نمی‌شود که این امر عایق بودن سازه را به طور کامل تضمین می‌کند.

امروزه مخازن در دو گروه زیرزمینی و روزمینی و با اشکال هندسی گوناگون از بتن مسلح پیش‌تنیده و تا ظرفیت ۵۰'۰۰۰ مترمکعب طراحی شده است. این مخازن می‌توانند دارای سقف شناور فولادی یا سقف ثابت بتن مسلح باشند.

۲-۱-۱- اندرکنش سیال و سازه [۱۴]

برای مطالعه تحلیلی فشار هیدرودینامیکی ناشی از ارتعاش مایع فرضیات اولیه زیر بکار می‌رود:

- ✓ مایع ایده‌آل و همگن فرض می‌شود.
- ✓ دامنه امواج کوچک فرض می‌شوند.
- ✓ عدد رینولدز کوچک فرض می‌شود (از آشفتگی صرف نظر می‌شود).
- ✓ میدان سیال غیرچرخشی است و کاویتاسیون رخ نمی‌دهد.

با توجه به فرضیات بالا معادلات هیدرودینامیکی برای محیط سیال در حالت کلی به دو قانون بقای جرم و قانون بقای حرکت تقسیم می‌شود.

۲-۱-۱-۱- قانون بقای جرم (رابطه پیوستگی)

قانون بقای جرم در یک حجم کنترل به ابعاد dx, dy, dz در محیط سیال و با در نظر گرفتن میزان تغییرات موجود در این حجم و اعمال چگالی سیال و مؤلفه‌های سرعت سیال به همراه ساده‌سازی معادلات زیر که معادله بقای جرم در سیالات تراکم پذیر است و با فرض همگن بودن سیال، بدین صورت خواهد بود:

$$\frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(V_z)}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

همچنین با فرض غیر چرخشی بودن سیال، تابع پتانسیل آن بصورت زیر ارائه می‌شود.

$$V = -\nabla \varphi \quad (3)$$

$$u = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (4)$$

$$v = -\frac{\partial \varphi}{\partial y} \quad (5)$$

$$w = -\frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (6)$$

مدلسازی نامحدود محیط می‌کند. چنانچه نیرو و تغییر مکان بر روی مرز نامحدود $U(x,t)$ و $P(x,t)$ باشند:

$$\frac{P(x,t)}{U(x,t)} = K(x,t) \quad (21)$$

که $K(x,t)$ سختی دینامیکی می‌باشد و هدف از بررسی اندرکنش خاک - سازه بدست آوردن تابع سختی و تعیین شکل حرکت امواج در مرز مشترک خاک و سازه می‌باشد.

۲-۳- بارگذاری انفجاری بر اساس UFC3-340-02 [۸]

در فعل و انفعال انفجار ماده شیمیایی، مقادیر زیادی انرژی بصورت گرما و فشار در مدت زمان بسیار کوتاه آزاد می‌شود. تولید و انبساط گازهای داغ در این فرایند باعث تشکیل لایه‌ای از هوای فشرده خواهد شد که آن را موج انفجار می‌نامند. این موج در حین گسترش، ضربه شدیدی ایجاد می‌کند که موجب تخریب سازه‌هایی که در مسیر انفجارند می‌شود. مقدار این فشار با فاصله از منبع انفجار کاهش می‌یابد. در این بخش نحوه‌ی محاسبه بارگذاری ناشی از موج انفجار سطحی بر روی سازه‌های زیرزمینی بررسی خواهد گردید.

عوامل تاثیرگذار بر بزرگی و نحوه‌ی توزیع بار انفجار بر روی سازه عبارتند از:

- ✓ خواص ماده منفجره
- ✓ موقعیت انفجار نسبت به سازه
- ✓ تقویت و افزایش بزرگی فشار انفجار به علت اندرکنش موج فشار با زمین و خود سازه

۲-۴-۱- آثار اصلی انفجار در طراحی سازه‌های امن

آثار اصلی انفجار در طراحی سازه‌ها، تغییر شکل‌ها و حرکات اعضای سازه‌ای مثل دیوارهای خارجی و سقف، ترکش‌های اولیه و ثانویه و حرکات اصلی سازه ناشی از موج انفجار انتقالی به سازه، از طریق زمین و هوا می‌باشد. مطابق UFC، معمولاً اضافه فشار انفجار فاکتور اصلی در تعیین پاسخ و طراحی اعضای بیرونی سازه می‌باشد.

