



Imam Khomeini International University

Vol. 8, No. 1, Spring 2023



نشریه مهندسی منابع معدنی

Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

Research Paper

Numerical Analysis of Trench Blast-Induced Vibration on Tabriz Drinking Water Pipelines

Bakhshandeh Amnieh H.^{1*}, Azari Doudaran S.², Alipenhani B.³

1- Associate Professor, School of Mining, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2- M.Sc, School of Mining, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Ph.D Student, School of Mining, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 17 Jul. 2021

Accepted: 23 Jul. 2022

Abstract: Nowadays, duo to mining and construction activities' progression, the need to utilize blasting has been increasing in order to reduce time and cost. The use of blast for drilling and crushing rock, in addition to its advantages, has disadvantages, the most important of which is ground vibration. Vibration caused by the blast is an important and significant part of the blast process and controlling its amount in order to reduce possible damage to the surrounding areas, is always necessary. In this paper, the field data of the blast in the second line of the Tabriz water pipeline project have been collected using three-component Blast Recorder seismographs. By modeling the process of blast in ANSYS-Autodyn finite element software, the behavior of the blast zone environment is simulated. The average of numerical modeling errors compared to field surveys is estimated at about 20%. According to the numerical modeling, the most critical state of velocity entering the pipeline is less than the allowable blast standards near the pipeline, and the maximum stress, strain, and displacement in the boundary of pipe and soil are equal to 17.24 MPa, 135 $\mu\text{mm}/\text{mm}$, and 0.18 mm, respectively.

Keywords: Blasting, Ground vibration, PPV, Water pipeline, ANSYS-Autodyn.

How to cite this article

Bakhshandeh Amnieh, H., Azari Doudaran, S., and Alipenhani, B. (2023). "Numerical analysis of trench blast-induced vibration on Tabriz drinking water pipelines". Journal of Mineral Resources Engineering, 8(1): 95-109.

DOI: 10.30479/JMRE.2022.15914.1533

*Corresponding Author Email: hbakhshandeh@ut.ac.ir

COPYRIGHTS



©2023 by the authors. Published by Imam Khomeini International University.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

INTRODUCTION

Various factors which affect ground vibration, are classified into two categories. The first category contains controllable parameters and the second category contains uncontrollable parameters. Uncontrollable parameters include the geology and discontinuities of the region and the composition of the rock mass [1]. Since 1980, the parameter of the peak particle velocity has been accepted as one of the main criteria for evaluating structural damage [2]. Despite the development of more ground vibration prediction methods, distance-scaled empirical equations are still the most popular blast-induced vibration prediction methods as shown in Table 1 [3].

Table 1. The most important equations of ground vibration prediction

Year	Reference	Equation
1962	USBM [4]	$PPV = K \times \left(\frac{R}{Q^{1/2}} \right)^{-b}$
1963	Langefors and Kihlström [5]	$PPV = K \left(\frac{R}{Q^{3/2}} \right)^{b/2}$
1968	Ambraseys and Hendron [6]	$PPV = K \left(\frac{R}{Q^{1/3}} \right)^{-b}$
1973	Bureau of Indian Standard [7]	$PPV = K \left(\frac{Q}{R^{2/3}} \right)^b$
1983	Ghosh and Daemen [8]	$PPV = K \left(\frac{R}{Q^{1/2}} \right)^{-b} e^{-\alpha R}$ $PPV = K \left(\frac{R}{Q^{1/3}} \right)^{-b} e^{-\alpha R}$

