Journal of Crisis Management and Emergency Situations

1986
Imam Hossein
Comprehensive
University

2

Vol. 14
Summer 2022

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

Behnam Salehi [1] | Mohammad Eskandari [2] | Mohammad Reza Fallah Ghanbari[3] | | Zahra Jamshidi[4]

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.

Publisher: Imam Hussein University

© **Authors**

فصلنامه مدیریت بحران و وضعیت های اضطراری

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 [٤]

۱
سال چهاردهم
تابستان ۱٤۰۱

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱٤۰۱/۰۲/۰۱
تاریخ بازنگری: ۱٤۰۱/۰۳/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱٤۰۱/۰٤/۰۷
تاریخ انتشار: ۱٤۰۱/۰۶/۳۰
صص: ۱۲۰-۱۰۳

شاپا چاپی: ۳۵٦٤-۲۰۰۸
الکترونیکی: ۵۲۸۵-۲٦٤۵

چکیده

خطوط لوله مدفون که برای توزیع آب، گاز، نفت و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند، به‌عنوان یکی از شریان‌های حیاتی مهم مطرح است. تجارب حاصل از جنگ‌های گذشته مؤید آن است که کشور مهاجم توجه خود را صرف بمباران و انهدام مراکز حیاتی و حساس می‌نماید. خطوط لوله گاز به‌عنوان یکی از شریان‌های مهم انتقال در زمان جنگ در صورت آسیب می‌تواند خسارات جانی و مالی زیادی وارد آورد. در این مقاله میزان آسیب‌پذیری لوله‌های فولادی مدفون گاز شهری بر اثر انفجار تعیین و روش‌های کاهش آسیب‌پذیری خطوط لوله مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور ضمن تهیه مدل سه‌بعدی از سیستم خاک لوله در نرم‌افزارABAQUS ، 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 المان‌های سه بعدی Solid و لوله با المان Shell مدل شد. برای مطالعات پارامتریک، تحلیل‌ها با استفاده از روش المان محدود انجام گرفت. مطالعات برای قطرهای ٤ و ۱۲ اینچ، نسبت قطر به ضخامت ۲٦،۲۱ و ۳۵، عمق دفن ۱، ۲، ۳ و ٤ متر، میزان خرج انفجار ۱۵، ۳۰، ٤۵، ٦۰ و ۲۰۰ کیلوگرم TNT و برای جنس خاک ماسه‌ای سخت، نرم و رسی انجام شد. نتایج نشان داد که عمق دفن مناسب بیش‌ترین تأثیر را به منظور کاهش آسیب‌پذیری خطوط لوله در برابر تهدیدات انفجاری دارد. با افزایش ضخامت لوله و افزایش قطر و به‌کارگیری خاک ماسه‌ای نرم در اطراف لوله، رفتار بهتری از لوله در هنگام وقوع انفجار مشاهده شد.

کلیدواژه‌ها: عوامل مؤثر؛ خطوط لوله گاز؛ آسیب‌پذیری؛ 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 بلایا و فوریت ها، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران
٤. 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.

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

© نویسندگان

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 به‌کار می‌گیرد. ازاین‌رو 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 فازی؛ از نوع دراگر پراگر[1] 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[2] و همکاران [۳] به منظور پیش‌بینی اثر انفجار بر روی خطوط لوله با به‌کارگیری 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 ازاین‌رو ضروری است که فاصله انفجار رعایت شود.

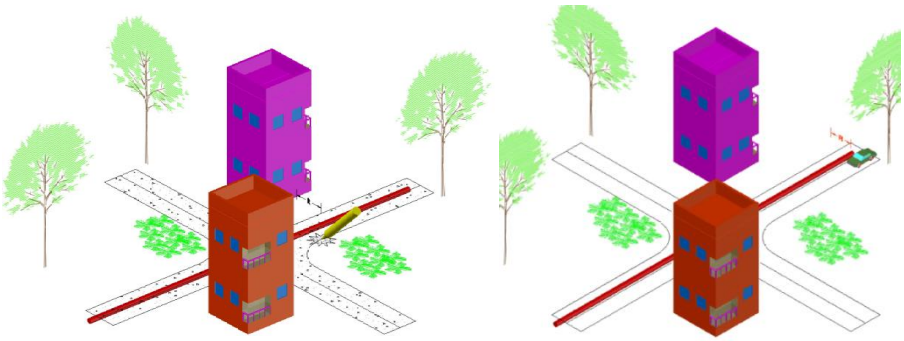
1. Drauger-Pruger
2. Olarewaju

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 تشکیل‌دهنده آن و سپس تعریف اندرکنش بین اجزا شبیه‌سازی کرد. یک تحلیل کامل در برنامه ABAQUS معمولاً از سه مرحله پیش‌پردازش، پردازش و بعد از پردازش تشکیل شده است:

