



Investigating the Effective Factors on Reducing the Vulnerability of Urban Gas Pipelines Against Explosive Threats

Behnam Salehi¹ | Mohammad Eskandari² | Mohammad Reza Fallah Ghanbari³ | Zahra Jamshidi⁴

Research Paper

Received:
21 April 2022
Revised:
8 June 2022
Accepted:
28 June 2022
Published:
21 September 2022
P.P: 103-120

ISSN: 2008-3564
E-ISSN: 2645-5285



Abstract

Buried pipelines, which are used to distribute water, gas, oil, etc., are considered as one of the important arteries. Experiences from past wars confirm that the attacking country devotes its attention to bombing and destroying vital and sensitive centers. Gas pipelines, as one of the important transmission arteries during war, can cause a lot of human and financial losses if damaged. In this article, the degree of vulnerability of buried city gas steel pipes due to explosion has been determined and the methods of reducing the vulnerability of pipelines have been investigated. For this purpose, while preparing a three-dimensional model of the pipe-soil system in ABAQUS software, to study the effect of effective factors on pipe behavior, including pipe diameter, diameter-to-thickness ratio, soil internal friction angle, soil type, explosives consumption, pipe burial depth, distance Blasting up to the pipe burial site, the deformation capacity of the pipe has been investigated according to the ALA regulations. Soil was modeled using 3D Solid elements and pipe with Shell element. For parametric studies, analyzes were performed using the finite element method. Studies for diameters of 4 and 12 inches, ratio of diameter to thickness of 26, 21 and 35, burial depth of 1, 2, 3 and 4 meters, the amount of explosion charge of 15, 30, 45, 60 and 200 kg of TNT and for hard sandy soil, Softening was done. The results showed that proper burial depth has the most effect in order to reduce the vulnerability of pipelines against explosive threats. By increasing the thickness of the pipe and increasing the diameter and using soft sandy soil around the pipe, a better behavior of the pipe during the explosion was observed.

Keywords: Effective Factors; Gas Pipelines; Vulnerability; Explosive Ordnance.

1. . Corresponding Author: Senior Civil Defense Civil Engineer, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
Salehibehnam9@gmail.com
2. Assistant Professor, Malik Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
3. Ph.D Candidate, Department of health in disasters and emergencies, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.
4. Ph.D. Candidate, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

Cite this Paper: Salehi, B & Eskandari, M & Fallah Ghanbari, M.R & Jamshidi, Z . (2022). Investigating the Effective Factors on Reducing the Vulnerability of Urban Gas Pipelines Against Explosive Threats. *Crisis Management and Emergency Situations*, 15(2), 103–120.



سال چهاردهم
تابستان ۱۴۰۱

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۳/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۶/۳۰

صص: ۱۲۰-۱۰۳

شابا چاپی: ۲۰۰۸-۳۵۶۴
الکترونیکی: ۲۶۴۵-۵۲۸۵



بررسی عوامل مؤثر بر کاهش آسیب پذیری خطوط لوله گاز شهری در مقابل تهدیدات انفجاری

بهنام صالحی^۱ | محمد اسکندری^۲ | محمدرضا فلاح قنبری^۳ | زهرا جمشیدی^۴

چکیده

خطوط لوله مدفون که برای توزیع آب، گاز، نفت و غیره مورد استفاده قرار می گیرند، به عنوان یکی از شریان های حیاتی مهم مطرح است. تجارب حاصل از جنگ های گذشته مؤید آن است که کشور مهاجم توجه خود را صرف بمباران و انهدام مراکز حیاتی و حساس می نماید. خطوط لوله گاز به عنوان یکی از شریان های مهم انتقال در زمان جنگ در صورت آسیب می تواند خسارات جانی و مالی زیادی وارد آورد. در این مقاله میزان آسیب پذیری لوله های فولادی مدفون گاز شهری بر اثر انفجار تعیین و روش های کاهش آسیب پذیری خطوط لوله مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور ضمن تهیه مدل سه بعدی از سیستم خاک لوله در نرم افزار ABAQUS، به مطالعه اثر عوامل مؤثر بر رفتار لوله شامل قطر لوله، نسبت قطر به ضخامت لوله، زاویه اصطکاک داخلی خاک، نوع خاک، میزان خرج مواد منفجره، عمق دفن لوله، فاصله انفجار تا محل دفن لوله، بر ظرفیت تغییر شکل لوله مطابق با آیین نامه ALA، مورد بررسی قرار گرفته است. خاک با استفاده از المان های سه بعدی Solid و لوله با المان Shell مدل شد. برای مطالعات پارامتریک، تحلیل ها با استفاده از روش المان محدود انجام گرفت. مطالعات برای قطرهای ۴ و ۱۲ اینچ، نسبت قطر به ضخامت ۲۶،۲۱ و ۳۵، عمق دفن ۱، ۲، ۳ و ۴ متر، میزان خرج انفجار ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۲۰۰ کیلوگرم TNT و برای جنس خاک ماسه ای سخت، نرم و رسی انجام شد. نتایج نشان داد که عمق دفن مناسب بیش ترین تأثیر را به منظور کاهش آسیب پذیری خطوط لوله در برابر تهدیدات انفجاری دارد. با افزایش ضخامت لوله و افزایش قطر و به کارگیری خاک ماسه ای نرم در اطراف لوله، رفتار بهتری از لوله در هنگام وقوع انفجار مشاهده شد.

کلیدواژه ها: عوامل مؤثر؛ خطوط لوله گاز؛ آسیب پذیری؛ تهدیدات انفجاری.

۱. نویسنده مسئول: کارشناس ارشد عمران پدافند غیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

Salehibehnam9@gmail.com

۲. استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

۳. دانشجوی دکتری سلامت در بلايا و فوریت ها، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

۴. دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

استناد: صالحی، بهنام و اسکندری، محمد و فلاح قنبری، محمدرضا و جمشیدی، زهرا. (۱۴۰۱). راهبردهای مقابله با بحران امنیتی استان خوزستان از سال ۱۳۸۴ تا ۱۴۰۰ با تأکید بر حوزه اقتصادی. *فصلنامه مدیریت بحران و وضعیت های اضطراری*، ۱۴(۲)، ۱۲۰-۱۰۳.