Xu [9] investigated the dynamic response of the pipe under surface explosion by using a numerical method. He concluded that if the diameter of the pipe is assumed to be constant, as the distance between the explosive material and the pipe increases, the stress in the pipe will decrease, and if the distance between the explosive material and the pipe is assumed to be constant, the pipe with a small diameter will bear more stress. Also, he found that the effect of the distance of the explosive material from the pipe is much more than the diameter of the pipe in the tension created in the pipe [9]. Parviz [10] investigated the stress and pressure caused by the explosion on the pipe buried in the soil using LS-DYNA finite element software. The results of his research showed that the fluid pressure inside the pipe contributes a lot to the stability of the pipe. He concluded that by increasing the density of the fluid inside the pipe, less tension and pressure are introduced into the pipe. Also, by reducing the density of the soil used in the modeling, the behavior of the soil acts like a damper, and less stress and pressure are applied to the pipe [10]. Bakhshandeh [11] investigated the vibrations caused by the explosion and its effects on oil and gas pipelines with a numerical method in Autodyn software. He compared his modeling results with the empirical equations presented in similar geological conditions for limestone and also compared the peak particle velocity obtained from the modeling results with the existing standards for explosions in the vicinity of pipelines. The results showed the good accuracy of the modeling and no damage was done to the pipelines [11].

METHODOLOGY

Geographical location and seismic data collection

Figure 1 shows the location of the explosive trench and the three-component seismographs in relation to the main Tabriz water pipeline during the blasting operation. The aim of the project is to investigate the effects of the vibrations of the second line trench on the first water supply pipeline of Tabriz. The purpose of this arrangement is to fully investigate the effects of vibration on the steel, houses, and the travertine rock mass around the explosion area.

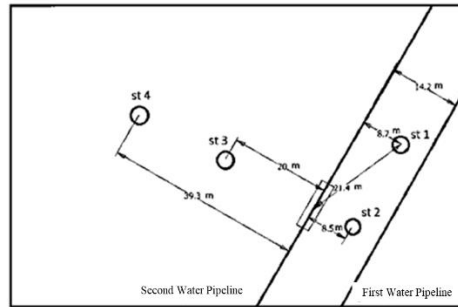


Figure 1. Explosive trench position relative to seismographs

Numerical modeling

The geometry of the main model consists of four sections: rock mass, soil, explosives material and pipe. The shape of the ground is created as a cube with dimensions of 10 x 22 x 45 meters. Figure 2 shows the location of the water pipeline and the soil around it in relation to the explosive trench. The part of the ground filled with compacted soil is modeled with a cube with dimensions of 22 x 22.4 x 4 meters and other parts of the model consist of the rock mass. Explosives were created in the form of holes with a depth of 3 meters and a radius of 51 mm.

In Autodyn software, the JWL equation is used to calculate the volume-pressure relationship of the gas resulting from the explosion. In this relation, the energy released from the explosive material is obtained as equation 1. In this equation A, B, R1, R2 and ω are constant values for each explosive material obtained from the laboratory test. V equals the relative volume of the explosive and E equals the specific energy.

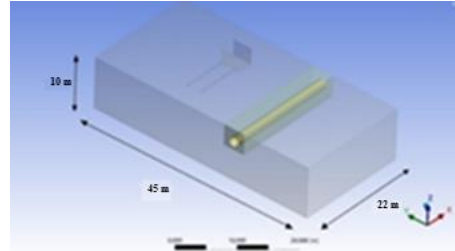


Figure 2. 3D model geometry in ANSYS software

Table 2 shows the geomechanical characteristics of the limestone mass. For this explosion, the wavelength was estimated to be 1.65 meters. By examining the proposed dimensions and after sensitivity analysis of the mesh dimensions and their distributions, the dimensions of the optimal mesh elements for the rock mass and soil were considered to be 25 cm. Solid or shell elements are used for mesh generation of rock masses, soil and explosives, and shell elements are used for pipes. A 10 cm square element is used to mesh the pipe. In Autodyn software, impedance boundaries or transmit boundary are used so that the waves do not reflect inside after hitting the wall of the model and do not cause errors. This boundary condition is applied to the parts of the block that are not free.