بارهای شوک موجب حرکت کلی سازه نیز می‌شوند و شامل دو بخش زیر هستند:

۱. موج انفجار منتقل شده از طریق هوا به سازه که باعث حرکت کلی سازه نسبت به زمین و بلعکس می‌شود.
۲. موج انفجار منتقل شده از طریق زمین به سازه که باعث حرکت ارتعاشی زمین زیر سازه می‌شود.

بدست می‌آید.

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial P_d}{\partial t} \quad (18)$$

با جایگذاری معادله فشار هیدرودینامیکی در رابطه بالا، داریم:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \quad (19)$$

با جانمایی در رابطه پیوستگی داریم:

$$\nabla^2 \varphi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0 \quad (20)$$

که به معادله هلمهولتز معروف است. این معادله پایه ارتعاش در سیال تراکم‌ناپذیر می‌باشد. در صورتیکه سیال تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شود معادله به شکل معادله لاپلاس در می‌آید.

۲-۱-۳- مشخصات مصالح

مشخصات مصالح در جداول ۱ تا ۳ آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات سیالات

سیال	چگالی kg/m ³	مدول بالک kg/m ²	لزجت kg.s/m ²
آب	۱۰۰۰	۲/۱۵۸	۰/۰۰۰۱۱۵
نفت	۸۶۰	۱/۵۵۵۸	۰/۰۰۰۸۱

جدول ۲: مشخصات میلگرد

چگالی kg/m ³	مدول الاستیسیته kg/m ²	نسبت پواسون	تنش تسلیم kg/m ²	تنش نهایی kg/m ²
۷۸۵۰	۲/۱۵۱۰	۰/۳	۶۰۰۰	۶۷۰۰

جدول ۳: مشخصات خاک

نوع خاک	مدول الاستیسیته Kg/m ²	نسبت پواسون	زاویه اصطکاک داخلی	زاویه اتساع	چگالی Kg/m ³
سخت	۵/۲۵۶	۰/۴۵	۲۴	۰	۱۹۲۰
نرم	۹/۲۵۸	۰/۲۲	۴۵	۴۰	۲۲۵۰

مشخصات بتن بر اساس بتن رده C50 می‌باشد.

۲-۲- تئوری اندرکنش [۱۴]

مسئله اندرکنش یک مسئله مقدار مرزی است که باید شرط تشعشع را ارضاء کند. این شرط، طراح را ملزم به

چاله های انفجاری بدست آورد:

$$D = 0.51W^{\frac{1}{3}} \pm 5\% \quad (24)$$

$$D = 0.65W^{\frac{1}{3}} \pm 5\% \quad (25)$$

D قطر گودال (متر)
 W وزن ماده منفجره (کیلوگرم)

۲-۵- بتن [۱۵]

از آنجایی که خواص اولیه بتن در محاسبات مهندسی و مدلسازی عددی نقش اساسی دارد، در این قسمت برخی از مشخصات بتن ارائه گردیده است:

$$fc = 20 \sim 60 MP \quad (26)$$

$$Ec = 5000 \sqrt{fc} \quad (27)$$

$$\nu = 0.15 \sim 0.3 \quad (28)$$

fc مقاومت فشاری بتن، Ec مدول الاستیسیته بتن و ν نسبت پواسون می باشد. علاوه بر موارد فوق مقاومت کششی بتن نیز که نقش عمده ای در کنترل گسترش و توسعه ای عرض ترک های ایجاد شده در بتن بخصوص در خلال بارگذاری دینامیکی دارد، مورد بررسی قرار می گیرد.

$$fct = 0.55 \sqrt{fc} \quad (29)$$

۲-۵-۱- بتن آسیب دیده پلاستیک

در این تحقیق جهت پیش بینی رفتار غیرخطی بتن و در نظر گرفتن آثار کاهش مقاومت بتن ناشی از خرابی، از مدل بتن آسیب دیده استفاده می شود. این مدل برای اولین بار توسط لوبیلنر در سال ۱۹۸۹ ارائه گردید که تمامی حالات آسیب را توسط یک متغیر اسکالر به نام خسارت بیان می نمود. فنوز و لی در سال ۱۹۹۸ با توسعه مدل لوبیلنر و تعریف خسارت فشاری و کششی مدل کاملتری را جهت تامین به بارهای چرخه ارائه کردند. این مدل جهت شبیه سازی بتن و سایر بخش های شبه شکننده در سازه ها (تیر، خرپا، پوسته و ...) تعبیه شده است. این مدل قادر به مدل سازی بارگذاری های دلخواه مانند بارگذاری چرخه ای بوده و کاهش سختی الاستیک با در نظر گرفتن کرنش پلاستیک در فشار و کشش توجیه می شود. این مدل برای بتن در حالت آسیب دیده مدل پوسته ای و براساس رفتار پلاستیک بوده و دو مکانیزم اصلی خرابی در این مدل،

