

تحلیل عددی اثر انفجارهای مدفون بر مخازن بتنی مسلح مدفون نفتی

مقاله پژوهشی

سید احمد حسینی^{۱*}؛ محمدمهدی براتی^۲

۱- استادیار؛ مجتمع دانشگاهی پدافند غیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، hoseini@mut.ac.ir

۲- کارشناس ارشد؛ مجتمع دانشگاهی پدافند غیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، baraati@gmail.com

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۲/۰۸/۲۳؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۳/۰۵/۰۳

شماره صفحات: ۳۳۱ تا ۳۴۵

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2024.13830.1483

واژگان کلیدی	چکیده
مخزن مدفون اندرکنش خاک-سازه اندرکنش مایع-سازه انفجار مدفون	با توجه به موقعیت کشور و تهدیدات موجود علیه آن، مراکز حساس و استراتژیک کشور از قبیل مخازن ذخیره سازی آب، نفت، گاز و فرآورده‌های نفتی، همواره در معرض خطرات حملات تروریستی است. مخازن مدفون، از جمله مراکز حساس می‌باشد که در صورت آسیب دیدن، منجر به بروز بحران‌های اجتماعی و زیست محیطی می‌شود. لذا بررسی عملکرد رفتار این سازه‌ها در برابر انفجار، امری ضروری و در راستای سیاست‌های پدافند غیر عامل می‌باشد. در این تحقیق رفتار یک مخزن بتن مسلح استوانه‌ای مدفون تحت انفجار مدفون با استفاده از نرم افزار آباکوس بررسی شده است. برای شبیه سازی خاک از مدل رفتاری دراکر-پراگر، مایع معادله خطی هگنونیت، انفجار <i>JWL</i> و بتن، مدل بتن آسیب دیده خمیری استفاده شده است. ابتدا نسبت به صحت‌سنجی اندرکنش سازه- خاک تحت انفجار و سپس اندرکنش سازه- آب اقدام شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که برای این مخزن مدفون تحت انفجار، محل تلاقی دیواره با سقف مخزن، در معرض بیشترین آسیب می‌باشد. با افزایش مقدار میلگرد، تغییر شکل‌ها کاهش محسوسی پیدا می‌کنند؛ به طوری که با دو برابر کردن مقدار میلگرد، تغییر شکل ۲۸ درصد کاهش و با نصف کردن میلگرد، تغییر شکل، ۴۶ درصد افزایش پیدا می‌کند.

۱- مقدمه

شیمیایی سمی یا آلوده کننده محیط زیست را به همراه داشته باشد که گاهی خسارت‌هایی بیش از خود زلزله یا انفجار را سبب می‌شوند. یاکوبسن جزء اولین محققینی است که مطالعات وسیعی را بر روی رفتار دینامیکی مخازن آب در سال ۱۹۴۹ انجام داده است (Hamdan, 1996). در سال ۱۹۶۰، لایزمر تئوری استفاده از مرزهای جاذب ویسکوز را در اطراف محیط محدود برای مدل‌سازی محیط نیمه بینهایت جهت تحلیل مخازن مطرح کرد. اما مشکل اصلی نظریه مرزهای جاذب محدودیت برای تحلیل در حوزه فرکانس بود. این مسئله سبب شد تا لایزمر تحقیقات خود را در زمینه مرزهای

حفاظت از زیرساخت‌ها و سازه‌های حساس در برابر انفجار و حملات تروریستی از جمله نیازهای دنیای امروز است. مخازن از جمله تأسیسات استراتژیک هر کشور است و باید از ایمنی بالایی در برابر حملات، انفجار و آتش‌سوزی‌های احتمالی برخوردار باشند. مخازن، به منظور ذخیره سیالات، از مایعات غیرسمی و غیرقابل اشتعال تا مواد شیمیایی بسیار سمی و قابل اشتعال، مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکست سازه‌های مخازن پس از وقوع زلزله یا انفجار، علاوه بر زیان اقتصادی ممکن است آتش‌سوزی‌های کنترل نشده، اتلاف و نشت مواد

دلخواه مانند بارگذاری چرخه‌ای بوده و کاهش سختی کشسان با در نظر گرفتن کرنش خمیری هم در کشش و هم در فشار توجیه می‌گردد. این مدل برای بتن در حالت آسیب دیده یک مدل پیوسته بر اساس رفتار خمیری بوده و دو مکانیزم اصلی خرابی در این مدل ترک‌های کششی و خردشدگی فشاری می‌باشد (Jankowiak & Lodygowski, 2005).

خاک: برای شبیه‌سازی خاک از مدل رفتاری دراکر-پراگر (Drucker-Prager) استفاده شده است. مدل دراکر-پراگر در برگزیده رفتار غیرخطی بوده و می‌تواند معیار تسلیم برای خاک را بر اساس شکل سطح تسلیم در صفحه تنش-کرنش در نظر بگیرد (Abaqus, 2014).

میلگرد: مدل جانسون-کوک برای فلزاتی که تحت تاثیر نرخ کرنش بالا هستند، مفید می‌باشد، لذا برای مدل کردن میلگرد از این مدل رفتاری استفاده شده است. تنش تسلیم، برای زمانی که نرخ کرنش صفر است به سختی کرنش، نرخ سختی کرنشی و نرم شدگی دمایی وابسته می‌باشد (Abaqus, 2014).

انفجار: برای مدل‌سازی مواد منفجره تاکنون مدل‌های متعددی پیشنهاد شده است که یکی از معروف‌ترین آن‌ها مدل JWL می‌باشد که معادله حالت یک ماده منفجره جامد را بصورت رابطه (۱) پیشنهاد می‌کند:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega \rho}{R_1 \rho_0}\right) e^{\left(-R_1 \frac{\rho_0}{\rho}\right)} + B \left(1 - \frac{\omega \rho}{R_2 \rho_0}\right) e^{\left(-R_2 \frac{\rho_0}{\rho}\right)} + \frac{\omega \rho^2}{\rho_0} E_{m0} \quad (1)$$

که در آن

ρ_0 : چگالی ماده منفجره

ρ : چگالی محصولات

و مقادیر A , B , R_1 , R_2 و ω ثابت‌های معادله JWL می‌باشند.

در مدل‌سازی JWL، فعال‌سازی هر قسمت از ماده منفجره به ساختار ماده منفجره بستگی پیدا می‌کند؛ به این صورت که زمان فعال‌سازی آن به سرعت موج انفجار و فاصله ماده از نقطه احتراق بستگی دارد (Khan, 1995).

۳- تعریف مساله و مدل‌سازی

مدل مورد بررسی، یک مخزن مدفون بتن مسلح حاوی سیال می‌باشد که تحت انفجار مدفون قرار گرفته است. مخزن مورد نظر یک مخزن بتن مسلح استوانه‌ای می‌باشد. همچنین ۱۱