Table 2. Geomechanical characteristics of the limestone [12]

Rock mass parameter	Unit	Value
Density	Kg/m ³	2680
Elastic modulus	GPa	34
Poisson ratio	-	0.3
Shear modulus	GPa	13.3
Bulk modulus	GPa	25.7

Findings and argument

According to the investigated parameter of the peak particle velocity, the diagrams of velocity- time for three radial, tangential and vertical components have been extracted at a distance of 14.2 meters from the center of the explosion and on the pipeline and are shown in Figure 3.

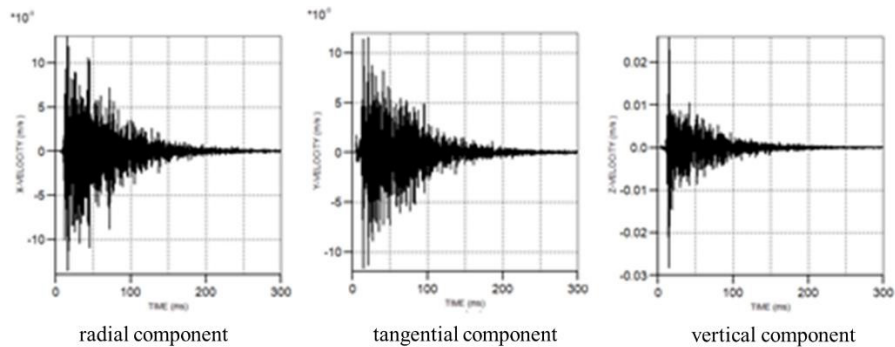


Figure 3. Diagrams of velocity - time of radial, tangential and vertical components at 14.2 meters' distance from the explosion center in numerical modeling

After solving the main models of the first explosion, the effects of the explosion on the pipeline were investigated. Figure 4 shows the diagrams of maximum stress, strain and displacement caused by the first explosion.

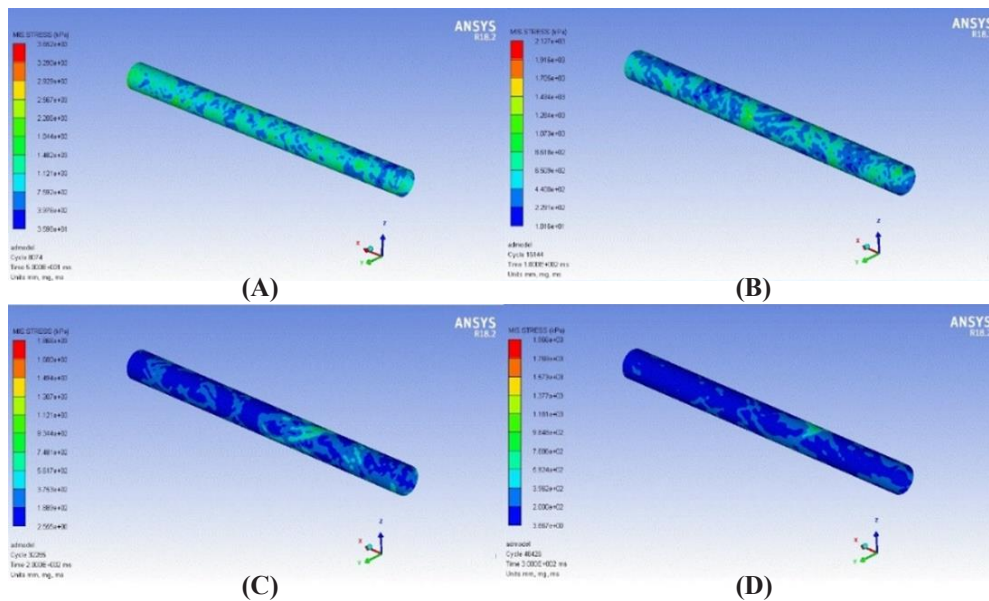


Figure 4. Effective stress (Von Mises) in the pipeline with time in the first explosion after the passage of **A:** 50 ms, **B:** 100 ms, **C:** 200 ms, **D:** 300 ms