مقدمه

با توجه به تهدیداتی که کشور در برهه‌های زمانی مختلف و با گستردگی و شدت متفاوت با آن روبه‌رو است نیاز به احداث سازه‌ها و تأسیسات مقاوم، ضرورت ملی تلقی می‌شود. خطوط انتقال گاز یکی از مهم‌ترین شریان‌های حیاتی به منظور تأمین انرژی در جوامع امروزی محسوب می‌شود. تجربه تهدیدات امنیتی نشان می‌دهد دشمن تمام توان خود را برای نابودی مراکز پالایشگاهی و منابع تأمین انرژی به کار می‌گیرد. از این‌رو حفظ عملکرد این تأسیسات در برابر انفجار عامل مهمی محسوب می‌شود زیرا لوله‌های گاز حاوی مواد اشتعال‌پذیر هستند و نشت گاز از آن‌ها و آتش‌سوزی‌های پس از آن می‌تواند موجب صدمات جانی و خسارت‌های مالی گردد. از طرف دیگر نابودی خطوط لوله گاز با توجه به اثرات شریانی آن می‌تواند بر سایر شریان‌های حیاتی نظیر تولید برق اثرات سوء بر جای گذارد و باعث مشکل و تأخیر در تداوم فعالیت آن‌ها شود.

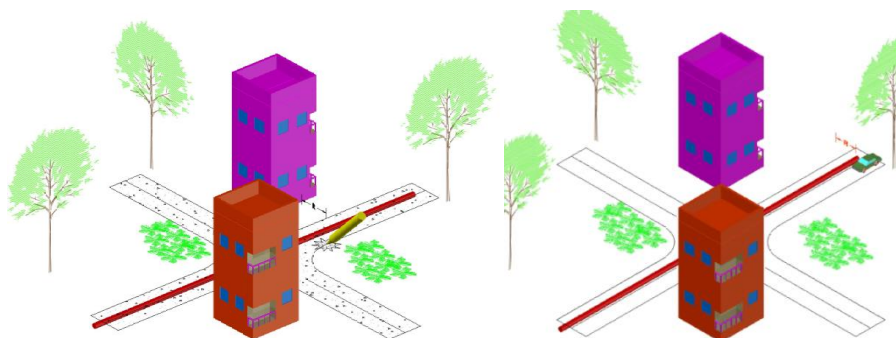
آقاسی و همکاران در پژوهشی تأثیر مشخصات خاک بر تأسیسات فولادی مدفون در نرم‌افزار ABAQUS مورد بررسی قرار دادند [۱،۲]. در این پژوهش مدل خاک سه فاز؛ از نوع دراگر پراگر^۱ در نظر گرفته شد و لوله‌های با قطر بالای ۱ m با عمق دفن بیشتر از ۳ m مورد بررسی قرار گرفتند. مطالعات آن‌ها نشان داد که با افزایش مدول الاستیسته خاک اطراف لوله، جابه‌جایی کم‌تری در لوله ایجاد می‌شود و تنش‌های ایجاد شده در لوله کاهش می‌یابد. اولاریواژ^۲ و همکاران [۳] به منظور پیش‌بینی اثر انفجار بر روی خطوط لوله با به کارگیری نرم‌افزار آباکوس مطالعاتی را انجام داده‌اند. اکبردوست و همکاران [۴] تأثیر موج انفجار را بر روی لوله‌های فولادی روی سطح زمین در نرم‌افزار Autodyn به صورت مدل‌سازی ۲ بعدی لوله مورد بررسی قرار دادند و میزان تغییر شکل لوله را در انفجار در فواصل مختلف مورد بررسی قرار دادند. مطالعات آن‌ها نشان داد با کم شدن فاصله انفجار تغییر شکل زیادی در لوله ایجاد می‌شود از این‌رو ضروری است که فاصله انفجار رعایت شود.

1. Drauger-Pruger
2. Olarewaju

روش تحقیق و ابزارها

در این پژوهش دو سناریو فرض شده است:

۱. گروهک‌های تروریستی و دشمن داخلی و خارجی مواد منفجره را با استفاده از خمپاره و یا راکت‌انداز به محدوده محل دفن خطوط لوله پرتاب می‌کنند در این سناریو میزان آسیب‌پذیری و حد مقاومت لوله مورد بررسی قرار گرفته است.
۲. در سناریوی دوم فرض شده است که تروریست‌ها ماشین حامل مواد منفجره را در کنار خیابان و در نزدیکی محل دفن لوله منفجر می‌کنند. در این سناریو میزان آسیب‌پذیری و مقاومت خطوط لوله مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۱ شماتیک این سناریو نشان داده شده است.



شکل ۱. سناریوی اصابت مستقیم (تصویر سمت راست) و انفجار غیر مستقیم (تصویر سمت چپ) و تأثیر آن بر خطوط لوله گاز

خمپاره‌ها و راکت‌ها وزنی در حدود ۵ تا ۷۰ کیلوگرم دارند [۶] که در این مدل‌سازی وزن‌های ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ کیلوگرم لحاظ شده است. وزن مواد منفجره موجود در خودرو ۲۰۰ کیلوگرم لحاظ گردید. به منظور مدل‌سازی اثر انفجار بر لوله‌های مدفون در خاک از نرم‌افزار ABAQUS استفاده گردید. این نرم‌افزار یکی از پرکاربردترین ابزارها در زمینه انجام آنالیزهای اجزای محدود است. این نرم‌افزار قابلیت‌های گسترده‌ای را برای شبیه‌سازی در کاربردهای خطی و غیرخطی فراهم می‌کند. مسائلی که دارای اجزای متعدد و مصالح مختلف هستند را می‌توان با

تعریف هندسه هر جزء و اختصاص دادن مصالح تشکیل دهنده آن و سپس تعریف اندرکنش بین اجزا شبیه سازی کرد. یک تحلیل کامل در برنامه ABAQUS معمولاً از سه مرحله پیش پردازش، پردازش و بعد از پردازش تشکیل شده است:

■ مرحله پیش پردازش

در این مرحله مدل مسئله با استفاده از معادلات و روابط ساخته می شود و یک فایل ورودی ABAQUS ایجاد می شود. مدل را معمولاً می توان به صورت گرافیکی با استفاده از ABAQUS/CAE و یا سایر پیش پردازنده ها ایجاد کرد و یا می توان فایل ورودی ABAQUS را با استفاده از یک ویرایشگر متن مثل Notepad ساخت.