- مرحله پیش‌پردازش

در این مرحله مدل مسئله با استفاده از معادلات و روابط ساخته می‌شود و یک فایل ورودی ABAQUS ایجاد می‌شود. مدل را معمولاً می‌توان به صورت گرافیکی با استفاده از ABAQUS/CAE و یا سایر پیش‌پردازنده‌ها ایجاد کرد و یا می‌توان فایل ورودی ABAQUS را با استفاده از یک ویرایشگر متن مثل Notepad ساخت.

- پردازش

پردازش معمولاً به صورت یک پروسه در پس‌زمینه اجرا می‌شود، مرحله‌ای است که در آن ABAQUS استاندارد و یا صریح، مسئله عددی را که در مدل تعریف شده حل می‌کند. مسئله‌هایی از خروجی تحلیل تنش عبارت است از تغییر مکان‌ها و تنش‌هایی که در فایل‌های باینری ذخیره می‌شود و برای مرحله پس از پردازش مورد استفاده قرار می‌گیرد. بسته به پیچیدگی مسئله‌ای که باید تحلیل شود و قدرت کامپیوتری که تحلیل را انجام می‌دهد، زمان تحلیل می‌تواند بین چند ثانیه تا چند روز طول بکشد.

- مرحله بعد از پردازش

ارزیابی نتایج را می‌توان بعد از اتمام مرحله پردازش یعنی زمانی که تنش‌ها تغییر مکان‌ها و سایر متغیرهای اساسی محاسبه شده‌اند انجام داد. ارزیابی معمولاً با استفاده از ماژول گرافیک‌ساز (Visualization) یا سایر پس‌پردازنده‌ها انجام می‌شود. ماژول گرافیک ساز داده‌های فایل خروجی باینری را می‌خواند و گزینه‌های متفاوتی مانند کانتورهای رنگی، انیمیشن، فرم تغییر شکل یافته و یا نمایش داده‌ها 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 به‌عنوان متغیرهای مستقل در این مطالعه هستند میزان تغییر شکل لوله

به‌عنوان 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 R۸D۳C 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 R۴S مدل شد [۵]. همچنین مشخصات مکانیکی لوله برای لوله‌های فولادی از جنس L۵[1]API- در نظر گرفته شده است. برای مدل کردن رفتار خمیری لوله‌ی فولادی از مدل فون میسز[2] و با در نظر گرفتن سخت‌شوندگی ایزوتروپیک استفاده شده است. برای مدل کردن کامپوزیت از المان‌های ۴ گره‌ای پوسته‌ای (R۴S) نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است. همچنین contact بین لوله و خاک از نوع hard contact با ضریب اصطحکاک 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 نرم‌افزار ABAQUS به مدل‌سازی اثر انفجار بر خاک و خطوط لوله پرداخته شده ارجاع داده می‌شود [۱،۲،۳]. علاوه بر این می‌توان 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 می‌شود. معمولاً در مراجع معتبر برای محاسبه بیشینه فشار مبنا رابطه‌هایی برحسب Z بیان شده است که مقدار آن از رابطه ۱ بیان می‌شود[۶].

---

1. American-Petroleum Institute
2. Fon Mises

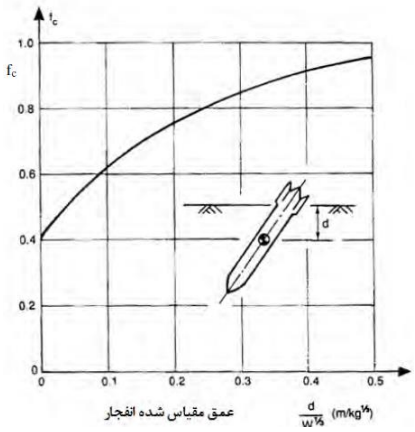
$$\frac{x}{W^{1/3}} = 60 \cdot \frac{f_c}{c} \left(\frac{2.52R}{W^{1/3}}\right)^{1-n}$$ رابطه (۱)

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

R: فاصله نقطه مورد نظر برحسب متر C: سرعت لرزه‌ای برحسب 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 غیرمحصور به‌دست می‌آید.

f_c: ضریب اتصال (جفت‌شدگی) که با تعیین عمق مرکز انفجار از سطح زمین از شکل ۲ به‌دست 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].