CONCLUSIONS

In this paper, after the field sampling of the explosion and the analysis of its results, explosion modeling was done in ANSYS-Autodyn finite element software. These modelings were done in a continuous environment consisting of rock mass and soil without considering their discontinuities. Numerical modeling was done to validate the model and correct propagation of waves and compare them with the results of seismic data. The results obtained from the numerical model showed an average error of about 20%. The peak particle velocity at a distance of 14.2 meters from the explosion center and on the pipeline is calculated to be around 30 mm/s. The explosion results showed that the maximum stress, strain, and displacement at the pipe boundary and its surrounding environment are 17.24 MPa, 135 $\mu\text{mm/mm}$, and 0.18 mm, respectively.

According to the peak particle velocity obtained and also the stress results checked on the pipeline, it can be said that the amount of explosive material and also the explosion pattern used are suitable and the pipes are not damaged due to the explosion.

REFERENCES

- [1] Jimeno, E. L., Jimino, C. L., and Carcedo, A. (1995). *“Drilling and blasting of rocks”*. CRC Press, pp. 408.
- [2] Mortazavi, A. (2014). *“Rock Dynamics”*. Publications of Amirkabir University of Technology. (In Persian).
- [3] Amra, M. (2013). *“Assessment of the impact of fire on gas transmission pipes (case study of Qom-Dalijan Road railway tunnel)”*. Master’s Thesis, Faculty of Mining Engineering, University of Tehran. (In Persian).
- [4] Duvall, W. I., and Fogelson, D. E. (1962). *“Review of criteria for estimating damage to residences from blasting vibrations”*. U.S. Bureau of Mines, RI 5868.
- [5] Langefors, U., and Kihlström, B. (1978). *“The modern technique of rock blasting”*. Wiley, pp. 438.
- [6] Ambraseys, N. R., and Hendron, A. J. (1968). *“Dynamic behavior of rock masses in rock mechanics in engineering practice (KG Stagg & OC Zienkiewicz, Eds.)”*. John Wiley and Sons, New York.
- [7] Bureau of Indian Standards. (1973). *“Criteria for safety and design of structures subjected to underground blast”*. Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
- [8] Ghosh, A., and Daemen, J. J. K. (1983). *“A simple new blast vibration predictor (based on wave propagation laws)”*. In: the 24th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS).
- [9] Xu, G., Deng, Z., Deng, F., and Liu, G. (2013). *“Numerical simulation on the dynamic response of buried pipelines subjected to blast loads”*. Advanced Materials Research, 671-674: 519-522.
- [10] Parviz, M., Amin-nejad, B., Fayouz, A. and Alizade Elizaeei, M. E. (2017). *“Numerical modeling of explosion effect on buried oil and gas transmission pipelines in different soils by Eulerian-Lagrangian method”*. Journal of Structural and Construction Engineering, 5: 88-108. (In Persian).
- [11] Bakhshande Amnieh, H., Jafari, V., and Shirin, D. (2018). *“Numerical analysis of the effect of vibration waves caused by the explosion of Izeh-Karun 3 dam on oil and gas pipelines”*. 3rd International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Design, Tabriz. (In Persian).
- [12] Mahab Quds Consulting Company. (2016). *“Report on vibrations caused by explosions on water transmission lines in the project of the second water supply line to Tabriz from Zarinee River”*. (In Persian).