۲-۴-۲- معادل سازی با TNT معادل

روابط محاسبه مشخصات انفجار در مرجع UFC بر اساس TNT خالص به شکل کروی بدست آمده است. استفاده از این روابط برای مواد منفجره معادل با شکل کروی استفاده می شود. برای یک ماده منفجره دیگر با شکل متفاوت از وزن معادل TNT با شکل کروی استفاده می شود. برای یک مقدار ماده منفجره به وزن W_{exp} و با یک شکل مشخص، مقدار وزن TNT معادل (w_e) وزن خرج موثر با همان شکل از رابطه زیر بدست می آید.

$$w_e = \frac{H^{d_{exp}}}{H^{d_{TNT}}} \cdot W_{exp} \quad (22)$$

$H^{d_{exp}}$: حرارت انفجار ماده منفجره (بیانگر انرژی)

$H^{d_{TNT}}$: حرارت انفجار TNT (بیانگر انرژی)

مقادیر حرارت انفجار برخی از مواد منفجره پرکاربرد

در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴: مقادیر حرارت برخی از مواد منفجره

ماده منفجره	حرارت انفجار ft-lb/lb	حرارت اشتعال ft-lb/lb
باراتول	۱/۰۴e۶	-
براستول	۵/۵۹e۶	-
ترکیب B	۲/۱۵e۶	۳/۱۹e۶
ترکیب C-۴	۲/۲۲e۶	-
سیکلوتول ۷۵/۲۵	۲/۲e۶	۳/۱۶e۶
اکتل ۷۰/۳۰	۲/۲e۶	۳/۱۸e۶
پنتولیت ۵۰/۵۰	۲/۱۴e۶	-

۲-۴-۳- چاله انفجاری [۸]

یک چاله انفجاری بوسیله انفجار سطحی بوجود آمده است. اندازه چاله توسط kinney & Graham تعریف شده است.

مهمترین عامل در اندازه گیری عمق و شکل گودال، وزن ماده منفجره و فاصله انفجار از سطح زمین است. نتایج عددی نشان می دهد که نسبت قطر به عمق چاله انفجارهای سطحی برابر صفر است. در زیرزمین بیشتر و در بالای زمین کمتر از صفر است.

$$\frac{D}{H_2} = 5.87 + 5.05 |d| \quad (23)$$

Ambrosini با انجام آزمایشات گوناگون و با استفاده

از ماده منفجره TNT با اوزان ۵۰ تا ۵۰۰ کیلوگرم و بر روی خاک های مختلف توانست روابط تجربی زیر را در مدلسازی

تغییر مکان می‌باشد. حل این مسئله بوسیله روش اجزای محدود به حل مسئله ماتریس مقادیر ویژه غیرممتقار منجر می‌شود. در این حالت فرض بر این است که سیال تراکم‌پذیر، غیر ویسکوز و همگن می‌باشد و فشار و چگالی سیال در حالت تعادل ثابت بوده و در سیال جریان وجود ندارد. با توجه به فرضیات بالا، دو روش لاگرانژی و اویلری در سیال بر هم منطبق شده و به معادلات مشابهی می‌رسیم.

۲-۹- معادلات حاکم بر اندرکنش سیال و سازه [۱۴]

با ساده سازی معادله ناویر- استوکس که قبلاً بدست آمد، معادله هلمهتوز که حاکم بر جریان سیالات است بدست آمد. این معادله در محیط سیال قابل حل می‌باشد:

$$-\nabla^2 P + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = 0 \quad \text{in } \Omega f$$

در محیط سازه نیز معادلات ارتعاش جامدات به معادله زیر می‌رسد:

$$\sigma_{i,r}(u) + \rho \cdot u''_i = 0 \quad \text{in } \Omega f$$

و در سطح سازه و سیال و در سطح خارجی سازه نیز با توجه به شرط مرزی تعادل نیروهای سطحی به معادله زیر خواهیم رسید:

$$\sigma_{i,r}(u) \cdot n_r^s = F_i$$

که n_r^s بردار نرمال در سطح تماس سازه و سیال است. اما در سطح تماس سازه و سیال، فشار سیال بر روی سازه وارد می‌شود. تغییر مکان سازه بر روی سیال اثر می‌گذارد که معادلات آن در ادامه ارائه می‌شود. حال با فرض دو عملگر گرادیان و دیورژانس خواهیم داشت :