Error! No text of specified style in Error! Reference source not found. **document.** میزان ضریب fc بر اساس مقیاس (Z)

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

نوع خاک	ضریب کاهندگی (n)	ضریب k
رس اشباع	۱/۵	۳۰.۰۰۰
لای و رس نیمه اشباع	۲/۵	۲۰.۰۰۰
ماسه خیلی متراکم، خشک ومرطوب	۲/۵	۱۰.۰۰۰
ماسه متراکم، خشک ومرطوب	۲/۷۵	۵.۰۰۰
ماسه سست، خشک ومرطوب	۳/۰	۲.۰۰۰
ماسه خیلی سست، خشک ومرطوب	۳/۲۵	۱.۰۰۰

مقدار فشار مبنای انفجار طبق رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$p_{so} = \frac{۶.۷}{Z^{۳}} + ۱ \quad \left(p_{so} > ۱۰ \, {kg}/{cm^{۲}} \right)$$

$$p_{so} = \frac{۰.۹۷۵}{Z^{۱}} + \frac{۱.۴۵۵}{Z^{۲}} + \frac{۵.۸۵}{Z^{۳}} - ۰.۰۱۹ \quad (۰.۱ < p_{so} < ۱۰ \, {kg}/{cm^{۲}})$$

رابطه (۲)

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 نمودار برای محاسبه مدت زمان فاز مثبت ارائه شده که توسط ایزدی فرد و ماهری در رابطه ۳ خلاصه شده است.

$$log_{۱۰} \left({t_d}/{W^{۱/۳}} \right) = ۲.۵ log_{۱۰}(Z) + ۰.۲۸ \qquad Z < ۱$$

$$log_{۱۰} \left({t_d}/{W^{۱/۳}} \right) = ۰.۳ log_{۱۰}(Z) + ۰.۲۸ \qquad Z > ۱$$

رابطه (۳)

تغییرات فشار زمان براساس رابطه فردلاند[1] از طریق رابطه ۴ بیان می‌شود.

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

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 ۲۵۰psi 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 -۳۷ST[2] در نظر گرفته شد. چگالی لوله فولادی برابر ۷۸۵۰ Kg/m^3، مدول یانگ برابر ۲۱۰Gpa و ضریب پواسون برابر ۰.۳ 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 کارگرفته 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[1] [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 ۴٪ برای لوله‌های فولادی.

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

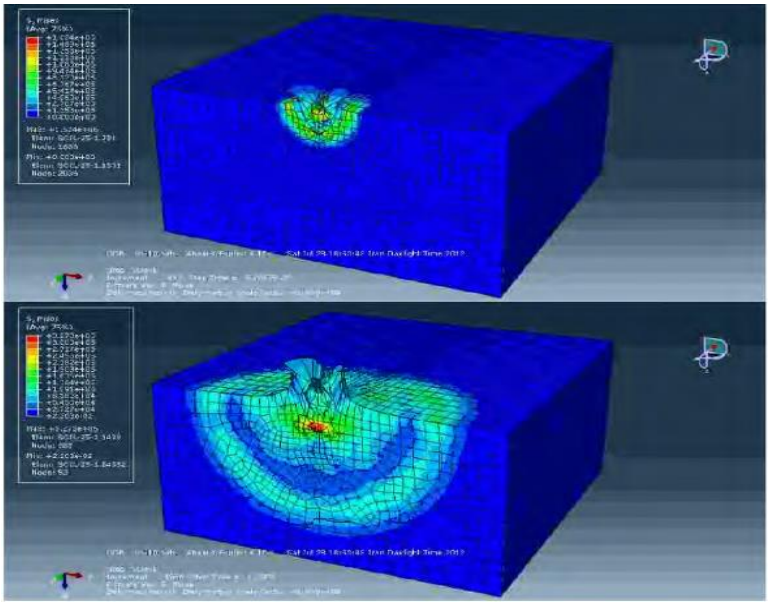
$$\varepsilon_{cr} = ۰.۸۸(\frac{t}{R})$$ رابطه (۵)

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.