تحلیل عددی لرزش‌های ناشی از انفجار ترانشه بر خط لوله انتقال آب شرب تبریز

حسن بخشنده امنیه^{۱*}، سجاد آذری دودران^۲، بهنام علی پنهانی^۳

- ۱- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران
- ۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران
- ۳- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی معدن، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۱

دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۶

چکیده

امروزه با توسعه فعالیت‌های معدنی و عمرانی استفاده از عملیات انفجار به دلیل کاهش زمان و هزینه افزایش پیدا کرده است. استفاده از انفجار برای حفاری و خردایش سنگ علاوه بر مزایای آن معایبی دارد که از مهم‌ترین آنها می‌توان به لرزش زمین اشاره کرد. لرزش‌های ناشی از انفجار بخش مهم و قابل توجهی از فرآیند انفجار بوده و همواره کنترل میزان آن برای کاهش خسارت‌های احتمالی به مناطق اطراف لازم است. در این مقاله داده‌های میدانی انفجار انجام گرفته در پروژه خط دوم آبرسانی تبریز با استفاده از دستگاه‌های لرزه‌نگار سه مولفه‌ای Blast Recorder برداشت شده است. با مدل‌سازی فرآیند انفجار در نرم‌افزار المان محدود ANSYS-Autodyn رفتار محیط محدوده انفجار شبیه‌سازی شده است. میانگین خطاهای مدل‌سازی عددی نسبت به برداشت‌های میدانی حدود ۲۰ درصد برآورد شده است. با توجه به مدل‌سازی عددی بحرانی‌ترین حالت سرعت وارد شده به خط لوله کمتر از استانداردهای مجاز انفجار در نزدیکی خط لوله بوده و حداکثر تنش، کرنش و جابه‌جایی در مرز لوله و محیط به ترتیب برابر ۱۷/۲۴ MPa، ۱۳۵ $\mu\text{mm/mm}$ و ۰/۱۸ mm است.

کلمات کلیدی

انفجار، لرزش زمین، حداکثر سرعت ذرات، خط لوله، ANSYS-Autodyn.

استناد به این مقاله

بخشنده امنیه، ح، آذری دودران، س، علی پنهانی، ب؛ ۱۴۰۲؛ "تحلیل عددی لرزش‌های ناشی از انفجار ترانشه بر خط لوله انتقال آب شرب تبریز".
نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره هشتم، شماره ۱، ص ۹۵-۱۰۹.

DOI: 10.30479/JMRE.2022.15914.1533



۱- مقدمه

استفاده از عملیات انفجار امروزه یک راه حل مطلوب برای شکستن و خرد کردن سنگ‌های سخت به شمار می‌رود. با این حال استفاده از این روش عوارض جانبی نامطلوبی همچون لرزش زمین، انفجار هوا و پرتاب سنگ را به همراه دارد. از این بین عموماً لرزش زمین نیازمند بیشترین توجه است. پروژه‌های با عملیات حفاری و انفجار یک خطر بالقوه برای زیرساخت‌های مدفون به حساب می‌آید. خطوط لوله‌های مختلف آب، نفت و گاز به دلیل اهمیت و جایگاه بالا و همچنین خطرات احتمالی که بر روی محیط زیست دارند، نیازمند اتخاذ رویکرد مناسب در مقابل انفجار هستند.

عوامل مختلفی بر روی لرزش زمین تاثیر دارد که در دو گروه دسته‌بندی شده‌اند. گروه اول پارامترهای قابل کنترل و گروه دوم پارامترهای غیرقابل کنترل توسط طراح انفجار هستند. از پارامترهای غیرقابل کنترل می‌توان به زمین‌شناسی و ناپیوستگی‌های منطقه و ترکیبات تشکیل‌دهنده توده سنگ اشاره کرد [۱].