■ پردازش

پردازش معمولاً به صورت یک پروسه در پس زمینه اجرا می شود، مرحله ای است که در آن ABAQUS استاندارد و یا صریح، مسئله عددی را که در مدل تعریف شده حل می کند. مسئله هایی از خروجی تحلیل تنش عبارت است از تغییر مکان ها و تنش هایی که در فایل های باینری ذخیره می شود و برای مرحله پس از پردازش مورد استفاده قرار می گیرد. بسته به پیچیدگی مسئله ای که باید تحلیل شود و قدرت کامپیوتری که تحلیل را انجام می دهد، زمان تحلیل می تواند بین چند ثانیه تا چند روز طول بکشد.

■ مرحله بعد از پردازش

ارزیابی نتایج را می توان بعد از اتمام مرحله پردازش یعنی زمانی که تنش ها تغییر مکان ها و سایر متغیرهای اساسی محاسبه شده اند انجام داد. ارزیابی معمولاً با استفاده از ماژول گرافیک ساز (Visualization) یا سایر پس پردازنده ها انجام می شود. ماژول گرافیک ساز داده های فایل خروجی باینری را می خواند و گزینه های متفاوتی مانند کانتورهای رنگی، انیمیشن، فرم تغییر شکل یافته و یا نمایش داده ها به صورت نمودار X-Y برای نمایش نتایج دارد [۱].

متغیرهای مورد بررسی در این مطالعه شامل قطر لوله، نسبت قطر به ضخامت لوله، زاویه اصطکاک داخلی خاک، نوع خاک، میزان خرج مواد منفجره، عمق دفن لوله، فاصله انفجار تا محل دفن است که همگی به عنوان متغیرهای مستقل در این مطالعه هستند میزان تغییر شکل لوله

به عنوان متغیر وابسته است. از میان این متغیرها قطر لوله و نسبت قطر به ضخامت با هم مرتبطند و به همین نسبت زاویه اصطکاک داخلی خاک و نوع خاک نیز با یکدیگر مرتبط هستند.

در این مقاله بارگذاری انفجاری در مدل از تحلیل دینامیکی Dynamic Explicit و با تعریف بارگذاری Amp تعریف و لحاظ گردید. المان‌های خاک از نوع RADC انتخاب شد. خاک در این پژوهش با استفاده از معیار دراگر-پراگر و با در نظر گرفتن سخت‌شوندگی مدل شده است و مدل‌سازی برای ۴ نوع خاک با تفاوت‌هایی در مشخصات مکانیکی خاک‌ها انجام شده است. لوله با استفاده از المان‌های RFS مدل شد [۵]. همچنین مشخصات مکانیکی لوله برای لوله‌های فولادی از جنس L5 API در نظر گرفته شده است. برای مدل کردن رفتار خمیری لوله فولادی از مدل فون میسر^۲ و با در نظر گرفتن سخت‌شوندگی ایزوتروپیک استفاده شده است. برای مدل کردن کامپوزیت از المان‌های ۴ گره‌ای پوسته‌ای (RFS) نرم افزار ABAQUS استفاده شده است. همچنین contact بین لوله و خاک از نوع hard contact با ضریب اصطکاک ۰/۳ فرض گردیده است. ابعاد خاک با کمک آنالیز حساسیت ۱۰۰×۵۰×۲۵m لحاظ گردید.

اعتبار روش تحلیلی اتخاذ شده

اعتبار روش تحلیلی اتخاذ شده به مطالعات قبلی صورت گرفته در این زمینه که با استفاده از نرم افزار ABAQUS به مدل سازی اثر انفجار بر خاک و خطوط لوله پرداخته شده ارجاع داده می شود [۱،۲،۳]. علاوه بر این می توان در مطالعات آتی با استفاده از روابط تجربی و محاسبات دستی اعتبار نتایج را مورد آزمون قرار داد.

تئوری و محاسبات

از نکات مهم در بارگذاری انفجاری در خاک، محاسبه مقدار حداکثر بیشینه فشار در فاصله معینی از مرکز انفجار است که به فشار مبنای انفجار معروف است که با Ps نشان داده می شود. معمولاً در مراجع معتبر برای محاسبه بیشینه فشار مبنای رابطه‌هایی برحسب Z بیان شده است که مقدار آن از رابطه ۱ بیان می شود [۶].

1. American-Petroleum Institute
2. Fon Mises

$$\frac{x}{\sqrt[3]{W}} = \epsilon \cdot \frac{f_c}{\sqrt[3]{W}} \left(\frac{2.52R}{\sqrt[3]{W}} \right)^{1-n} \quad \text{رابطه (۱)}$$

X: حداکثر جابه‌جایی ذرات خاک بر حسب متر
W: جرم خرج معادل TNT بر حسب کیلوگرم

R: فاصله نقطه مورد نظر بر حسب متر
C: سرعت لرزه‌ای بر حسب متر بر ثانیه

n: ضریب کاهندگی موج که متناسب با نوع خاک انتخاب می‌شود و معیاری برای توان استهلاک انرژی امواج در خاک است. مقدار این ضریب از طریق آزمایش تک محوری بر روی نمونه غیر محصور به دست می‌آید.

f_c: ضریب اتصال (جفت‌شدگی) که با تعیین عمق مرکز انفجار از سطح زمین از شکل ۲ به دست می‌آید. با افزایش جفت‌شدگی ماده انفجاری و زمین، تأثیر سلاح افزایش پیدا می‌کند. در مورد خرج‌های انفجاری مدفون و خاک اطراف آن عددی کوچک‌تر از یک اختیار می‌شود [۶].

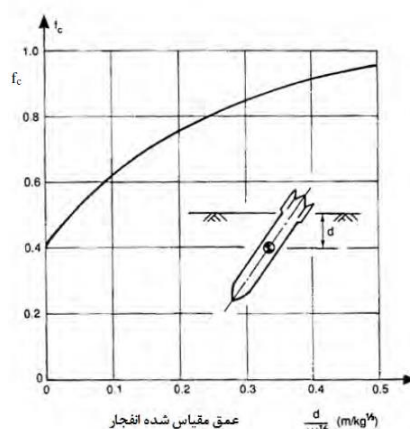


Figure 2. Error! No text of specified style in Error! Reference source not found.

document. میزان ضریب f_c بر اساس مقیاس (Z)

جدول ۱. Error! No text of specified style in document. میزان ضریب کاهندگی و k برای انواع

خاک‌ها

نشریه مدیریت بحران و وضعیت‌های اضطراری

ضریب k	ضریب کاهندگی (n)	نوع خاک
۳۰,۰۰۰	۱/۵	رس اشباع
۲۰,۰۰۰	۲/۵	لای و رس نیمه اشباع
۱۰,۰۰۰	۲/۵	ماسه خیلی متراکم، خشک و مرطوب
۵,۰۰۰	۲/۷۵	ماسه متراکم، خشک و مرطوب
۲,۰۰۰	۳/۰	ماسه سست، خشک و مرطوب
۱,۰۰۰	۳/۲۵	ماسه خیلی سست، خشک و مرطوب