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) = \{L\}^T \quad (32)$$

$$\nabla = \{L\} \quad (33)$$

معادله هلمهتوز را به شکل زیر می‌توان نوشت:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \{L\}^T(\{L\}, P) = 0 \quad (34)$$

با ضرب کردن این رابطه در تغییرات مجازی فشار δP و استفاده از روش گالرگین و انتگرال گیری بر روی حجم و

ترک‌های ناشی از بارگذاری کششی و خردشدگی حاصل از بارگذاری فشاری می‌باشد.

در این مدل اینگونه فرض گردیده است که پاسخ به فشار و کشش تک محوره، توسط معیار خرابی پلاستیک آمده کنترل می‌شود. در اثر کشش تک محوره به صورت خطی بوده، منحنی تنش- کرنش تا نقطه تنش خرابی σ_{to} که در این نقطه ترکهای ریز در بتن ایجاد شده و گسترش می‌یابد. پس از عبور از نقطه مذکور، خرابی‌ها بصورت ترک‌های ریز قابل مشاهده در می‌آیند که بصورت منحنی نرم شدگی در فضای تنش- کرنش نشان داده می‌شوند. تحت فشار تک محوره، پاسخ تا رسیدن به نقطه جاری شدن σ_{CO} به صورت الاستیک بوده و در ناحیه پلاستیک رفتار عموماً بوسیله منحنی سخت شدگی بیان می‌شود و در نهایت با رسیدن به نقطه تنش نهایی بصورت منحنی نرم شدگی در می‌آید.

۲-۶- میلگرد [۱۵]

در طراحی اعضای بتن مسلح، تنش تسلیم فولاد تحت بارگذاری سریع با نرخ کرنش در حدود ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ (بر ثانیه) بسته به نوع و رده میلگرد تا دو برابر یا بیشتر افزایش می‌یابد. در بارگذاری سریع مانند انفجار، تنش تسلیم و تنش نهایی میلگردها افزایش می‌یابد و تغییرات ضریب افزایش دینامیکی، با افزایش نرخ کرنش، غیرخطی است.

۲-۷- سیال [۱۶]

برای بررسی رفتار سیالات و اندرکنش آن با سازه می‌توان از معادله خطی Us-Up هوگونویوت استفاده کرد. این معادله بصورت زیر بیان می‌شود:

$$P = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1-s\eta)^2} \left[1 - \frac{\Gamma \cdot \eta}{2} \right] + \Gamma_0 \rho_0 E m \quad (30)$$

$$\eta = 1 - \frac{\rho_0}{\rho} \quad (31)$$

p: فشار اولیه ، C_0 : سرعت موج فشاری ، ρ_0 : دانسیته و S_0 : پارامترهای بدون بعد، صفر فرض می‌شوند.

۲-۸- شبیه سازی اثر اندرکنش سیال و سازه به روش اجزاء محدود [۱۳]

در حالت کلی فضای سه بعدی سیال و سازه، روش طبیعی برخورد با مسئله اندرکنش آب و سیال بصورت تعریف سیال بوسیله میدان فشار و سازه بوسیله میدان

سپس استفاده از توابع گرین معادله زیر بدست می آید.

$$\begin{bmatrix} [Me^S] & [0] \\ [M^{fsi}] & [Me^P] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{ue\} \\ \{pe\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [Ke^S] & [0] \\ [K^{fsi}] & [Ke^P] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{ue\} \\ \{pe\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{f\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \quad (45)$$

$$\int_{V_0} \frac{1}{c^2} \delta P \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} dV \int_{V_0} (\{L\}^T \delta P) (\{L\}, P) dV = - \int_{S_0} \rho \delta P \cdot \{n\} \frac{\partial^2 \{u\}}{\partial t^2} dS \quad (35)$$

$$[M^{fsi}] = \rho \cdot [Re]^T \quad (46)$$

$$[K^{fsi}] = -\rho \cdot [Re] \quad (47)$$

$$\rho \cdot [Re] = \int \{N\} \cdot \{n\}^T \cdot \{N\}^T \cdot dS \quad (48)$$

از سوی دیگر در مرز، فشار سیال بر سازه بصورت نیروی خارجی بر سیال وارد می شود:

$$\sigma_{ir}(u) \cdot n_r^s = Pni \quad (36)$$

حال با ضرب کردن معادله فوق در δu (تغییر مکان مجازی) و استفاده از رابطه گرین و اعمال شرایط مرزی داریم.