---

1. American Lifelines Alliance

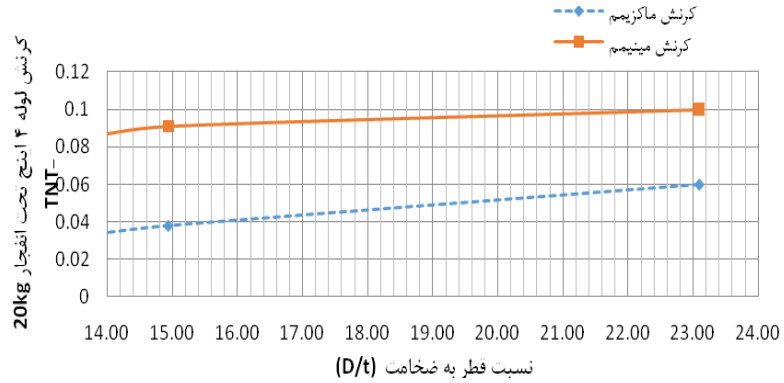


شکل۳. تحلیل مدل انفجار در نرم‌افزار

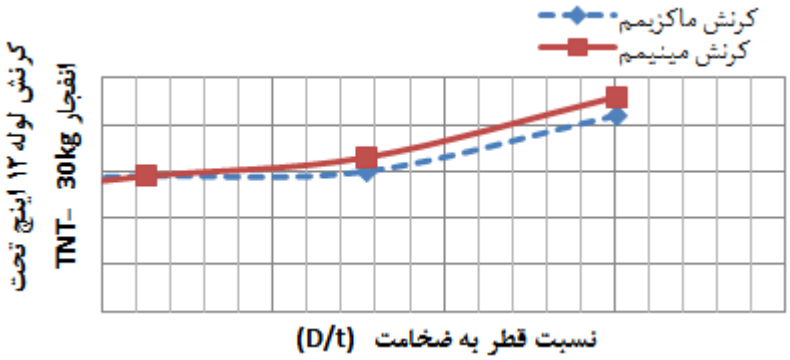
۱- نتایج آسیب‌پذیری خطوط لوله در سناریوی تهدید ۱

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 می‌گردد. در بررسی کاهش آسیب‌پذیری، میزان خرج مواد منفجره راکت و خمپاره در سناریوی ۱ لحاظ گردید و به‌منظور کاهش آسیب‌پذیری و حفظ عملکرد لوله در انفجارهای با خرج بیشتر فاکتورهای زیر به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفت:

- اثر ضخامت لوله بر کاهش آسیب‌پذیری



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

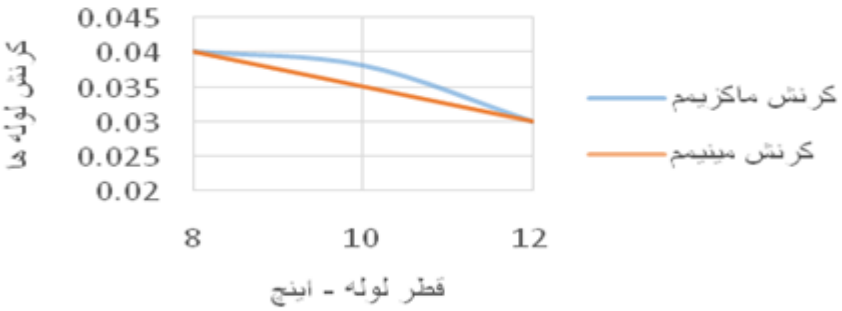


۵. اثر نسبت D/t به کرنش لوله ۱۲ اینچ بر اثر انفجار خرج انفجاری ۳۰ کیلوگرم **Error! Reference source not found.**

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 کمانش افزایش می‌یابد ازاین‌رو در برابر موج دینامیکی انفجار رفتار مقاوم‌تری را از خود نشان می‌دهد و کرنش‌های فشاری و کششی کاهش می‌یابد. برای لوله ۱۲ اینچ مشاهده می‌شود با ۲ برابر کردن ضخامت لوله کرنش‌ها 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. ازاین‌رو به‌عنوان گزینه‌ای برای مقاوم‌سازی لوله این شیوه راه‌حل مناسبی از لحاظ فنی نیست.

- اثر افزایش قطر لوله بر کاهش آسیب‌پذیری

به منظور افزایش مقاومت لوله در برابر امواج انفجار می‌توان قطر لوله را افزایش داد. با افزایش قطر لوله نسبت D/t افزایش یافته و باعث افزایش سختی لوله در برابر شوک انفجار می‌شود و کرنش‌ها و تغییر شکل‌های ایجاد شده در لوله کاهش می‌یابد. همان‌طور که در **Error! Reference source not found.** مشاهده می‌شود با ثابت نگه داشتن ضخامت و افزایش ۱/۵ برابری قطر کرنش فشاری و کششی لوله حدود ۲۰ درصد کاهش می‌یابد.