مقدار فشار مبنای انفجار طبق رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$p_{so} = \frac{6.7}{Z^3} + 1 \left(p_{so} > 10 \frac{kg}{cm^2} \right) \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$p_{so} = \frac{0.975}{Z^1} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019 \quad (0.1 < p_{so} < 10 \frac{kg}{cm^2})$$

زمان تداوم انفجار یا مدت زمان مثبت انفجار مدت زمانی است که در آن فشار انفجار بیش از فشار محیطی است. این زمان علاوه بر اینکه به مدت تداوم بیشینه فشار و مقدار فشار بازتاب انفجار بستگی دارد به سرعت حرکت موج شوک نیز وابسته است. در دستورالعمل ۵TM-۱۳۰۰ نموداری برای محاسبه مدت زمان فاز مثبت ارائه شده که توسط ایزدی فرد و ماهر در رابطه ۳ خلاصه شده است.

$$\log_{10} \left(\frac{t_d}{W^{1/3}} \right) = 2.5 \log_{10}(Z) + 0.28 \quad Z < 1$$

$$\log_{10} \left(\frac{t_d}{W^{1/3}} \right) = 0.3 \log_{10}(Z) + 0.28 \quad Z > 1$$

رابطه (۳)

تغییرات فشار زمان براساس رابطه فردلاند^۱ از طریق رابطه ۴ بیان می‌شود.

$$p(t) = p_s \left[1 - \frac{t}{t_s} \right] \exp\left(\frac{-bt}{t_s}\right) \quad \text{رابطه (۴)}$$

در این رابطه b مشخصه شکل موج است که تابعی از حداکثر فشار P_s بوده و مقدار آن متناسب با مشخصه‌های انفجار که در ادامه معرفی می‌شود تعیین می‌شود. t_s مدت تداوم فاز مثبت است. فاز منفی موج اغلب خیلی ضعیف‌تر و بسیار تدریجی‌تر از فاز مثبت است و به همین دلیل از اثر آن در بمب‌گذاری صرف نظر می‌شود [۶].

با توجه به ضرورت مقاوم‌سازی خطوط لوله گاز شهری از نظر پدافند غیرعامل سعی بر آن شده است که از قطر لوله‌های شهری به قطر ۴ اینچ و لوله‌های انتقال به قطر ۱۲ اینچ و لوله‌های شبکه توزیع به قطر ۸ و ۱۰ اینچ جهت محاسبات استفاده شود. مشخصات لوله‌های مورد استفاده در جدول ۲ آمده است. با توجه به تنوع لوله‌های مورد استفاده از چند نمونه لوله با ضخامت‌های مختلف برای مدل‌سازی استفاده شده است. مدل‌سازی برای لوله ۱۲ اینچ فشار ۲۵۰ psi و برای لوله ۶ و ۴ اینچ فشار ۶۰ psi در نظر گرفته شده است. با توجه به لوله‌های مورد استفاده در ایران، خواص مکانیکی لوله فولادی از نوع $37ST^2$ در نظر گرفته شد. چگالی لوله فولادی برابر ۷۸۵۰ Kg/m^۳، مدول یانگ برابر ۲۱۰ Gpa و ضریب پواسون برابر ۰.۳۰ می‌باشد. به منظور مطالعه تأثیر خاک بر رفتار لوله‌ها تحت انفجار سه نوع خاک ماسه‌ای سخت، ماسه‌ای نرم و رسی مورد بررسی قرار گرفته است و عمق دفن ۱ و ۲ و ۳ و ۴ متر لحاظ گردید. میزان خرج ماده منفجره نیز ۱۵ و ۲۰ و ۳۰ و ۴۵ و ۲۰۰ کیلوگرم لحاظ گردید.

جدول ۲. مشخصات لوله‌های به کار گرفته شده در مدل‌سازی

ردیف	قطر (in)	ضخامت (mm)	قطر (in)	ضخامت (mm)	قطر (in)	ضخامت (mm)
۱	۴	۸.۶	۱۲	۷.۸	۸	۱۱
۲	۴	۷.۸	۱۲	۱۱	۸	۳.۱۴
۳	۴	۱۰	۱۲	۳.۱۴	۱۰	۱۱
۴	۴	۱۴	۱۲	۲۱	۱۰	۳.۱۴

1. Ferdeland
2. Standard 37

سطح عملکردی خرابی لوله

سطح عملکردی مطلوب لوله‌ها مطابق با دستورالعمل ALA^۱ [۷] انتخاب شده است. این سطح عملکرد عبارت است از عدم شکست لوله و از دست ندادن قابلیت نگهداری محتویات درون لوله در موقع انفجار به منظور دستیابی به سطح عملکرد مطلوب در این تعریف به‌طور کلی روابط زیر باید برقرار باشد:

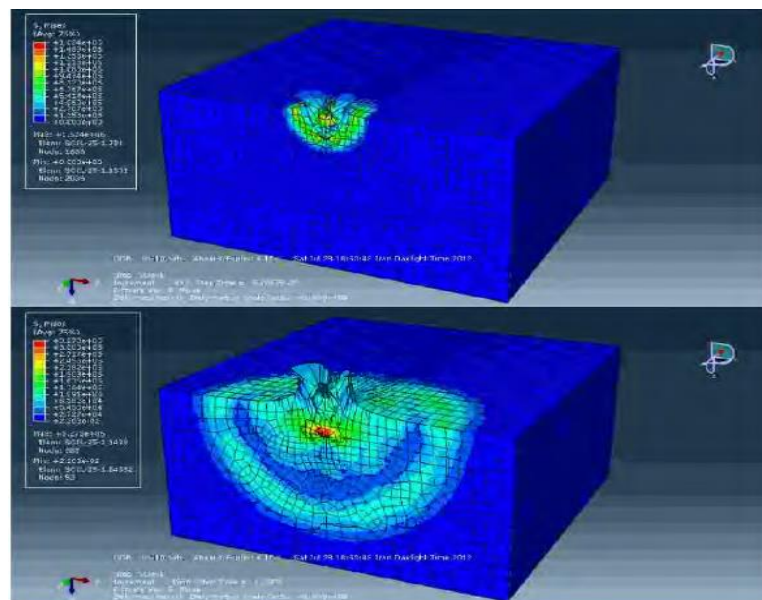
کرنش کششی: محدود نمودن کرنش کششی حداکثر ۰.۴٪ برای لوله‌های فولادی.