$$\int_{V_S} \sigma_{ir}(u) \cdot \varepsilon_{ir}(u) (\delta u) dv - \int_{V_S} \rho s \{u\} \cdot \delta u \cdot dV - \int_S P \cdot n \cdot \delta u = \int_{S_1} F \cdot \delta u \cdot dS \quad (37)$$

حال با فرض:

$$\{P\} = \{N\}^T \{Ps\} \quad (38)$$

$$\{u\} = \{N\}^T \{us\} \quad (39)$$

که در آن $\{N\}$ تابع تغییر شکل و $\{u\}$ تابع تغییر مکان است و با دوبار مشتق گیری از روابط بالا خواهیم داشت:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = \{N\}^T \{\ddot{p}e\} \quad (40)$$

$$\frac{\partial^2 \{u\}}{\partial t^2} = \{N\}^T \{\ddot{u}e\} \quad (41)$$

$$\delta P = \{N\}^T \{\delta Pe\} \quad (42)$$

$$\delta u = \{N\}^T \{\delta ue\} \quad (43)$$

$\{pe\}$ بردار تغییر فشار و $\{ue\}$ بردار تغییر مکانهای مختلف در نهایت به شکل ماتریسی معادله فوق می رسیم.

$$[Me^P] \{P_0\} + [Ke^P] \{P_0\} + \rho [R_0]^T \{\ddot{u}\} = 0 \quad (44)$$

که به ترتیب ماتریس سختی سیال و جرم سیال و اندرکنش آب و سازه می باشد. شکل نهایی معادله با جایگذاری در معادلات فوق به شکل زیر خواهد بود.

۳- روش انجام تحقیق

حل عددی مسائل انفجار در چند دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته و موجب پیشرفت نرم افزارهای شبیه ساز گردیده است. اهمیت شبیه سازی عددی با توجه به هزینه های زیاد ساخت برای آزمایش ها و محدودیت در حل تئوریک مسائل انفجار، بیش از پیش مشخص شده است. هایدروکدها برنامه های رایانه ای قادر به حل مسائل دینامیکی در محیط های جامد، مایع، گاز و با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی هندسی و غیرخطی مصالح شامل پلاستیسیته، سخت شدگی و نرم شدگی کرنشی و گسیختگی می باشد. از جمله این نرم افزارها می توان به نرم افزار آباکوس، اشاره کرد. در این بخش با در نظر گرفتن مشخصات خاک، سازه و سیال، فرض می شود که انفجاری سطحی با انرژی و فاصله مشخص از سازه مخزن رخ داده است. امواج ناشی از انفجار از طریق خاک به مخزن منتقل می شود. در این مسئله تاثیر اندرکنش خاک، سازه و سیال در نظر گرفته می شود.

بدین منظور ضمن توضیح مختصر روش های مدل سازی در آباکوس، مدل سازی مخزن بتن مسلح، مایع و محیط خاکی در حالات مختلف در نرم افزار آباکوس انجام شده و مدل ها تحت بارگذاری انفجاری بدست آمده قرار می گیرند.

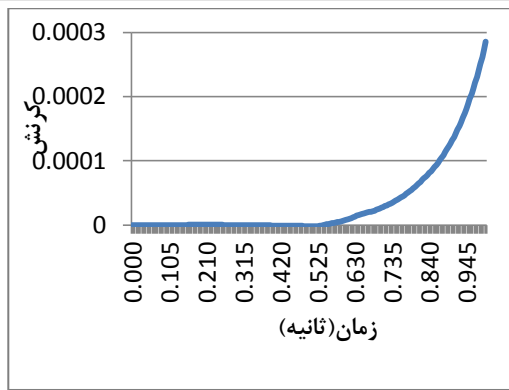
۳-۱- مدل سازی در نرم افزار آباکوس

آباکوس مجموعه ای از برنامه های شبیه ساز قدرتمند مهندسی است که بر پایه روش اجرای محدود بنا نهاده شده و می تواند طیف گسترده ای از یک تحلیل خطی نسبتاً ساده تا تحلیل های غیرخطی بسیار پیچیده را حل کند. این برنامه قابلیت های بسیاری برای شبیه سازی در کاربردهای خطی و غیرخطی فراهم می کند. مسائلی که شامل اجزای متعدد و مصالح مختلف هستند را می توان با تعریف هندسه هر جزء و اختصاص دادن مصالح تشکیل دهنده آن و سپس تعریف اندرکنش بین آن ها شبیه سازی نمود. این نرم افزار همچنین قادر به شبیه سازی و تحلیل پدیده انفجار و واکنش انفجار و