جاذب ادامه داده و با همکاری دیگر محققین، مدل‌های تکمیلی دیگری مبتنی بر تئوری مرزهای جاذب ارائه نماید (Lysmer & Kuhlemeyer, 1969; Lysmer & Wass, 1972) هاوژنر در سال ۱۹۵۷، تحقیقات گسترده‌ای را در زمینه مدل دینامیکی ساده برای مخازن مستطیلی و استوانه‌ای ارائه نمود. وی فشار هیدرودینامیکی آب را به دو قسمت ضربه‌ای و نوسانی تقسیم کرد (Housner, 1957). بررسی اثر سختی خاک، ابعاد سازه و فاصله انفجار از سازه در سال ۱۹۹۷، توسط یانگ، با مدل کردن یک سازه دو بعدی مدفون در برابر انفجار سطحی با استفاده از روش اجزاء محدود انجام پذیرفت (Yang, 1972). در سال ۲۰۰۵، لو و ونگ مدلی برای تحلیل دینامیکی غیر خطی، انفجار در خاک و توزیع فشار حاصل از انفجار در خاک ارائه کردند (Lu, et al., 2005; Wang, et al., 2005). لیواگلو در سال ۲۰۰۸ با در نظر گرفتن یک مخزن مستطیلی حاوی مایع با سیستم خاک-پی و مطالعه رفتار دینامیکی به این نتیجه رسید که با کاهش سختی خاک، مقدار جابجایی سیال و برش پایه کاهش پیدا می‌کند (Livaoglu, 2009). مطالعه پارامترهای اصلی موثر بر پاسخ‌های دینامیکی برای مخزن استوانه‌ای توسط مسلمی و کیانوش در سال ۲۰۱۲ انجام شد (Moslemi & Kianoush, 2012). میتال و همکاران در سال ۲۰۱۴ با بررسی عددی یک مخزن فلزی تحت بار انفجار با ترکیب روش اویلری-لاگرانژی نشان دادند که تنش و ارتفاع تلاطم مایع با کاهش فاصله مقیاس شده افزایش پیدا می‌کنند (Mittal, et al., 2014). در سال ۲۰۱۴، چن و همکاران یک سازه قوسی شکل را تحت بارگذاری مدفون تحت آزمایش قرار دادند و پارامترهایی نظیر تغییر شکل، تنش، کرنش و شتاب را توسط ابزار اندازه‌گیری بدست آوردند می‌کنند (Chan, et al., 2014). لازم به ذکر است طبق بررسی انجام شده توسط مولفین این مقاله، پیرامون مخازن بتنی مدفون تحت انفجار تحقیق خاصی انجام نشده است.

۲- مبانی علمی و مدل‌سازی مواد

بتن: جهت پیش‌بینی رفتار غیرخطی بتن و لحاظ نمودن آثار کاهش مقاومت بتن ناشی از خرابی، از مدل بتن آسیب‌دیده‌ی خمیری (Concrete Damage Plasticity) استفاده شده است. این مدل جهت شبیه‌سازی بتن و دیگر مواد شبه شکننده در انواع سازه‌ها تعبیه شده است. این مدل قادر به شبیه‌سازی شرایط بارگذاری

جدول ۲- شبیه‌سازی‌های انجام شده در این تحقیق

عمق دفن مخزن (m)	نوع مایع ماسه	نوع نفت	درصد پرشدگی مخزن	مقاومت بتن (mpa)	میلگرد	وزن Tnt (kg)	فاصله مقیاس شده m/kg ^{0.33}	پارامتر
۳	متراکم	نفت	۷۵٪	۲۵	عادی	۰/۶	۳	
۳	متراکم	نفت	۷۵٪	۲۵	عادی	۴/۷	۱/۵	فاصله
۳	متراکم	نفت	۷۵٪	۲۵	عادی	۷/۳	۱/۳	مقیاس شده
۳	متراکم	نفت	۷۵٪	۲۵	عادی	۹/۳	۱/۲	
۳	متراکم	نفت	۷۵٪	۲۵	عادی	۱۶	۱	
۳	متراکم	نفت	۷۵٪	۲۵	۲ برابر عادی	۷/۳	۱/۳	
۳	متراکم	نفت	۷۵٪	۲۵	عادی	۷/۳	۱/۳	میلگرد
۳	متراکم	نفت	۷۵٪	۲۵	نصف عادی	۷/۳	۱/۳	
۳	متراکم	نفت	۷۵٪	۲۵	بدون میلگرد	۷/۳	۱/۳	
۳	متراکم	نفت	۷۵٪	۲۵	عادی	۷/۳	۱/۳	مقاومت
۳	متراکم	نفت	۷۵٪	۳۵	عادی	۷/۳	۱/۳	
۳	متراکم	نفت	۷۵٪	۴۸	عادی	۷/۳	۱/۳	بتن
۳	متراکم	نفت	۷۵٪	۱۲۲	عادی	۷/۳	۱/۳	
۳	متراکم	نفت	۲۵٪	۲۵	عادی	۷/۳	۱/۳	درصد
۳	متراکم	نفت	۵۰٪	۳۵	عادی	۷/۳	۱/۳	
۳	متراکم	نفت	۷۵٪	۴۸	عادی	۷/۳	۱/۳	پرشدگی
۳	متراکم	نفت	۹۵٪	۱۲۲	عادی	۷/۳	۱/۳	
۳	متراکم	نفت	۷۵٪	۲۵	عادی	۷/۳	۱/۳	مایع
۳	متراکم	آب	۷۵٪	۳۵	عادی	۷/۳	۱/۳	
۳	متراکم	نفت	۷۵٪	۲۵	عادی	۷/۳	۱/۳	
۳	متوسط	نفت	۷۵٪	۳۵	عادی	۷/۳	۱/۳	خاک
۳	متراکم	نفت	۷۵٪	۴۸	عادی	۷/۳	۱/۳	
۳	متراکم	نفت	۷۵٪	۲۵	عادی	۷/۳	۱/۳	عمق
۴/۵	متراکم	نفت	۷۵٪	۳۵	عادی	۷/۳	۱/۳	دفن
۶	متراکم	نفت	۷۵٪	۴۸	عادی	۷/۳	۱/۳	

جدول ۳- مشخصات مدل پایه

فاصله مقیاس شده	نوع مایع	بتن	عمق مایع	عمق دفن	خاک
۱/۳ m/kg ^{0.33}	نفت	۲۵ مگا پاسگال	۷۵٪	۳ متر	ماسه متراکم

۳-۱- مدل‌سازی در نرم افزار

برای مدل‌سازی، از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. برای مدل‌سازی در نرم‌افزار و ایجاد هندسه مخزن، خاک و مایع از گزینه سالیید برای ایجاد میلگردها از گزینه وایر استفاده شده است. باتوجه به تقارن هندسه و بارگذاری، تنها یک چهارم آن مدل‌سازی شده و سپس شرایط تقارن به آن اختصاص داده می‌شود.

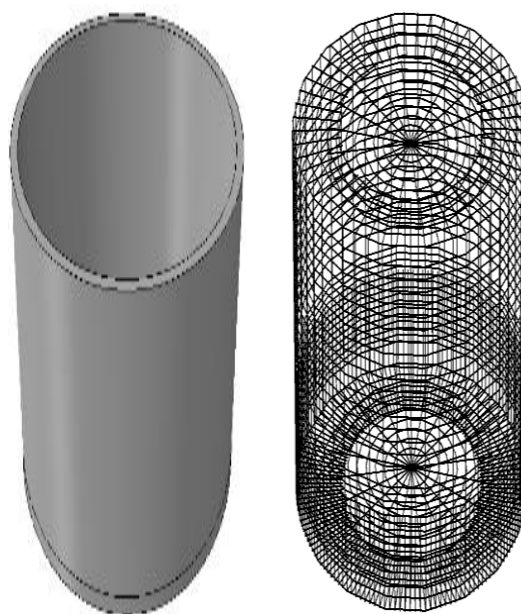
بتن مورد استفاده، بتن با مقاومت ۲۵ مگا پاسگال و ضریب پواسون ۰/۲۱ می باشد و از مدل رفتاری بتن آسیب دیده

تیپ میلگردگذاری (شامل قطرهای ۱۶ و ۱۹ میلیمتر) برای مسلح کردن مخزن استفاده شده است. در جدول ۱، مشخصات مخزن و در شکل ۱، نمای کلی مخزن و میلگرد نشان داده شده است. جزئیات کامل میلگردگذاری در مرجع (Koh, et al., 2008) آمده است.

مخزن در حوزه خاکی به ابعاد ۲۰ در ۲۰ متر با ارتفاع ۱۵ متر قرار گرفته است. فرض می‌شود کف حوزه خاکی بر روی سنگ بستر قرار دارد.

جدول ۱- مشخصات مخزن

ظرفیت (Lit)	ضخامت دیوار (cm)	ضخامت دال کف و سقف (cm)	ارتفاع (cm)	قطر (cm)
۱۲۵۰۰۰	۲۰	۲۵	۴۳۰	۶۱۰



شکل ۱- چینش میلگردها و نمای مخزن

برای بررسی رفتار مخزن، پارامترهای مختلفی همچون فاصله مقیاس شده، درصد پرشدگی مخزن، نوع مایع، جنس خاک، مقدار میلگرد، مقاومت بتن و عمق دفن‌شدگی در نظر گرفته شده اند. در جدول ۲، شبیه‌سازی‌های انجام شده در این تحقیق نشان داده شده است. به منظور مقایسه، یک مدل پایه با مشخصاتی که در جدول ۳، انتخاب شده است، در نظر گرفته می‌شود. در این جدول Z فاصله مقیاس شده، R فاصله ماده منفجره از نقطه مورد نظر بر حسب فوت و W وزن ماده منفجره بر حسب پوند می‌باشند.