کرنش فشاری: محدود نمودن کرنش فشاری به مقدار به‌دست آمده از رابطه (۴).

$$\varepsilon_{cr} = 0.88 \left(\frac{t}{R} \right) \quad \text{رابطه (۵)}$$

نتایج مطالعه

در این پروژه سعی شد در گام اول سناریویی مناسب در راستای تهدید خطوط لوله تعریف گردد و در گام دوم در راستای سناریو مورد نظر نوع و ابزار تهدید طبقه‌بندی و مشخص شود و میزان خرج مواد منفجره تعیین گردد. در گام سوم میزان آسیب‌پذیری که ابزار تهدید مورد نظر می‌تواند به لوله وارد کند مشخص گردد و در گام چهارم راهکارهای موجود به منظور کاهش آسیب‌پذیری خطوط لوله مورد بررسی قرار گیرد. در این راستا به منظور بررسی کاهش آسیب‌پذیری خطوط لوله در دو سناریوی بررسی شده اثر افزایش ضخامت لوله، افزایش قطر، افزایش عمق دفن، افزایش فاصله انفجار و تغییر جنس خاک به صورت جداگانه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در شکل ۳ شماتیک تحلیل مدل انفجار در نرم‌افزار نشان داده شده است.

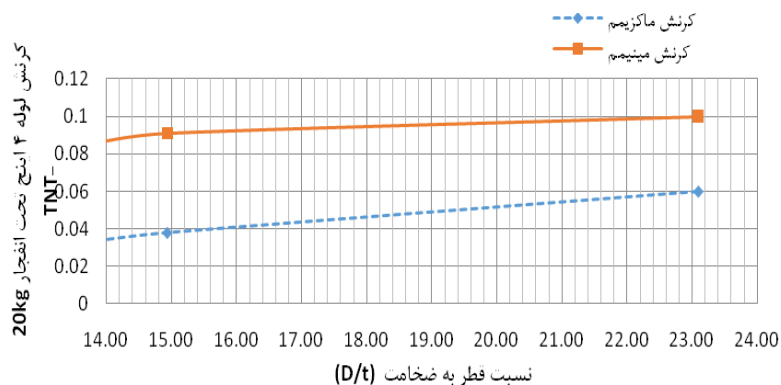


شکل ۳. تحلیل مدل انفجار در نرم افزار

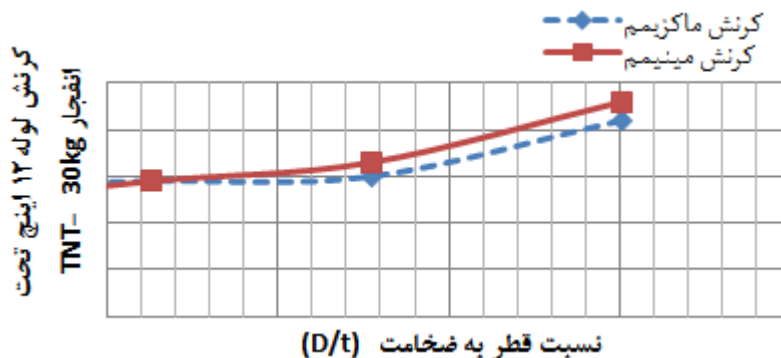
۱- نتایج آسیب پذیری خطوط لوله در سناریوی تهدید ۱

نتایج نشان داد به ازای خرج ماده منفجره بیش از ۲۰ کیلوگرم برای لوله ۴ اینچ، ۳۰ کیلوگرم برای لوله ۱۲ اینچ و ۴۰ کیلوگرم برای لوله ۱۶ اینچ رفتار لوله از سطح عملکردی مطلوب فراتر رفته و دچار ترک خوردگی و انفجار می گردد. در بررسی کاهش آسیب پذیری، میزان خرج مواد منفجره راکت و خمپاره در سناریوی ۱ لحاظ گردید و به منظور کاهش آسیب پذیری و حفظ عملکرد لوله در انفجارهای با خرج بیشتر فاکتورهای زیر به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفت:

■ اثر ضخامت لوله بر کاهش آسیب پذیری



شکل ۴. اثر نسبت D/t به کرش لوله ۴ اینچ و انفجار به ازای خرج ماده انفجاری ۲۰ کیلوگرم

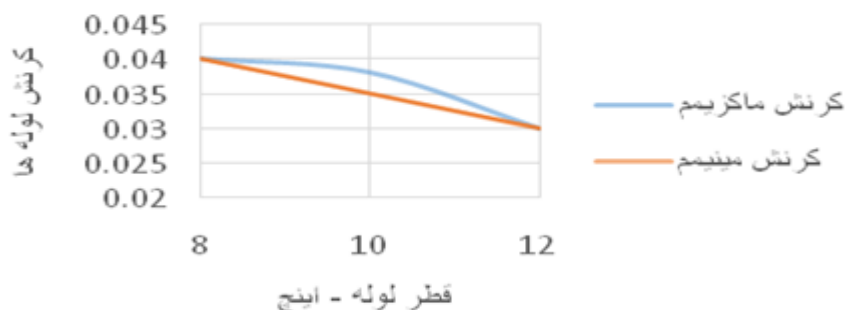


۵. اثر نسبت D/t به کرش لوله ۱۲ اینچ بر اثر انفجار خرج انفجاری ۳۰ کیلوگرم

همان‌طور که در **Error! Reference source not found.** ۴ و ۵ مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت رفتار لوله بهتر می‌شود زیرا با افزایش ضخامت لوله نسبت (D/t) کاهش می‌یابد و پایداری لوله در برابر کماتش افزایش می‌یابد از این‌رو در برابر موج دینامیکی انفجار رفتار مقاوم‌تری را از خود نشان می‌دهد و کرش‌های فشاری و کششی کاهش می‌یابد. برای لوله ۱۲ اینچ مشاهده می‌شود با ۲ برابر کردن ضخامت لوله کرش‌ها و تغییر شکل‌های نسبی حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد و باعث حفظ عملکرد لوله ۱۲ اینچی تحت انفجار ۳۰ کیلوگرم ماده منفجره در فاصله ۱ متری (از محل انفجار) خواهد شد. از این‌رو به‌عنوان گزینه‌ای برای مقاوم‌سازی لوله این شیوه راه‌حل مناسبی از لحاظ فنی نیست.