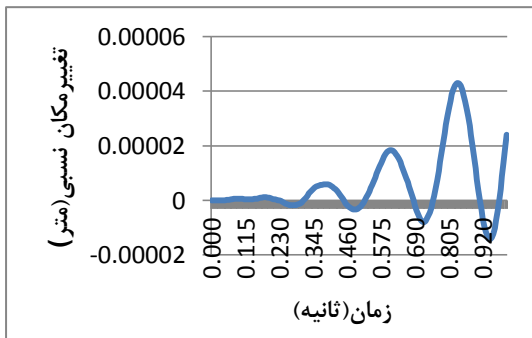
انتشار موج و آثاری که در نتیجه انفجار بر سازه اعمال می‌شود، می‌باشد. موارد مدلسازی مطابق جدول ۵ انجام می‌شود.

جدول ۵: نام‌گذاری حالات مختلف مدلسازی اندرکنش خاک-سیال-سازه

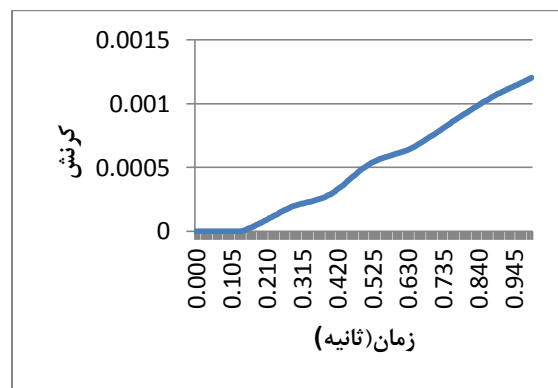
خاک	آب	نفت
سخت	S1-w	S1-o
نرم	S4-w	S4-o



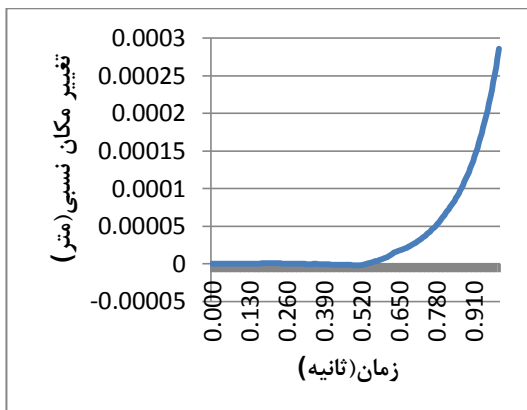
شکل ۴: حداکثر کرنش پلاستیک، خاک سخت و نفت



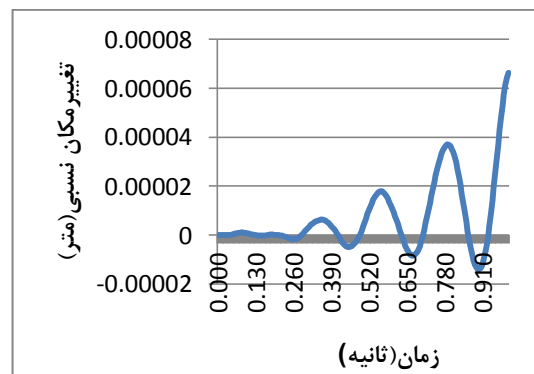
شکل ۵: تغییر مکان نسبی، خاک سخت و نفت



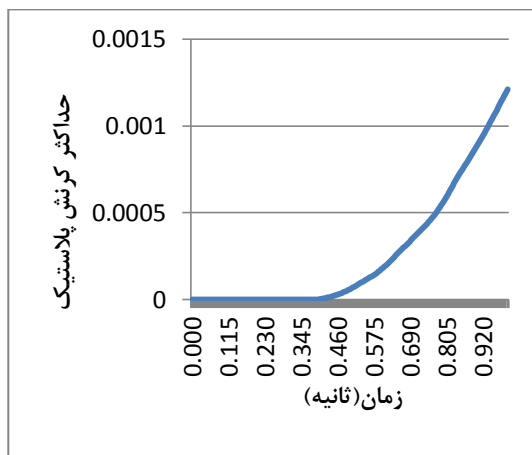
شکل ۱: حداکثر کرنش پلاستیک مخزن (خاک سخت و آب)