برای شبکه‌بندی سیال از روش شبکه‌بندی سازگار استفاده شده است. این نوع شبکه‌بندی اعوجاج شبکه را به خوبی کنترل کرده و مانع از بروز خطا در تغییر شکل‌های بزرگ می‌شود.

جدول ۶- مشخصات سیال (Ghaeli & Halabian, 2008)

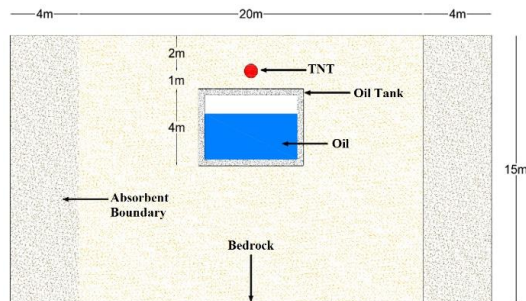
مشخصات			سیال
جرم حجمی (kg/m^3)	مدول بالک (Mpa)	لزجت ($kg.s/m^2$)	
۱۰۰۰	۲۱۰۰	۰/۰۰۰۱۱۵	آب
۸۶۰	۱۵۵۰	۰/۰۰۰۸۱	نفت

جدول ۷- مشخصات خاک (Veyera & Ross, 1995)

مشخصات				خاک
چگالی (kg/m^3)	مدول بالک (Mpa)	زاویه اصطکاک داخلی	نسبت پواسون	
۱۸۱۰	۱۲۴	۴۲	۰/۳۵	ماسه متراکم
۱۷۵۰	۵۰	۳۵	۰/۳۵	ماسه متوسط
۱۶۹۰	۱۰	۳۰	۰/۳۵	ماسه سست

جدول ۸- خصوصیات ماده منفجره تی‌ان‌تی (Larcher & Casadei, 2010)

چگالی (kg/m^3)	سرعت موج (m/s)	A (Gpa)	b (Gpa)
۱۶۳۰	۶۹۳۰	۳۷۴	۳/۸
انرژی اولیه واحد حجم	R2	R1	w
۶۰۰۰	۰/۹	۴۲۴۷۵	۰/۳۵



شکل ۲- نمای دو بعدی از مدل سازی

خمیری استفاده شده است. مشخصات بتن در جدول ۴، آمده است. برای مدل‌سازی میلگرد از مدل جانسون-کوک، برای سیال مدل هوگونویت و برای خاک، مدل دراگر-پراگر استفاده شده است.

جدول ۴- مشخصات بتن ۲۵ مگاپاسکال (Holmquist, 1993)

کشش			فشار		
تنش (Mpa)	کرنش	آسیب دیدگی	تنش (mpa)	کرنش	آسیب دیدگی
۰	۰	۰	۱۵	۰	۰
۰/۰۰۰۲۷۸	۲/۲۳	۰/۱۲۱	۲۱/۶	۰/۰۰۰۴	۰/۱۲۱
۰/۶۲۸	۱/۳۱	۰/۱۹۷	۲۵/۲	۰/۰۰۰۷	۰/۱۹۷
۰/۹۲۱	۰/۰۰۰۸۵	۰/۳۵	۲۹/۴	۰/۰۰۱	۰/۳۵
نسبت مدول ارتجاعی پواسون (Gpa)	چگالی (kg/m3)	۰/۴۲۳	۳۰	۰/۰۰۰۲	۰/۴۲۳
۰/۲۱	۲۶/۴	۰/۴۸۷	۲۹/۹	۰/۰۰۰۲۲	۰/۴۸۷
f_{o}/f_c	خروج از محوریت	۰/۵۷۱	۲۹	۰/۰۰۰۲۸	۰/۵۷۱
۱/۱۲	۰/۱	۰/۶۶۶۷	۲۷/۴	۰/۰۰۰۳۵	۰/۶۶۶۷

در جدول ۵ تا جدول ۷، به ترتیب مشخصات میلگرد، سیال و خاک آورده شده است.

جدول ۵- پارامترهای مدل جانسون-کوک برای میلگرد (Goel, et al., 2012)

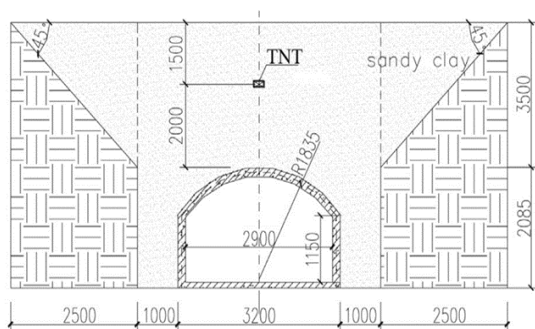
آسیب جانسون کوک	d1	d2	d3	d4	d5	نرخ کرنش مرجع	دمای دمای انتقال ذوب
	جانسون کوک	۰/۰۷	۱/۷۳	۰/۵۴	۰/۰۱۵	۰	۱۷۹۳
پلاستیک جانسون کوک	A	B	n	m	E(Mpa)	چگالی دمای انتقال ذوب	
	۵/۳۵۸	۲/۳۵۷	۰/۳	۱	۲/۲۵+۵	۱۷۹۳	۲۸۳
						۷۸۰۰	

همچنین با تقسیم‌بندی کردن قسمتی از خاک، با توجه به وزن حجمی تی‌ان‌تی و تعیین ابعاد مورد نظر، ماده منفجره تعریف می‌شود. برای انفجار از مدل JWL استفاده شده است. مشخصات ماده منفجره تی‌ان‌تی در جدول ۸، آمده است. در شکل ۲، نمای دو بعدی از محیط مسئله نمایش داده شده است.

راجع به بررسی رفتار تونل مدفون در برابر انفجار می‌باشد، استفاده شده است. همانطور که در شکل ۴، نشان داده شده است، تونل بتن مسلح قوسی شکل به طول ۱۰ متر و دهانه ۲/۹ متر و ضخامت ۱۵۰ میلی‌متر، وضخامت کف ۱۰ میلی‌متر و ارتفاع دیواره کناری ۱/۱۵ متر می‌باشد. مقاومت بتن بکار رفته ۲۱ مگاپاسکال و سختی کشسان آن ۳۰ گیگاپاسکال است. تونل در عمق ۳/۵ متری دفن شده‌است. و تی‌ان‌تی در عمق ۱/۵ متری سطح خاک و ۲ متر بالای مرکز تونل دفن شده‌است. دیواره‌ها و سقف با شبکه میلگرد به قطر ۸ میلی‌متر و فاصله ۱۰۰ میلی‌متر و کف تونل با شبکه میلگرد به قطر ۶ میلی‌متر و فاصله ۲۰۰ میلی‌متر مسلح شده‌اند. جنس خاک ماسه‌ای رس‌دار می‌باشد.

وزن تی‌ان‌تی، ۳ کیلوگرم بوده و برای اندازه‌گیری تغییر مکان، فشار، کرنش و شتاب، ابزار اندازه‌گیری در نقاط مختلف تونل نصب شده است. در شکل ۵، محل قرارگیری این ابزار نمایش داده شده است. برای مدل‌سازی بتن، از مدل بتن آسیب دیده خمیری، خاک دراگر-پراکر، میلگرد، مدل جانسون-کوک و تی‌ان‌تی مدل *JWL* استفاده شده است (*Chen, et al., 2014*).