استانداردهای لرزش ارایه شده، نتیجه بیش از نیم قرن تحقیق دانشمندان و محققان در زمینه انفجار است. اولین تحقیقات جدی در این زمینه در سال ۱۹۳۰ توسط اداره معادن آمریکا انجام گرفته است. پارامترهای مختلفی در ارزیابی لرزش برای تعیین یک محدوده ایمن انفجار استفاده می‌شود. استانداردهای لرزش مجاز بر مبنای شاخص‌های مختلفی از جمله شاخص شتاب ذرات، فرکانس ارتعاش، نسبت انرژی، فاصله مقیاس شده و حداکثر سرعت ذرات (PPV) پایه گذاری شده‌اند. عوامل دیگری مانند طول موج و طول مدت لرزش و موارد مشابه نیز اهمیت زیادی در این بین دارند. پارامتر حداکثر سرعت ذرات به دلیل تاثیرپذیری کمتر از تغییرات ژئومکانیکی و همچنین راحتی اندازه‌گیری امروزه به طور گسترده در برآورد میزان خسارت وارده به سازه و حدود استانداردهای مجاز به کار گرفته می‌شود. از سال ۱۹۸۰ پارامتر حداکثر سرعت ذرات به عنوان یکی از معیارهای اصلی ارزیابی تخریب سازه پذیرفته شده است [۲].

مطالعات زیادی بر روی تاثیر لرزش ناشی از انفجار بر سازه‌های سطحی و مدفون انجام گرفته و روابط زیادی در خصوص استانداردهای حد مجاز لرزش و تنش حاصل از این امواج در این سازه‌ها و تاسیسات وجود دارد. بیشتر روابط پیش‌بینی لرزش زمین برای محاسبه حداکثر سرعت ذرات

ارایه شده‌اند. این روابط به چند دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول روابط تجربی‌اند که محققان بر اساس انفجارهایی که در مکان‌های مختلف انجام داده‌اند به دست آورده‌اند. این روابط در ضرایب مشخصه محل به علت تفاوت در ویژگی‌های محل انجام آزمایش متفاوت‌اند. بیشتر این روابط در پارامترهای حداکثر خرج در هر تاخیر و فاصله از انفجار مشترک‌اند. با گذشت زمان پارامترهای بیشتری به این روابط افزوده شده‌اند. دسته دوم روابط تحلیلی و هوشمند هستند، یعنی وابسته به سایت یا محدوده خاصی نبوده و جامعیت و عمومیت بیشتری دارند. این روابط در زمینه‌های دیگری نیز استفاده می‌شوند. به طور مثال روش‌های فازی، هوش مصنوعی، شبکه‌های عصبی و عددی کاربرد فراوانی در سایر علوم داشته و در محاسبه پیش‌بینی لرزش ناشی از انفجار و حداکثر سرعت ذرات از آنها استفاده می‌شود. علی‌رغم توسعه روش‌های پیچیده‌تر پیش‌بینی لرزش زمین، روابط تجربی بر حسب فاصله مقیاس شده هنوز هم محبوب‌ترین روش‌های پیش‌بینی لرزش ناشی انفجار است [۳]. رابطه انتشار موج ارایه شده توسط اداره معادن آمریکا بیش‌ترین کاربرد را در زمینه پیش‌بینی لرزش زمین دارد و در حال حاضر به وسیله محققان مختلف، سازمان‌های رسمی، کارخانه‌های تولید مواد منفجره استفاده می‌شوند. این رابطه معادله میرایی لرزش نیز نامیده می‌شود. در جدول ۱ مهم‌ترین روابط تجربی موجود آورده شده است [۱].

بررسی تاثیر لرزش‌های ناشی از انفجار با استفاده از روش‌های عددی و با تکامل نرم‌افزارها به مرور مورد توجه محققان قرار گرفته است. امروزه استفاده از نرم‌افزارهای مختلف حل عددی به علت انجام محاسبات پیشرفته و کاهش هزینه‌ها کاربرد زیادی دارد. پارامترهای تاثیرگذار مختلفی در برآورد میزان تنش‌های وارد به لوله و آسیب‌های احتمالی مطالعه شده است. از جمله این پارامترها می‌توان به فاصله از محل انفجار، وزن خرج انفجاری، عمق دفن لوله، مشخصات لوله و زمین در برگیرنده آن اشاره کرد. با توجه به پارامترهای زیاد موثر در آسیب‌های احتمالی به خط لوله یا سازه‌های زیرزمینی استفاده از روش‌های تحلیلی به علت محاسبات پیچیده راهی دشوار و پیچیده به نظر می‌رسد. استفاده از روش‌های عددی به علت کاهش زمان و خطای محاسباتی و همچنین نتایج بهتر در مقایسه با روش‌های دیگر مقرون به صرفه است.