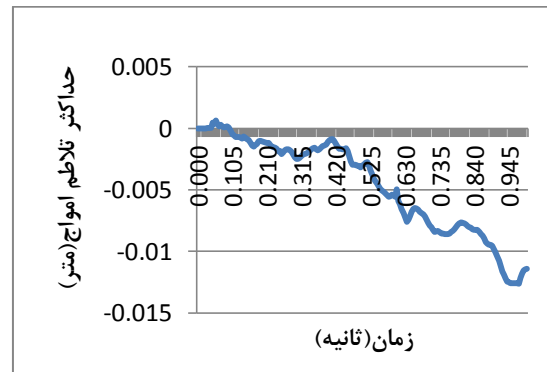
شکل ۶: حداکثر تلاطم امواج، خاک سخت و نفت



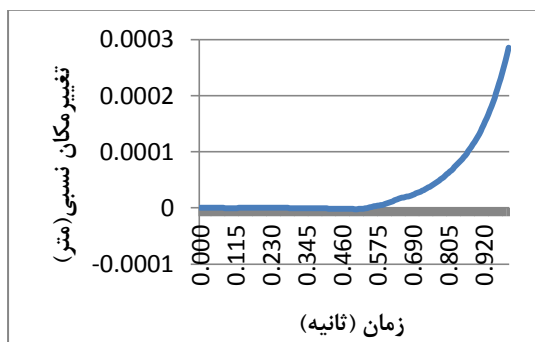
شکل ۲: حداکثر تغییر مکان نسبی در خاک سخت و آب



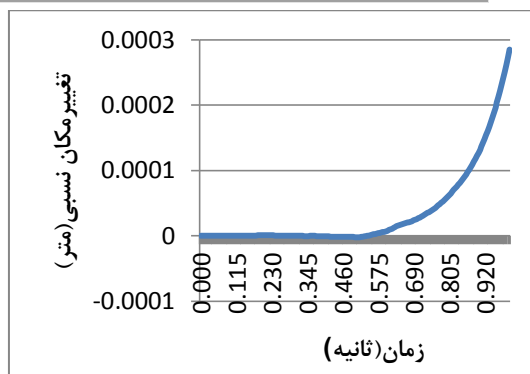
شکل ۷: حداکثر کرنش پلاستیک، خاک نرم و آب



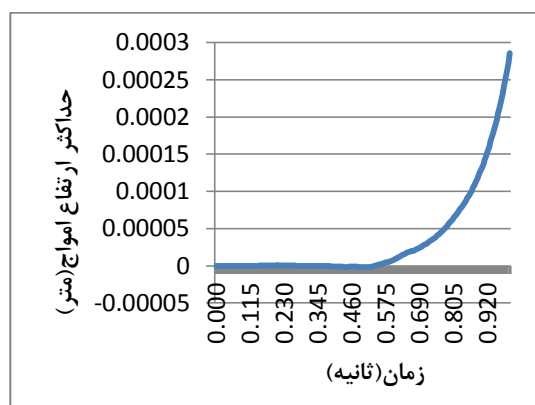
شکل ۳: حداکثر ارتفاع امواج در خاک سخت و نفت



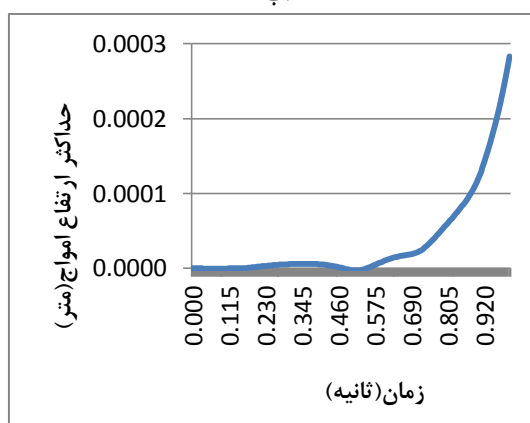
شکل ۱۱: تغییر مکان نسبی سقف نسبت به کف مخزن، خاک نرم و نفت