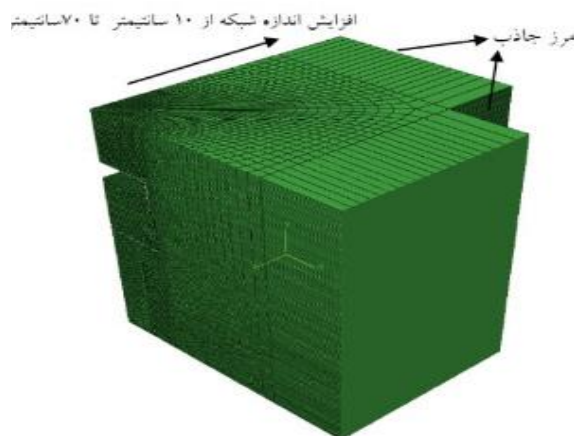
در شکل ۶، مدل ساخته شده در نرم افزار نشان داده شده است. مقایسه بین نتایج مدل آزمایشگاهی و مدل عددی در جدول ۹، برای تغییر شکل در دو ابزار *D2* و *D3* که در مقطع عرضی مرکزی تونل قرار دارند و جدول ۱۰ برای حداکثر فشار در دو ابزار *P3* و *P4*، که در بالای سقف مرکز آن واقع شده‌اند را نشان می‌دهند.



شکل ۴- مقطع عرضی تونل (*Chen, et al., 2014*)

با توجه به شرایط خاص کار آزمایشگاهی و عدم قطعیت در رفتار خاک، میزان تطابق نتایج، قابل قبول می‌باشد.

نوع شبکه خاک، مخزن و سیال *C3D8R* و میلگرد *T3D2* و اندازه شبکه‌ها ۱۰ سانتیمتر می‌باشد. بمنظور کاهش حجم محاسبات، برای شبکه‌بندی خاک، اندازه شبکه از ۱۰ سانتیمتر نزدیک محل مخزن و انفجار، تا ۷۰ سانتیمتر در نواحی مرزی خاک متغیر است. برای جلوگیری از بازگشت امواج ناشی از انفجار مرز جاذب استفاده شده است. نوع اجزاء مرز جاذب *CIN3D8* می‌باشد. در شکل ۳، شبکه بندی و مرز جاذب نشان داده شده است. همچنین برای تحلیل، از روش دینامیکی صریح استفاده شده است. زمان تحلیل برای اطمینان از مشاهده کامل اثر انفجار ۱۵۰ میلی ثانیه در نظر گرفته شد.



شکل ۳- شبکه‌بندی مدل و مرز جاذب

۳-۲- صحت سنجی مدل عددی

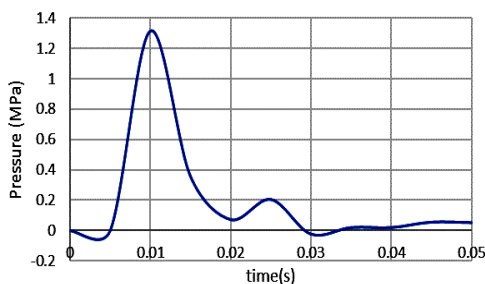
به دلیل عدم وجود داده‌های آزمایشگاهی مربوط به یک مخزن مدفون تحت بار انفجار، برای صحت‌سنجی رفتار خاک، بتن، میلگرد، انفجار و اندرکنش آنها با هم از داده‌های آزمایشگاهی یک تونل مدفون که تحت بار انفجار مدفون قرار گرفته است، استفاده شده است. همچنین یک تحقیق راجع به رفتار یک مخزن بتنی تحت زلزله برای اطمینان از اعتبار مخزن بتنی و سیال تحت بار دینامیکی و اندرکنش سازه- سیال بکار رفته است.

۳-۲-۱- صحت سنجی مدل اندرکنش خاک-سازه تحت انفجار

برای صحت‌سنجی سازه مدفون که تحت انفجار مدفون قرار دارد، از آزمایش چن و همکاران (*Chen, et al., 2014*) که

همان‌طور که در شکل ۹، نشان داده شده است، تی‌ان‌تی به وزن ۱۶ کیلوگرم در عمق ۳ متری و در فاصله ۳ متری از نقطه مورد نظر قرار گرفته است.

با استفاده از رابطه (۳)، مقدار حداکثر فشار در نقطه هدف برابر با ۱/۱۹ مگاپاسکال بدست آمد. مقدار حداکثر فشار در این نقطه در مدل نرم‌افزاری مطابق شکل ۱۰، برابر با ۱/۳۱ می‌باشد.

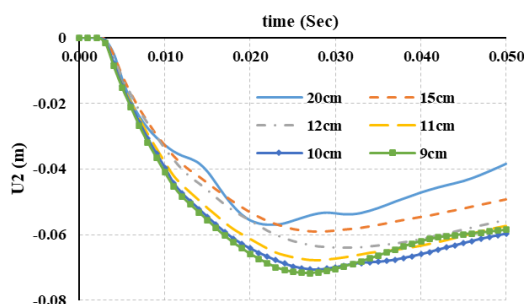


شکل ۱۰- نمودار فشار-زمان حاصل از مدل‌سازی

اختلاف بین نتایج اندک بوده و نشان‌دهنده تطابق مناسب معادله حالت *JWL* با آیین‌نامه *TM5-855-1* می‌باشد.

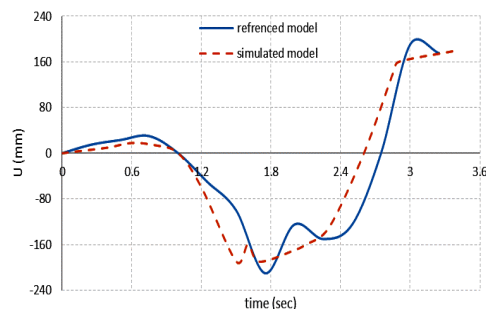
۳-۴- ابعاد شبکه

به‌منظور تعیین ابعاد شبکه، اندازه شبکه نمونه اولیه مخزن از اندازه ۲۰ سانتیمتر تا ۹ سانتیمتر کاهش پیدا کرد. شکل ۱۱، تغییر شکل سقف مخزن در مدل‌ها با اندازه‌های مختلف شبکه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- تاثیر اندازه شبکه بر جابجایی قائم سقف مخزن

با توجه به نتایج و همچنین مدت زمان تحلیل مدل‌ها، و همگرایی در اندازه ۱۰ سانتیمتر، نیازی به کوچک‌تر شدن اندازه مش‌ها وجود ندارد. بنابراین اندازه ۱۰ سانتیمتر برای شبکه‌بندی انتخاب شده است.



شکل ۸- مقایسه بین ارتفاع تلاطم مایع در مقاله مرجع و مدل عددی

۳-۳- صحت سنجی مدل *JWL* برای انفجار با روابط آیین‌نامه‌ای

به منظور اطمینان از نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی، انفجار مدفون در میدان آزاد با روابط آیین‌نامه *TM5-855-1* مقایسه شده است. حداکثر فشار تولید شده در میدان آزاد زمین بر حسب پاسکال و با فرض حرکت موج انفجار بدون برخورد به هر گونه مانع، از رابطه (۲) بدست می‌آید (Smith & Hetherington, 1994):

$$P_0 = \rho \cdot C \cdot u \quad (2)$$

که در آن

ρ : دانسیته خاک بر حسب Kg/m^3

u : حداکثر سرعت ذرات بر حسب m/s

C : سرعت انتشار موج انفجار بر حسب m/s

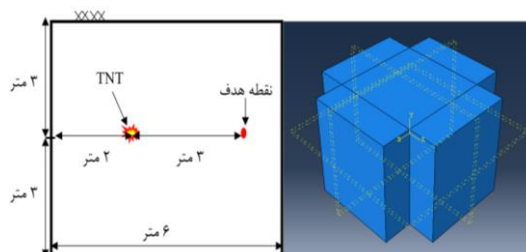
$$u = 48.8 f_c \left(\frac{2.52R}{W^{1/3}} \right)^{-n} \quad (3)$$

R : فاصله نقطه موردنظر از محل انفجار بر حسب متر؛

W : جرم خراج معادل تی‌ان‌تی بر حسب کیلوگرم؛

n : ضریب کاهش

به منظور مقایسه، یک انفجار مدفون در نرم‌افزار مدل شده‌است.