■ اثر افزایش قطر لوله بر کاهش آسیب پذیری

به منظور افزایش مقاومت لوله در برابر امواج انفجار می توان قطر لوله را افزایش داد. با افزایش قطر لوله نسبت D/t افزایش یافته و باعث افزایش سختی لوله در برابر شوک انفجار می شود و کرنش ها و تغییر شکل های ایجاد شده در لوله کاهش می یابد. همان طور که در **Error!** **Reference source not found.** مشاهده می شود با ثابت نگه داشتن ضخامت و افزایش $1/5$ برابری قطر کرنش فشاری و کششی لوله حدود ۲۰ درصد کاهش می یابد.

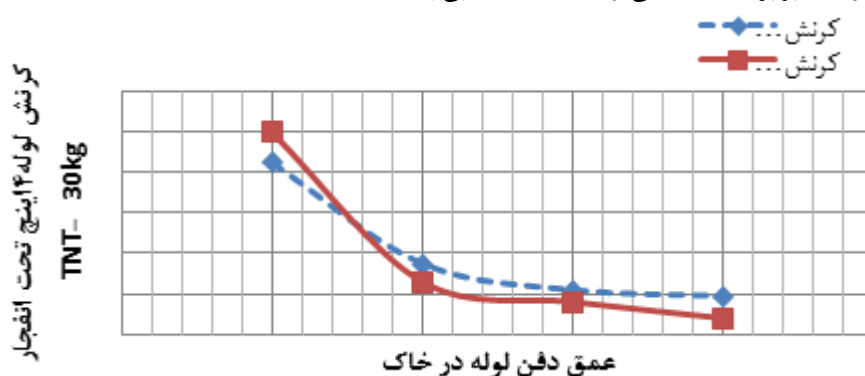


شکل ۶. تأثیر قطر لوله بر کرنش لوله با عمق دفن ۱ متر و فاصله انفجار ۱ متر و خرج TNT ۳۰ کیلوگرم
دلیل این رفتار آن است که با افزایش قطر لوله سختی لوله نیز افزایش می یابد؛ اما این نکته را نیز باید مدنظر داشت که فشار موج انفجار بر لوله نیز افزایش می یابد؛ زیرا با افزایش قطر لوله اندرکنش لوله با خاک نیز بیشتر می شود. در مقایسه با افزایش ضخامت لوله می توان نتیجه گرفت که در لوله های با قطر پایین در حدود ۴ اینچ، با ۲ برابر کردن قطر می توان عملکرد لوله به ازای خرج ۳۰ کیلوگرم ماده منفجره را حفظ کرد در صورتی که با افزایش ۲ برابری ضخامت لوله سطح عملکرد لوله به ازای خرج ۲۰ کیلوگرم ماده منفجره حفظ شده است. از این رو توصیه می شود به منظور مقاوم سازی لوله های با قطر پایین از گزینه افزایش قطر به جای افزایش ضخامت استفاده شود؛ زیرا تأثیر بالاتری در تغییر شکل لوله و سختی لوله می گذارد. از طرف دیگر با میزان وزن فولاد مصرفی یکسان می توان عملکرد بهتری از لوله را مشاهده کرد.

■ اثر افزایش عمق دفن لوله بر کاهش آسیب پذیری

افزایش عمق دفن یکی از روش هایی است که با استفاده از آن می توان میزان آسیب پذیری لوله را در برابر انفجار کاهش داد. با افزایش عمق دفن لوله در خاک از طرفی فاصله برخورد راکت با

لوله افزایش یافته همچنین باعث می‌شود تا جبهه موج ناشی از انفجار در فاصله دورتری به لوله وارد شود و فشار مؤثر وارد به لوله کمتر شود. همان‌طور که در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است با افزایش عمق تنش ناشی از انفجار به‌طور فراوانی کاهش می‌یابد و باعث می‌شود تا سطح ایمنی لوله در برابر انفجار تأمین شود. از این‌رو به‌عنوان افزایش سطح ایمنی لوله در برابر تهدیدات می‌تواند راهکار مناسبی باشد.



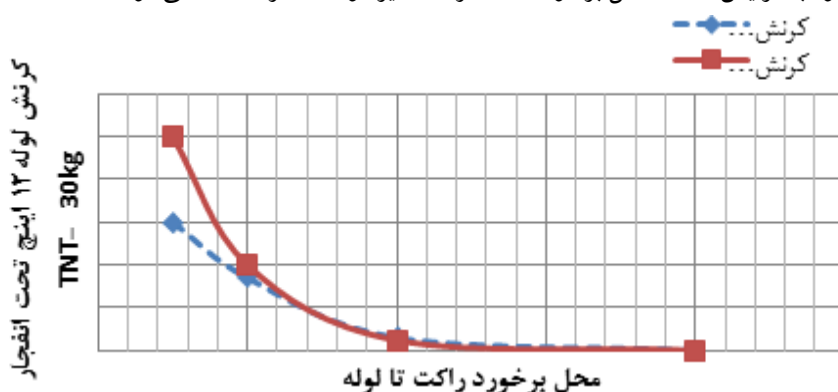
Error! Reference source not found. ۷. تأثیر افزایش عمق دفن لوله بر کرنش لوله ۴ اینچ در انفجار به فاصله ۱ متر

با افزایش عمق دفن لوله تغییر شکل و کرنش‌های لوله تا حد زیادی کاهش می‌یابد تا آنجا که با افزایش ۵۰ درصدی میزان خرج ماده نیز لوله عملکرد خود را در سطح مطلوب حفظ می‌کند. از این‌رو توصیه می‌شود که پارامتر افزایش عمق دفن در روند مقاوم‌سازی و کاهش آسیب‌پذیری خطوط لوله مورد توجه ویژه قرار گیرد.

▪ تأثیر تغییر فاصله انفجار تا محل دفن لوله بر کاهش آسیب‌پذیری خطوط لوله

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود با دورتر شدن محل برخورد لوله تا راکت از طرفی شاخص فاصله افزایش می‌یابد و باعث کاهش فشار مؤثر ناشی از جبهه انفجار بر لوله می‌شود؛ اما از طرف دیگر مشاهده می‌شود با کاهش فاصله و در فواصل بسیار نزدیک تا ۱ متر، حتی برای میزان خرج ماده منفجره کم نیز تنش زیادی به لوله وارد می‌شود که باعث خرابی و انفجار در لوله‌های گاز خواهد شد. با دورتر شدن محل برخورد لوله تا راکت از طرفی شاخص فاصله

افزایش یافته و باعث کاهش فشار مؤثر ناشی از جبهه انفجار بر لوله می شود؛ ولی از طرف دیگر مشاهده می شود با افزایش فاصله محل برخورد تا ۴ متر، از تأثیر مواد منفجره کاسته می شود.