شکل ۸: تغییر مکان نسبی سقف نسبت به کف، خاک نرم و آب



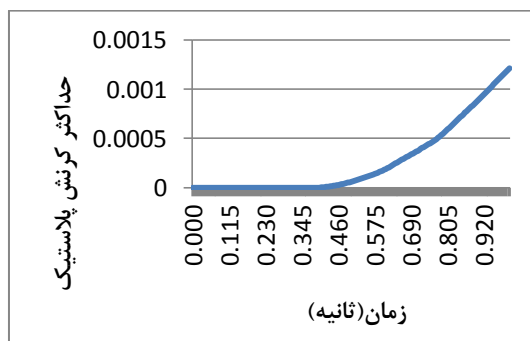
شکل ۱۲: حداکثر تلاطم امواج، خاک نرم و نفت



شکل ۹: حداکثر ارتفاع امواج، خاک نرم و آب

۴- نتایج

- ✓ در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک-سازه موجب کاهش کرنش پلاستیک و ارتفاع امواج می‌شود. ولی تغییر مکان نسبی افزایش می‌یابد.
- ✓ با نرم شدن خاک، میزان کرنش پلاستیک و ارتفاع امواج و تغییر مکان نسبی افزایش می‌یابد.
- ✓ تحت اثر اندرکنش سازه-سیال، میزان کرنش پلاستیک و تغییر مکان نسبی و ارتفاع امواج در مخزن آب نسبت به مخزن نفت بیشتر است.
- ✓ افزایش میزان چگالی موجب کاهش کرنش پلاستیک و تغییر مکان نسبی و ارتفاع امواج می‌شود.



شکل ۱۰: حداکثر کرنش پلاستیک، خاک نرم و آب

۵- مراجع

- [1] Housner, G.W "Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers", Bulletin of the Seismological Society of America.(1957),PP15_35
- [2] Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R. "Finite Dynamic Model for Infinite Media", Journal of Eng. Mech. Div ASCE, EM24, PP 859- 877. (1969)
- [3] Lysmer, J. and Wass, G "Shear Waves in Plane Infinite Structures", Journal of Eng. Mech. Div.

ASCE EMI, PP85_105(1972)

- [4] Haroun, M.A. "Dynamic Analyses of Liquid Storage Tanks", EERL, PP 80- 104. (1980)
- [5] hamdan, F.H. "An Assesment of Eurocod8-part4: Design of liquid storage tanks", european seismic design practice, Elnashai(1995)
- [6] Wolf, J.P: "Soil Structure Interaction Analysis In Time Domain", Prentice-Hal International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics, (1988)
- [7] Tomasz JANKOWIA, Tomasz LODYGOWSKI, "IDENTIFICATION OF PARAMETERS OF CONCRETE DAMAGE PLASTICITY CONSTITUTIVE MODEL", Poznan University of Technolog Institute of Structural Engineering 2005
- [8] Ziad N. Taqieddin, "ELASTO-PLASTIC AND DAMAGE MODELING OF REINFORCEMENT CONCRETE", Submitted to the Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in The Department of Civil & Environmental Engineering, August 2008
- [9] Mecánica Computacional Vol XXVII, págs. 1999-2019 (artículo completo) Alberto Cardona, Mario Storti, Carlos Zuppa. (Eds.)
- [۱۰] طرح مخزن بتنی ۶۰'۰۰۰ مترمکعبی گازوئیل کرمان، زیر نظر پدافند غیر عامل، شرکت مهندسی مشاور خاک پایه.
- [۱۱] تراز نامه انرژی سال ۱۳۸۵. بخش دوم، نفت.
- [۱۲] بهمن خدایار، بابک پور سرتیپ، شهرام ایرانفر، ویژگی های سازه ای طرح های مخازن بتنی بزرگ برای ذخیره مایعات نفتی در ایران، شرکت پخش فرآورده های نفتی ایران سال ۱۳۸۸.
- [۱۳] علی اکبر رمضان پور، شاپور طاحونی، مهران امیری، بررسی مقاومت و نفوذپذیری بتن برای مخازن نفتی، ششمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان ۱۳۸۲
- [۱۴] محمد خداوردی، مطالعه رفتار دینامیکی سازه مخازن مدفون خاک، پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته مهندسی عمران گرایش سازه، دانشکده فنی دانشگاه تهران ۱۳۸۴.
- [۱۵] آرش نیری، تحلیل و طراحی ساختمان ها در برابر اثرات انفجار، دانشگاه مالک اشتر، تهران ۱۳۹۰.
- [۱۶] مهدی عسگرپور، بررسی تاثیرات اندرکنش خاک- سازه- سیال در مخازن بتنی مسلح روزمینی تحت بار انفجار سطحی، دانشگاه مالک اشتر، تهران بهمن ۱۳۹۰