شکل ۹- مکان قرارگیری تی‌ان‌تی و مدل‌سازی در نرم‌افزار

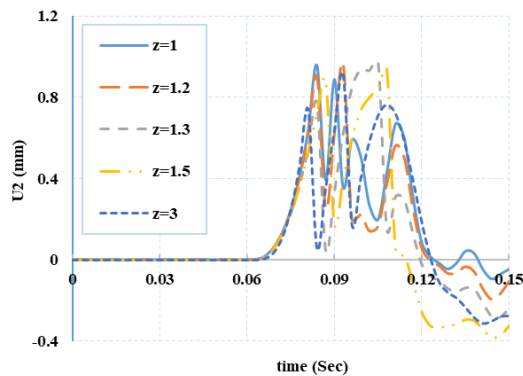
هیچ گونه نوسانی در مقدار فشار در زمان مشابه مشاهده نمی‌شود.

۴- تجزیه و تحلیل نتایج

۴-۱- فاصله مقیاس شده

برای بررسی اثر فاصله مقیاس شده، ۵ مقدار ۱، ۱/۲، ۱/۳، ۱/۵ و ۳ در نظر گرفته شده است. باقی شرایط مشابه مدل پایه می‌باشد.

با توجه به قرار گیری ماده منفجره در بالای مخزن همانطور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، تلاطم سطح مایع در حداکثر مقدار خود، تغییر محسوسی نکرده است. نتایج نشان داد با کاهش مقدار فاصله مقیاس شده، همان‌طور که انتظار می‌رفت، تغییر مکان و تنش وارد شده بر سقف، افزایش پیدا می‌کند.



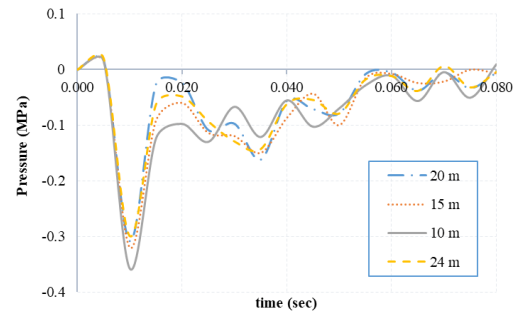
شکل ۱۴- تلاطم سطح مایع در فاصله های مقیاس شده مختلف

در واقع با افزایش تقریباً دو برابری وزن ماده منفجره، حداکثر فشار وارد بر سقف حدود ۴۰ درصد و حداکثر تغییر شکل سقف، ۱۵۰ درصد افزایش پیدا می‌کند.

خرابی فشاری، در مقدار فاصله مقیاس شده ۱/۳ حدود ۳۰ درصد مساحت سقف را شامل شده است. در حالی که با کاهش آن به ۱، ۹۰ درصد سقف دچار خرابی شده است. همچنین دیواره مخزن در قسمت اتصال به سقف، دچار خرابی فشاری شده است که می‌تواند به علت افزایش لنگر وارد بر دیواره باشد. با کاهش مقدار فاصله مقیاس شده، این خرابی افزایشی بسیار اندک دارد (شکل ۱۵ و شکل ۱۶).

۳-۵- ابعاد حوزه خاکی

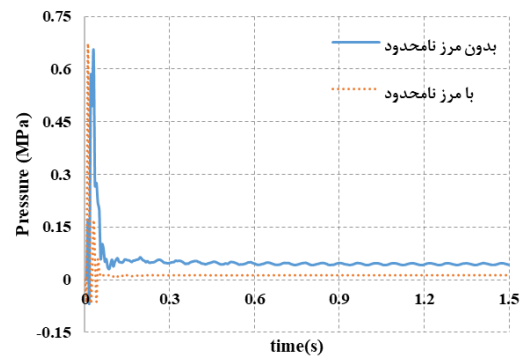
برای تعیین ابعاد حوزه خاکی، برای ۴ ابعاد ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۴ متر شبیه‌سازی انجام شد و باتوجه به مدت زمان تحلیل و وجود همگرایی در نتایج و توجه به این نکته که افزایش ابعاد حوزه خاکی بشدت زمان تحلیل را افزایش می‌دهد، ابعاد ۲۰ متر برای حوزه خاکی انتخاب شده است (شکل ۱۲).



شکل ۱۲- نمودار فشار- زمان در ابعاد مختلف حوزه خاکی

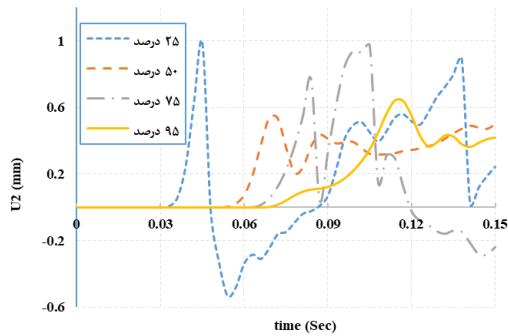
۳-۶- مرز جاذب

برای صحت از کارکرد مناسب مرز بینهایت، دو مدل، یکی با مرز بی‌نهایت و دیگری بدون مرز با شرایط کاملاً یکسان، تحت بار انفجار مدل شده‌اند. نمودار فشار-زمان در عمق میانی و در فاصله نزدیک به مرز حوزه خاکی در دو حالت با مرز و بدون آن در شکل ۱۳، نشان داده شده است.

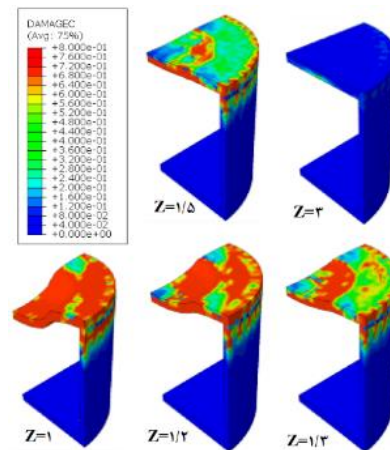


شکل ۱۳- نمودار فشار- زمان در دو مدل با مرز جاذب و بدون آن

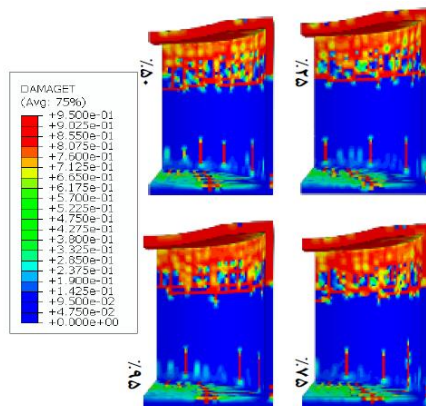
همان‌طور که ملاحظه می‌شود در حالت بدون مرز، نوسان در مقدار فشار، از زمان ۱۰ میلی‌ثانیه به بعد، مشاهده می‌شود که بدلیل انعکاس امواج از مرزها می‌باشد، این در حالیست که با وجود مرز جاذب و بدلیل جذب امواج و عدم بازگشت آن‌ها،



شکل ۱۷- تلاطم سطح مایع در عمق‌های مختلف مایع



شکل ۱۵- خرابی فشاری مخزن در فاصله‌های مقیاس شده مختلف

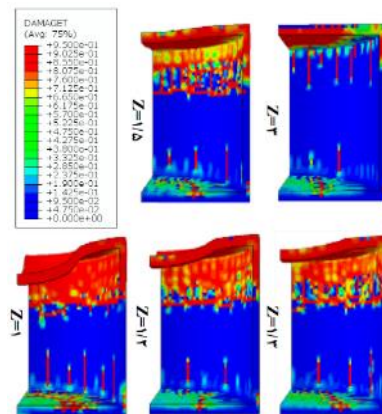


شکل ۱۸- خرابی کششی مخزن در عمق‌های مختلف مایع

باتوجه به شکل‌های بالا و دیگر تحلیل‌های انجام شده روی تاثیر عمق مایع، آغاز تلاطم سطح مایع نسبت معکوس با ارتفاع مخزن درون مخزن دارد. که به دلیل رسیدن سریعتر ارتعاشی است که از خاک بستر به کف مخزن و پس از آن به مایع وارد می‌شود. همانطور که انتظار می‌رود، تغییر عمق مایع، اثری بر تغییر شکل سقف و تنش سقف ندارد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که به علت نیروی جانبی کم در مقایسه با نیروی حاصل از انفجار، تغییر عمق مایع اثر محسوسی بر الگو و مقدار خرابی‌های مخزن ندارد.