شکل ۸ تأثیر محل برخورد راکت بر کرنش لوله

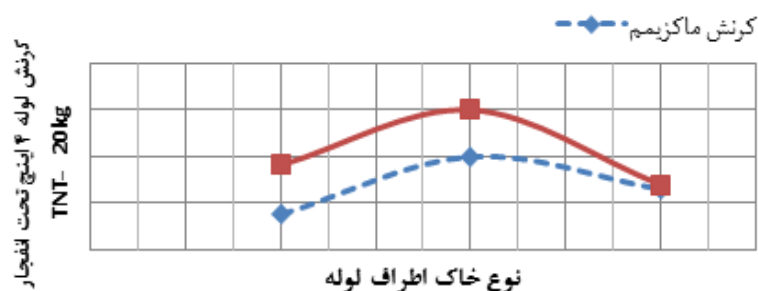
■ تأثیر تغییر جنس خاک اطراف لوله بر کاهش آسیب پذیری آن

با سخت تر شدن خاک اطراف لوله اندر کرنش لوله و خاک در هنگام انفجار بیشتر می شود و موج انفجار با سرعت بیشتری در خاک سخت با مدول الاستیسیته بیشتر انتشار می یابد و فشار بیشتری به لوله وارد می شود. از این رو توصیه می شود از خاک نرم در اطراف لوله استفاده شود تا از شدت خرابی و خسارت به لوله تا حد امکان کاسته شود. در جدول ۳ مشخصات جنس خاک مورد استفاده در مدل سازی آمده است. در مقایسه خاک رسی با ماسه ای، خاک رسی به دلیل چسبندگی بودن ذرات آن آسیب بیشتری را به لوله در موقع انفجار در مقایسه با خاک ماسه ای وارد می کند. همان طور که در شکل ۹ و ۱۰ نشان داده شده است پارامترهای مختلف خاک از جمله ضریب اصطکاک، چگالی، ضریب انبساط حجمی، رفتار پلاستیک و رفتار ویسکوزیته از جمله پارامترهای مهم در رفتار خاک هستند که بر رفتار لوله تأثیر متفاوتی را بر جا می گذارند.

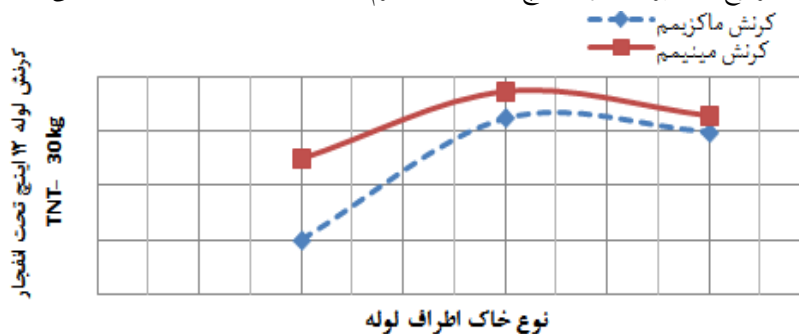
جدول ۳. مشخصات جنس خاک های مورد استفاده در مدل سازی

ضرایب رفتار خاک					جنس خاک
dilation factor	flow stress ratio	friction angle	ρ (kg/m ³)	E (MPa)	
۸۱.۵۴	۸.۰	۲۵	۱۶۰۰	۷	ماسه نرم
۶۳.۴۴	۸۵.۰	۳۵	۲۰۰۰	۱۴	ماسه ای سخت

رس	۴	۱۷۰۰	۰	۱	۰
----	---	------	---	---	---



شکل ۹- تأثیر نوع خاک بر رفتار لوله ۴ اینچ (۱- خاک ماسه نرم، ۲- خاک ماسه‌ای سخت، ۳- خاک رسی)



شکل ۱۰- تأثیر نوع خاک بر رفتار لوله ۱۲ اینچ (۱- خاک ماسه نرم، ۲- خاک ماسه‌ای سخت، ۳- خاک رسی)

همان‌طور که در شکل ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود می‌توان گفت که خاک ماسه‌ای سخت به دلیل اینکه مدول الاستیسیته و ضریب اصطکاک بالاتری نسبت به خاک ماسه‌ای نرم و خاک رسی دارد تنش‌های اندرکنشی بیشتری به نسبت در لوله ایجاد می‌کند و از طرفی به دلیل سرعت بیشتر انتقال موج فشار، تنش بیشتری بر اثر انفجار به لوله وارد می‌شود از این رو توصیه می‌شود خاک با مدول الاستیسیته پایین‌تر و ضریب اصطکاک کمتر استفاده شود در این صورت بهترین رفتار را در برابر انفجار خاک ماسه‌ای نرم از خود نشان می‌دهد و در بهترین شرایط حدود ۲۵٪ از تنش ماکزیمم را کاهش می‌دهد.

۲- بررسی آسیب پذیری خطوط لوله در سناریوی تهدید شماره ۲

در صورتی که فرض کنیم انفجار در فاصله‌ای به عرض خیابان دو خطه یعنی در حدود فاصله ۶ تا ۸ متر و با خرج انفجاری ۶۰ الی ۸۰ کیلوگرم ماده منفجره اتفاق بیفتد آسیب جدی به لوله نمی‌تواند وارد کند حتی اگر میزان ماده منفجره تا حدود ۲۰۰ کیلوگرم افزایش یابد. تنها راهکار مناسب و معقول در این زمینه افزایش عمق دفن لوله است که بیشترین تأثیر در کاهش آسیب پذیری را خواهد داشت.