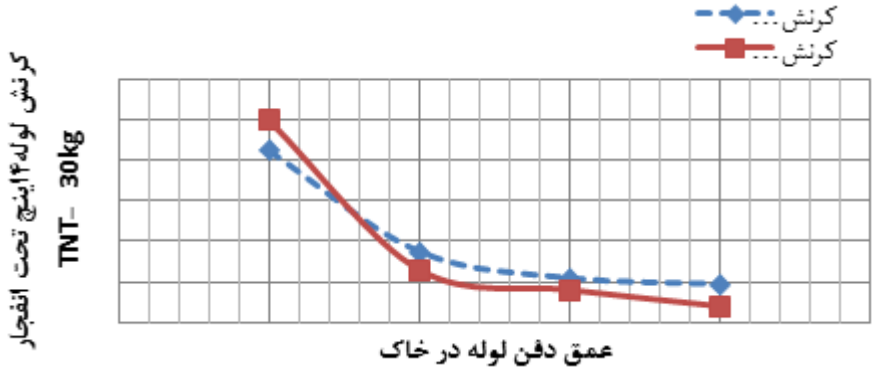
شکل ۶. تأثیر قطر لوله بر کرنش لوله با عمق دفن ۱ متر و فاصله انفجار ۱ متر و خرج TNT ۳۰ کیلوگرم

دلیل این رفتار آن است که با افزایش قطر لوله سختی لوله نیز افزایش می‌یابد؛ اما این نکته را نیز باید مدنظر داشت که فشار موج انفجار بر لوله نیز افزایش می‌یابد؛ زیرا با افزایش قطر لوله اندرکنش لوله با خاک نیز بیشتر می‌شود. در مقایسه با افزایش ضخامت لوله می‌توان نتیجه گرفت که در لوله‌های با قطر پایین در حدود ۴ اینچ، با ۲ برابر کردن قطر می‌توان سطح عملکرد لوله به‌ازای خرج ۳۰ کیلوگرم ماده منفجره را حفظ کرد در صورتی‌که با افزایش ۲ برابری ضخامت لوله سطح عملکرد لوله به ازای خرج ۲۰ کیلوگرم ماده منفجره حفظ شده است. ازاین‌رو توصیه می‌شود به منظور مقاوم‌سازی لوله‌های با قطر پایین از گزینه افزایش قطر به‌جای افزایش ضخامت استفاده شود؛ زیرا تأثیر بالاتری در تغییر شکل لوله و سختی لوله می‌گذارد. از طرف دیگر با میزان وزن فولاد مصرفی یکسان می‌توان عملکرد بهتری از لوله را مشاهده کرد.

- اثر افزایش عمق دفن لوله بر کاهش آسیب‌پذیری

افزایش عمق دفن یکی از روش‌هایی است که با استفاده از آن می‌توان میزان آسیب‌پذیری 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.** ۷ 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. ازاین‌رو به‌عنوان افزایش سطح ایمنی لوله در برابر تهدیدات می‌تواند راهکار مناسبی باشد.



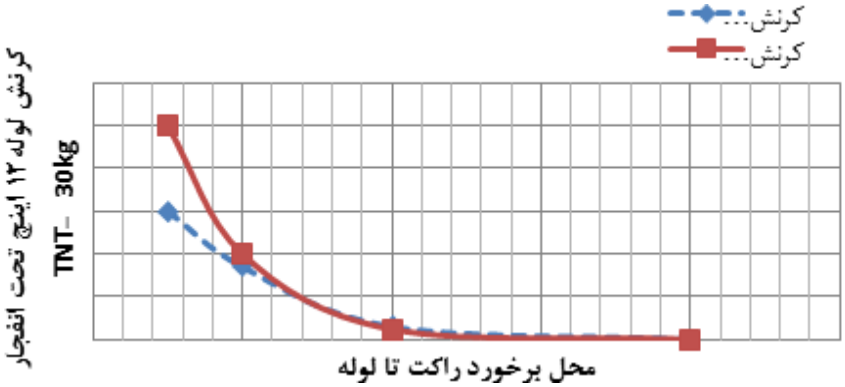
Error! Reference source not found. ۷. تأثیر افزایش عمق دفن لوله بر کرنش لوله ۴ اینچ در انفجار به فاصله ۱ متر

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. ازاین‌رو 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 لوله های 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 می‌شود؛ ولی از طرف دیگر مشاهده می‌شود با افزایش فاصله محل برخورد تا ۴ متر، از تأثیر مواد منفجره کاسته می‌شود.