۴-۳- نوع مایع

برای بررسی اثر مایع، ۲ مایع نفت و آب در نظر گرفته شده است. باقی شرایط مشابه مدل پایه می‌باشد. در شکل ۱۹ تا شکل ۲۱، به ترتیب نمودار تلاطم سطح مایع، خرابی فشاری و خرابی کششی در دو نوع مایع نشان داده شده است.



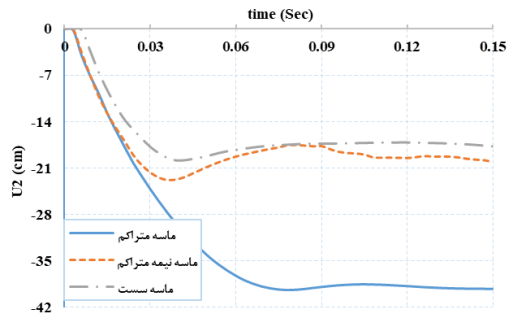
شکل ۱۶- خرابی فشاری مخزن در فاصله‌های مقیاس شده مختلف

با کاهش مقدار فاصله مقیاس شده، مقدار خرابی کششی در سقف و نیمه بالایی دیواره مخزن افزایش می‌یابد. این افزایش در دیواره در یک سوم بالای دیوار اتفاق می‌افتد که این خرابی بسیار بیشتر و وسیع‌تر از خرابی فشاری اتفاق می‌افتد. که به علت عملکرد ضعیف بتن در کشش می‌باشد.

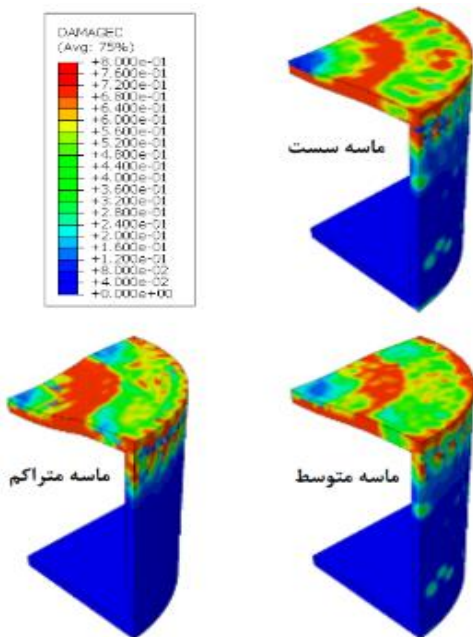
۴-۲- عمق مایع

برای بررسی اثر عمق مایع، چهار عمق مایع ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪، ۹۵٪ ارتفاع مخزن در نظر گرفته شده است. باقی شرایط مشابه مدل پایه می‌باشد. در شکل ۱۷ و شکل ۱۸، به ترتیب، نمودار تلاطم سطح مایع، و خرابی کششی در چهار عمق مایع نشان داده شده است.

پایه می‌باشد.
در شکل ۲۲ تا شکل ۲۴، به ترتیب تغییر شکل قائم مرکز سقف، خرابی فشاری و کششی در سه نوع خاک نشان داده شده است.

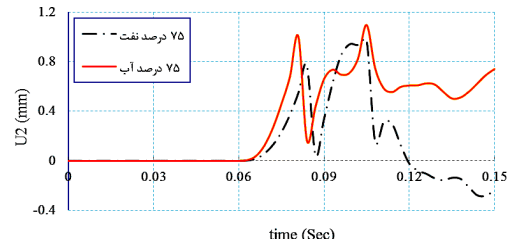


شکل ۲۲- تغییر شکل مرکز سقف مخزن در نفت و آب

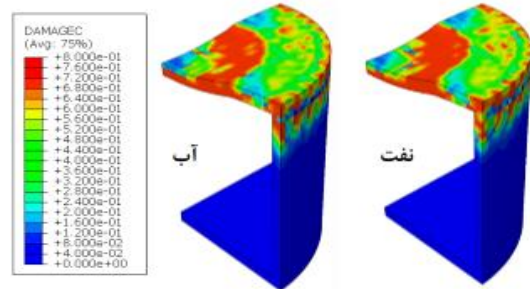


شکل ۲۳- خرابی فشاری در سه نوع خاک

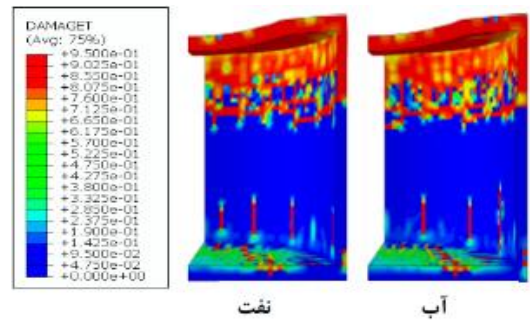
باتوجه به شکل‌های بالا و دیگر تحلیل‌های انجام شده روی تاثیر نوع خاک، با کاهش تراکم، به علت رسیدن سریعتر موج در خاک سست، نسبت به خاک متراکم به دیواره مخزن، زمان آغاز تلاطم افزایش جزئی دارد. همچنین با توجه به وجود حفره کمتر در خاک متراکم، نسبت به خاک سست، جذب انرژی در خاک متراکم کمتر اتفاق افتاده است و تنش وارد به سقف مخزن در این خاک بیشتر است. در واقع با تغییر خاک



شکل ۱۹- تلاطم سطح مایع در نفت و آب



شکل ۲۰- خرابی فشاری- نفت و آب

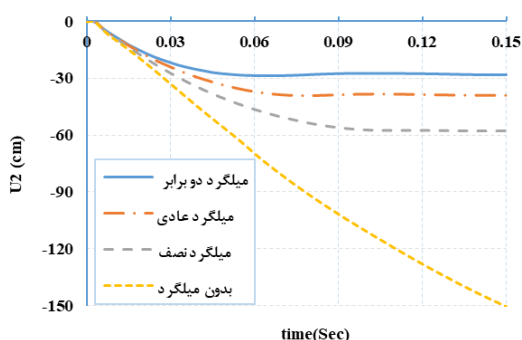


شکل ۲۱- خرابی کششی- نفت و آب

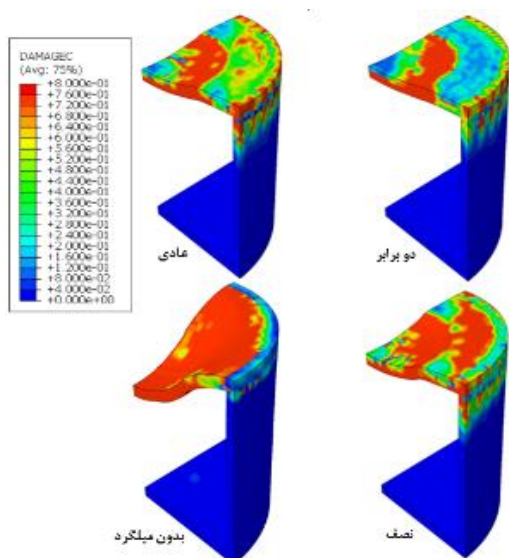
با توجه به شکل‌های بالا و دیگر تحلیل‌های انجام شده روی تاثیر نوع مایع، ارتفاع تلاطم در آب اندکی بیشتر از نفت بوده که به علت کم‌تر بودن لزجت آب نسبت به نفت می‌باشد. بدیهی است که تنش وارد به سقف و تغییر شکل آن ارتباطی با نوع مایع درون مخزن ندارد و در نتیجه تنش وارد بر سقف مخزن و تغییر شکل آن در دو حالت یکسان است. خرابی‌های فشاری و کششی در حالتی که مایع درون مخزن نفت یا آب باشد تغییری نکرده است که به علت اختلاف کم چگالی دو مایع و تلاطم اندک مایع در هر دو حالت نفت و آب می‌باشد.