نتیجه گیری

به منظور کنترل رفتار و ظرفیت لوله‌های مقاوم سازی شده رفتار آن‌ها بر اساس هدف عملکرد و مقابله با سناریوهای تهدید فرض شده مطابق با آیین‌نامه ALA سنجیده شد. به منظور کاهش آسیب پذیری در مقابله با سناریوهای تهدید پارامترهای ضخامت، قطر، عمق دفن، فاصله برخورد راکت و جنس خاک جداگانه مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش عمق دفن لوله در خاک از طرفی فاصله برخورد راکت با لوله افزایش می‌یابد از طرف دیگر باعث می‌شود تا جبهه موج ناشی از انفجار در فاصله دورتری به لوله وارد شود و فشار مؤثر وارد به لوله کمتر شود. به همین دلیل عمق دفن پارامتر مهمی است که با افزایش آن می‌توان ایمنی لوله را برای خرج ماده منفجره تا ۷۰٪ نیز افزایش داد. با دورتر شدن فاصله برخورد اصابت گلوله یا راکت تا خطوط لوله از طرفی شاخص فاصله افزایش می‌یابد که باعث کاهش فشار مؤثر ناشی از جبهه انفجار بر لوله می‌شود ولی از طرف دیگر مشاهده می‌شود با کاهش فاصله و در فواصل بسیار نزدیک تا ۱ متر حتی برای میزان خرج ماده منفجره بسیار کم نیز تنش زیادی به لوله وارد می‌شود که باعث خرابی و انفجار در لوله‌های گاز خواهد شد. از این رو در بحث بررسی میزان آسیب پذیری ملاحظه شد با افزایش فاصله محل برخورد تا ۴ متر از تأثیر مواد منفجره کاسته می‌شود و می‌توان از تأثیر آن‌ها بر لوله صرف نظر کرد. با سخت تر شدن خاک اطراف لوله اندرکنش لوله و خاک

در هنگام انفجار بیشتر می‌شود و موج انفجار با سرعت بیش‌تری در خاک سخت با مدول الاستیسیته بیشتر انتشار می‌یابد و فشار بیش‌تری به لوله وارد می‌شود. از این‌رو توصیه می‌شود از خاک ماسه‌ای نرم در اطراف لوله استفاده شود تا از شدت خرابی و خسارت به لوله تا حد امکان کاسته شود. با افزایش ضخامت لوله سختی لوله در برابر موج انفجار بیشتر شده و در برابر خرابی موضعی مقاوم‌تر شده و آسیب کمتری به آن وارد می‌شود ولی با افزایش بیش از حد ضخامت لوله و وزن آن تأثیر زیادی در بهبود عملکرد لوله مشاهده نمی‌شود زیرا به دلیل حرکت جبهه موج ناشی از انفجار حرکت و سرعت المان‌های خاک در عمق یک متر زیاد بوده و باعث وارد شدن تنش بیش از حد به لوله می‌گردد. افزایش ضخامت لوله تا حدود ۲ برابر، تا ۲۵٪ از کرنش‌های ماکزیمم را در لوله کاهش می‌دهد. با افزایش قطر لوله از طرفی فشار جبهه انفجار بر لوله افزایش می‌یابد و اندرکنش لوله و خاک نیز بیشتر می‌شود و از طرف دیگر سختی لوله نیز افزایش می‌یابد. بررسی‌ها نشان داده است که افزایش قطر لوله تا حدود ۱٫۵ برابر تنها ۳۰٪ از کرنش‌های ماکزیمم را در لوله در معرض انفجار کاهش می‌دهد. از این‌رو با توجه به بالا رفتن میزان وزن فولاد، افزایش قطر لوله به‌عنوان روش مطلوبی برای کاهش آسیب‌پذیری توصیه نمی‌شود. مطالعات نشان می‌دهد که سطح خرج ماده منفجره برای مقابله با سناریوهای تهدید فرض شده برای لوله‌های ۱۲ اینچ حدود ۳۰ کیلوگرم است که برای لوله‌های با قطر ۴ اینچ در حدود ۲۰ کیلوگرم است. در بررسی سناریوی انفجار مواد منفجره در ماشین کنار خیابان، در صورتی که فرض شود فاصله ماشین در حدود ۶ متری از محل دفن لوله باشد با انفجار حدود ۲۰۰ کیلوگرم مواد منفجره نیز آسیب جدی به لوله وارد نمی‌شود و لوله می‌تواند عملکرد خود را حفظ کند. از این‌رو توصیه می‌شود به منظور افزایش اطمینان از ایمنی لوله‌ها در برابر عملیات انفجار تروریستی میزان عمق دفن لوله به ۲ متر افزایش یابد.

پیشنهادهای

برای مطالعات آتی پیشنهاد می شود به بررسی اثر انفجار بر خطوط لوله مدفون در خاک مرطوب نیز پرداخته شود و تأثیر رطوبت بر میزان آسیب پذیری خطوط لوله گاز محاسبه شود.

فهرست منابع

آقاسی، م، بررسی تأثیر مشخصات مکانیکی خاک بر تأسیسات فولادی مدفون تحت اثر انفجار، سومین کنفرانس ملی زلزله و سازه، گروه عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید عباس پور، ۱۳۹۱.
اکبر دوست، جواد و همکاران، بررسی استحکام لوله های نفت و گاز تحت بارگذاری انفجاری خارجی، اولین کنفرانس لوله و صنایع وابسته، ۱۳۸۶.
حجت جلالی، بررسی مقابله با اثر تخریبی گسلش بر روی خطوط لوله و شبکه تغذیه و توزیع گاز و تعمیر آن در سطح کشور، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۹.
نیری، آرش، تحلیل و طراحی ساختمان ها در برابر اثرات انفجار، انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۲
مبحث ۲۱ مقررات ملی ساختمان در خصوص پدافند غیرعامل.

[Http\\Civilengineerspk.com/abaqus-6-10-crack/amp](http://Civilengineerspk.com/abaqus-6-10-crack/amp)

A.J. Olarewaju, N.S.V. Kameswara and M.A. Mannan و Response of Underground Pipes due to Blast Loads by simulation, electron.j.geotech.eng, ۲۰۱۱

American society of civil engineering, Seismic Design and Retrofit of Piping Systems, July ۲۰۰۲.

Boh, J. W., Louca, L. A. and Choo, Y. S. Finite Element Analysis of Blast Resistance, Structures in the Oil and Gas Industry, Singapore and UK, ABAQUS User's Conference, pp ۱-۱۵

Ngo, T. J., Mendis, J., Gupta, A. and Ramsay, J. (۲۰۰۷). Blast Loading and Blast Effects on Structures – An Overview, University of Melbourne, Australia, International .

Manfredi, C., Otegui, J.L., ۲۰۰۲. Failures by SCC in Buried Pipelines. Engineering Failure Analysis, vol. ۹. Elsevier Science Ltd., Pergamon, pp. ۴۹۵-۵۰۹.

Zyskowski, A. Sochet, I. Mavrot, G. Bailly, P. Renard, J. (۲۰۰۴). Study of the explosion process in a small scale experiment-structural loading. Journal of Loss Prevention in the process industry.