شکل ۸. تأثیر محل برخورد راکت بر کرنش لوله

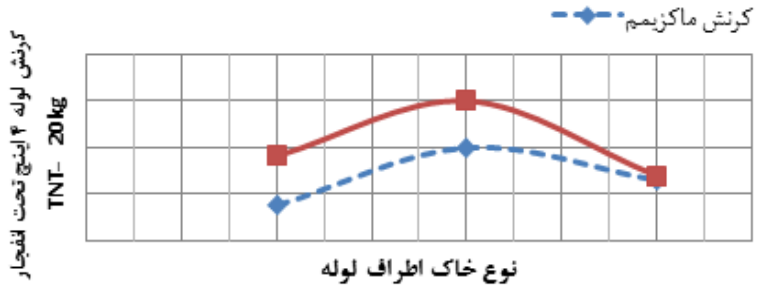
- تأثیر تغییر جنس خاک اطراف لوله بر کاهش آسیب‌پذیری آن

با سخت‌تر 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. ازاین‌رو توصیه می‌شود 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 مدل‌سازی آمده است. در مقایسه خاک رسی با ماسه‌ای، خاک رسی به دلیل چسبنده بودن ذرات آن آسیب بیشتری را به لوله در موقع انفجار در مقایسه با خاک ماسه‌ای وارد می‌کند. 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 می‌گذارند.

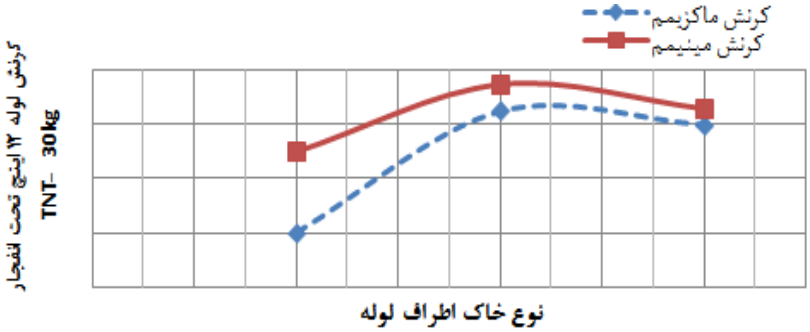
جدول ۳. مشخصات جنس خاک‌های مورد استفاده در مدل‌سازی

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

رس	۴	۱۷۰۰	۰	۱	۰



شکل۹- 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- خاک‌رسی)

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 می کند 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 آسیب‌پذیری خطوط لوله در سناریوی تهدید شماره۲

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 آسیب‌پذیری را خواهد داشت.

نتیجه‌گیری

به منظور کنترل رفتار و ظرفیت لوله‌های مقاوم‌سازی شده رفتار آن‌ها بر اساس هدف عملکرد و مقابله با سناریوهای تهدید فرض شده مطابق با آیین‌نامه ALA سنجیده شد. به منظور کاهش آسیب‌پذیری 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 آسیب‌پذیری ملاحظه شد با افزایش فاصله محل برخورد تا ۴ متر از تأثیر مواد منفجره کاسته می‌شود و می‌توان از تأثیر آن‌ها بر لوله صرف‌نظر کرد. با سخت‌تر 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. ازاین‌رو 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 این رو 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. ازاین‌رو توصیه می‌شود به منظور افزایش اطمینان از ایمنی لوله‌ها در برابر عملیات انفجار تروریستی میزان عمق دفن لوله به ۲ متر افزایش یابد.

پیشنهادات

برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود به بررسی اثر انفجار بر خطوط لوله مدفون در خاک مرطوب نیز پرداخته شود و تأثیر رطوبت بر میزان آسیب‌پذیری 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 تعمیم آن در سطح کشور، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۹.

نیری، آرش، تحلیل و طراحی ساختمان‌ها در برابر اثرات انفجار، انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۲ مبحث ۲۱ مقررات ملی ساختمان در خصوص پدافند غیرعامل.

Http\\Civilengineerspk.com/abaqus-۶-۱-۱۰-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, Seisimic 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 Rams ay, 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.