۴-۴- نوع خاک

برای بررسی اثر خاک، سه خاک ماسه متراکم، ماسه متوسط و ماسه نرم در نظر گرفته شده است. باقی شرایط مشابه مدل



شکل ۲۵- تغییر شکل مرکز سقف مخزن در ۴ مقدار میلگرد

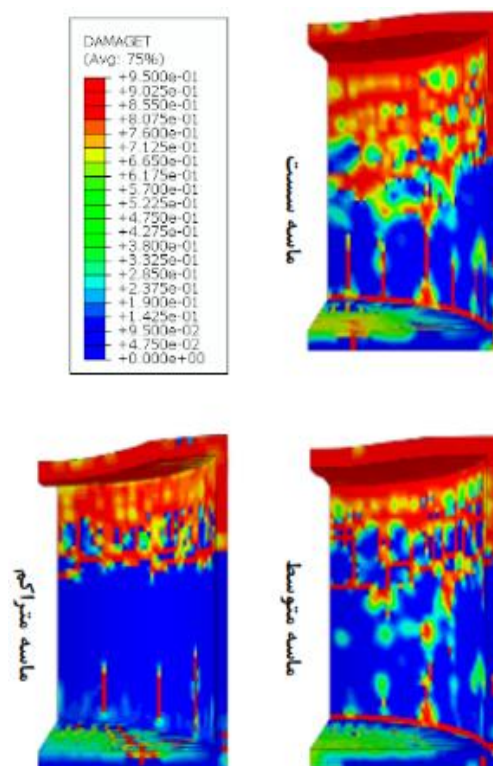


شکل ۲۶- خرابی فشاری مخزن در ۴ مقدار میلگرد

بنا بر نتایج به‌دست‌آمده و شکل ۲۵ تا شکل ۲۷، تغییر مقدار میلگرد با تغییر شکل رابطه مستقیم دارد بطوریکه با دو برابر کردن اندازه میلگردها، تغییر شکل حدود ۳۵ درصد کاهش، و با نصف کردن اندازه میلگردها، تغییر شکل، حدود ۵۰ درصد افزایش پیدا می‌کند. در حالتی که میلگردی در نظر گرفته نشود، تغییر شکل دائمی اتفاق می‌افتد که نشان از اهمیت وجود میلگرد در مقطع می‌باشد.

با افزایش مقدار میلگرد و تقویت مقطع، خرابی فشاری سقف مخزن کاهش پیدا کرده است. این خرابی تقریباً در قسمت مرکزی سقف ثابت است و در قسمت نزدیک به دیواره این تغییرات اتفاق می‌افتد. در حالت میلگرد دو برابر، حدود ۳۰ درصد، در حالت میلگرد اولیه، ۴۰ درصد و در حالت میلگرد نصف، حدود ۸۰ درصد سقف دچار خرابی شده است

از متراکم به سست، این افزایش حدود ۴۲ درصد می‌باشد. همچنین افزایش تغییر شکل در ماسه متراکم نسبت به ماسه سست، بیش از دو برابر است به دلیل افزایش محصور شدگی دیواره مخزن در ماسه سست نسبت به ماسه متراکم، خرابی در دیواره مخزن با کاهش تراکم، افزایش یافته است. تنش‌های موجود در خاک نیز در پایین حوزه خاکی و نزدیک سنگ بستر، در خاک سست نسبت به خاک متراکم، از نظر فراگیری، کمتر است که به علت وجود حفره بیشتر در خاک سست نسبت به خاک متراکم می‌باشد.



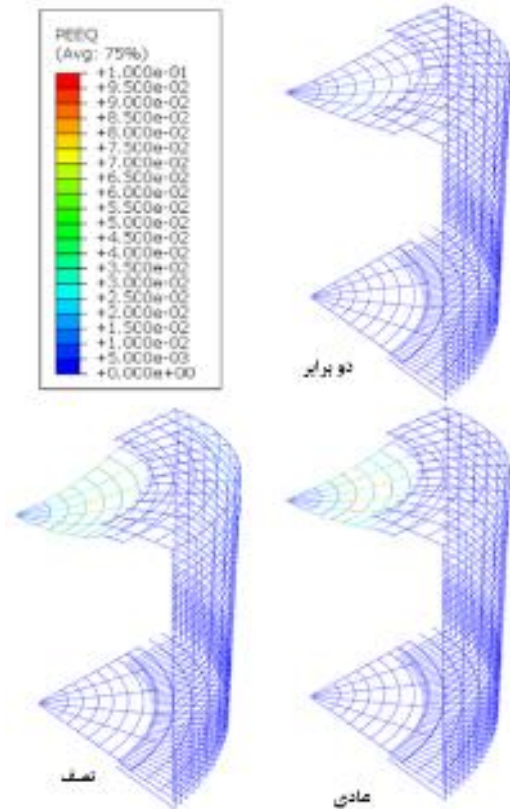
شکل ۲۴- خرابی کششی در سه نوع خاک

۴-۵- میلگرد

برای بررسی اثر میلگرد، ۴ حالت بدون میلگرد، میلگرد عادی (طبق نقشه)، نصف سطح مقطع میلگرد عادی و دو برابر سطح مقطع میلگرد عادی در نظر گرفته شده است. باقی شرایط مشابه مدل پایه می‌باشد.

در شکل ۲۵ تا شکل ۲۷، به ترتیب تغییر شکل قائم مرکز سقف، خرابی فشاری و کرنش خمیری در میلگرد در چهار مقدار میلگرد نشان داده شده است.

و در حالت بدون میلگرد سقف مخزن دچار خرابی کامل شده است.



شکل ۲۷- کرنش خمیری در میلگردها در ۴ مقدار میلگرد

در حالتی که میلگرد دوبرابر است، کرنش خمیری بسیار اندک است. در حالت میلگرد نصف نیز حداکثر کرنش خمیری بر خلاف حالت عادی از مرکز دورتر و مقدار آن حدوداً ۴۰ درصد کاهش پیدا می‌کند.

لازم به ذکر است، پارامترهایی نظیر مقاومت بتن و عمق دفن با فاصله مقیاس شده ثابت نیز شبیه‌سازی شده‌اند و به دلیل کم اهمیت تر بودن نتایج آن، نسبت به موارد ذکر شده، و احتراز از طولانی شدن مقاله نتایج آن آورده نشده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، رفتار کلی یک مخزن نفت بتن مسلح مدفون، تحت انفجار مدفون مطالعه شده است. پارامترهای فاصله

مقیاس شده، عمق مایع، نوع مایع و نوع خاک و مقدار میلگرد با استفاده از نرم‌افزار آباکوس با مقایسه با یک مدل پایه بررسی شد. بمنظور اطمینان از صحت نتایج، صحت سنجی برای اندرکنش خاک، سازه، ماده منفجره و هم برای اندرکنش مایع و مخزن تحت بار دینامیکی انجام شد. مقایسه‌ای نیز بین روابط آئین نامه و نتایج حاصل از نرم افزار در شبیه‌سازی انفجار مدفون صورت پذیرفت. و حساسیت مدل برای اندازه شبکه، ابعاد حوزه خاکی، مرز جاذب و تقارن مورد ارزیابی قرار گرفت.

مقایسه بین نتایج نشان می‌دهد که:

تلاطم سطح مایع در مخازن مدفون که تحت اثر انفجار مدفون قرار دارند بر خلاف مخازن زمینی‌ای که تحت اثر انفجار زمینی یا هوایی قرار دارند بسیار اندک می‌باشد. وجود میلگرد اهمیت بسزایی در تغییر شکل مخزن دارد بطوریکه با دو برابر کردن سطح مقطع میلگرد، تغییر شکل ۳۵ درصد کاهش و با نصف کردن آن، تغییر شکل حدود ۵۰ درصد افزایش می‌یابد. نبود میلگرد در مقطع نیز باعث خرابی کلی آن می‌شود.

خاک مناسب برای دفن مخزن باید طوری در نظر گرفته شود که هم تغییر شکل سقف مخزن از حد مجاز فراتر نرود و هم محصورشدگی مناسبی برای دیواره مخزن بوجود بیاید. ماسه نیمه متراکم گزینه مناسبی می‌تواند باشد. که باعث کاهش ۴۶ درصدی تغییر شکل نسبت به خاک سست و کاهش حدود ۸ در صدی مساحت خرابی ایجاد شده در مرکز سقف مخزن نسبت به خاک متراکم می‌شود.

بالای دیواره مخزن در محل اتصال به سقف مخزن ناحیه‌ای است که بیشترین خرابی‌ها بخصوص خرابی‌های کششی اتفاق می‌افتد که می‌توان با تغییر ضخامت یا افزایش میلگردها که نقش اساسی در عملکرد و جلوگیری از تغییر شکل‌های بزرگ ناشی از بار انفجار دارند، این نقاط را تقویت کرد. همچنین با تقویت کف مخزن می‌توان از اندک خرابی که در قسمت مرکزی کف مخزن اتفاق می‌افتد، جلوگیری کرد.

در مخزن مدفون تحت انفجار مدفون، ارتفاع مایع و نوع مایع اثر محسوسی بر مخزن و خرابی‌های ناشی از انفجار ندارد.

۶- مراجع

- Abaqus 6.14., (2014). Analysis User's Manual.
- Chen, H., Zhou, J., Fan, H., Jin, F., Xu, Y., Qiu, Y., Wang, P., & Xie, W., (2014). Dynamic responses of buried arch structure subjected to subsurface localized impulsive loading: Experimental study. *Impact Engineering*, 65, 89-101. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2013.11.004>.
- Ghaeli, N., & Halabian, A.M., (2008). The Behavior of Three-Dimensional Coordinated Liquid Damper Systems under the Effect of Two-Dimensional Excitations using the Finite Element Method. *4th National Congress of Civil Engineering, Iran*, (In Persian).
- Ghaemmaghami, A. R., & Kianoush, M. R., (2010). Effect of Wall Flexibility on Dynamic Response of Concrete Rectangular Liquid Storage Tanks under Horizontal and Vertical Ground Motions. *Journal of Structural Engineering*, 136(4), 441-451. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000123](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000123).
- Goel, M., Matsagar, V., Gupta, A., & Marburg, S., (2012). An Adridged Review of Blast Wave Parameters. *Defence Science*, 62, 300-305. <https://doi.org/10.14429/dsj.62.1149>.
- Hamdan, F. H., (2022). An Assessment of Eurocode 8–Part 4: Design of liquid storage tanks. *In European Seismic Design Practice-Research and Application* (pp. 521-529). Routledge.
- Holmquist, T. J., Johnson, G. R., & Cook, W., (1993). A Computational Constitutive Model for Concrete subjected to Large Strains, High Strain Rate, and High Pressures. *In 14th International Symposium on Ballistics* (Vol. 9, pp. 591-600).
- Housner, G. W., (1957). Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 47(1), 15-35. <https://doi.org/10.1785/BSSA0470010015>.
- Jankowiak, T., & Lodygowski, T., (2005). Identification of Parameters of Concrete Damage Plasticity Constitutive Model. *Foundations of Civil and Environmental Engineering*, 6(1), 53-69.
- Khan, A. S., & Huang, S., (1995). Continuum theory of plasticity. *John Wiley & Sons*.
- Koh, C. G., Teng, M. Q., & Wee, T. H., (2008). A Plastic-Damage Model for Light Weight Concrete and Normal Weight Concrete. *Concrete Structures and Materials*, 2, 123-136. <https://doi.org/10.4334/IJCSM.2008.2.2.123>.
- Larcher, M., & Casadei, F., (2010). Explosion in Complex Geometries: A Comparison of Several Approaches. *Protect Struct*, 2, 169-196. <https://doi.org/10.1260/2041-4196.1.2.169>.
- Livaoglu, R., (2008). Investigation of Seismic Behavior of Fluid–Rectangular Tank–Soil/Foundation Systems in Frequency Domain. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28(2), 132-146. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2007.05.005>.
- Lu, Y., Wang, Z. & Chong, K., (2005). A Comparative Study of Buried Structure in Soil Subjected to Blast Load Using 2D and 3D Numerical Simulations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25, 275-288. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2005.02.007>.
- Lysmer, J. & Kuhlemeyer, R., (1969). Finite Dynamic Model for Infinite Media. *Journal of Eng. Mech. Div. ASCE*, EM24, 859-877. <https://doi.org/10.1061/JMCEA3.0001144>.

- Lysmer, J., & Waas, G., (1972). Shear Waves in Plane Infinite Structures. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 98(1), 85-105. <https://doi.org/10.1061/JMCEA3.0001583>.
- Mittal, V., Chakraborty, T., & Matsagar, V., (2014). Dynamic Analysis of Liquid Storage Tank under Blast using Coupled Euler-Lagrange Formulation. *Thin-Walled Structures*, 84, 91-111. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.06.004>.
- Moslemi, M. & Kianoush, M. (2012). Parametric Study on Dynamic Behavior of Cylindrical Ground-Supported Tanks. *Engineering Structures*, 42, 214-230. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.04.026>.
- Smith, P. D., & Hetherington, J. G., (1994). Blast and Ballistic Loading of Structures.
- Veyera, G., & Ross, C., (1995). High Strain Rate Testing of Unsaturated Sands using a Split Hopkinson Pressure. *Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, (p. 31) .Missouri.
- Wang, Z., Lu, Y., Hao, H., & Chong, K., (2005). A Full Coupled Numerical Analysis Approach for Buried Structures Subjected to Subsurface Blast. *Computer Structure*, 83, 339-356. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2004.08.014>.
- Yang, Z., (1997). Finite Element Simulation of Response of Buried Shelters to Blast Loadings. *Finite Elements in Analysis and Design*, 24, 113-132. [https://doi.org/10.1016/S0168-874X\(96\)00033-9](https://doi.org/10.1016/S0168-874X(96)00033-9).

Assessment of buried reinforced concrete oil tanks against explosion

S.A. Hosseini*¹, M. Barati²

1- Assistant Professor; Faculty of Passive Defense, Malek Ashtar University of Technology, hoseini@mut.ac.ir

2- MSc Student in Faculty of Passive Defense; Malek Ashtar University of Technology, baraati@gmail.com

Received: 14 Nov 2023; Accepted: 24 Jul 2024
DOI: 10.22044/tuse.2024.13830.1483

Keywords

**Buried reservoir
Soil-structure interaction,
Liquid-structure interaction
Explosion**

Extended Abstract

Summary

In this research, the behavior of a buried reinforced concrete tank against explosion has been investigated using Abacus software. The results of this study show that for this buried tank under explosion, the junction of the wall with the roof of the tank is most exposed to damage.

Introduction

This research should comprehensively be viewed considering the situation of the country and the threats against it, and especially, the sensitive and strategic centers and vital installations of the country, such as storage tanks for water, oil, gas and petroleum products, that are always at risk of terrorist attacks. Buried reservoirs are among the most sensitive centers that, if damaged, can lead to social and environmental crisis. Therefore, it is necessary to study the behavior of these structures against explosion, in line with passive defense policies.

Methodology and Approaches

To simulate the soil, the Drucker-Prager behavioral model, the JWL explosion, and the dough-damaged concrete model, have been used. In this regard, first, the structure-soil interaction under explosion has been validated, and then, the structure-water interaction has been performed. Finally, the effect of the measured distance value, the effect of liquid depth, liquid type, soil type and the amount of rebar have been investigated.

Results and Conclusions

The results of this study show that for the buried tank under explosion, the junction of the wall with the roof of the tank is most exposed to damage. Suitable soil is semi-dense sand and the turbulence of the liquid surface in buried tanks is low. Moreover, by increasing the amount of rebar, deformations are significantly reduced so that by doubling the amount of rebar, the deformation decreases by 28% and by halving the rebar, the deformation increases by 46%.