وانگ^۱ و همکاران به روش عددی تاثیر انفجار ۱۰۰ کیلوگرم TNT در عمق یک متری خاک و تاثیر آن بر سازه بتنی مدفون در فاصله شش متری را بررسی کردند. در این تحقیق از نرم‌افزار

ایجاد شده در لوله بر اثر انفجار سطحی ارایه کردند. در این تحقیق بار انفجار به صورت متمرکز بر سطح زمین و به صورت ضربه‌ای فرض شده است. در این مطالعه برای مقایسه نتایج تحلیلی با محاسبات عددی از نرم‌افزار المان محدود ANSYS استفاده شده است. نتایج به دست آمده در مقایسه با نتایج حاصل از حل عددی اسپارزا^۸ و داودینگ^۹ و یک سری از آزمایش‌های عملی مطابقت خوبی نشان داد [۱۰].

یان کلووسکی^{۱۱} و همکاران انفجار زیرزمینی در نزدیکی یک دیوار مدفون در خاک با استفاده از نرم‌افزار حل صریح AUTODYN را با روش‌های عددی و تحلیلی بررسی کردند. آنها مقادیر فشار، تنش و کرنش ایجاد شده روی دیواره را بر اساس فواصل مختلف ماده انفجاری با آن بررسی کرده و نتایج آن با نتایج تحلیلی مطابقت خوبی نشان دادند [۱۱].

ژو^{۱۱} پاسخ دینامیکی لوله مدفون تحت انفجار سطحی را به روش عددی بررسی کرد. در این پژوهش تحلیل برای یک کیلوگرم TNT، پنج فاصله متفاوت از لوله و برای پنج قطر مختلف انجام گرفت. خاک از نوع ماسه‌ای و لوله فولادی در نظر گرفته شده است. معادله حالت مورد استفاده برای ماده منفجره از نوع JWLL و برای خاک به فرم مای گروسین^{۱۲} در نظر گرفته شد. او نتیجه گرفت که اگر قطر لوله ثابت فرض شود با افزایش فاصله ماده منفجره از لوله، تنش در لوله کاهش یافته و اگر فاصله بین ماده منفجره و لوله ثابت فرض شود لوله با قطر کوچک تنش بیشتری را تحمل می‌کند. همچنین او دریافت که اثر فاصله ماده منفجره از لوله بسیار بیشتر از قطر لوله در تنش ایجاد شده در لوله موثر است [۱۲].

پرویز و همکاران تنش و فشار ناشی از انفجار بر روی لوله مدفون در خاک با استفاده از نرم‌افزار المان محدود LS-DYNA را بررسی کردند. آنها با استفاده از دو نوع خاک با چگالی متفاوت و سه نوع سیال نفت، گاز و آب درون لوله را مدل‌سازی کردند. نتایج حاصل از پژوهش آنها نشان داد که فشار سیال درون لوله به پایداری لوله کمک زیادی می‌کند. آنها نتیجه گرفتند با افزایش چگالی سیال درون لوله، تنش و فشار کمتری به لوله وارد می‌شود. همچنین با کاهش چگالی خاک مورد استفاده در مدل‌سازی در انفجار، رفتار خاک مانند یک میراگر عمل می‌کند و تنش و فشار کمتری به لوله وارد می‌شود [۱۳].

بخشنده و همکاران لرزش‌های ناشی از انفجار و اثرات آن بر خطوط لوله نفت و گاز را با روش عددی در نرم‌افزار Autodyn بررسی کردند. آنها نتایج مدل‌سازی خود را با رابطه تجربی

حل صریح Autodyn و روش ترکیبی (SPH-FEM) برای مدل‌سازی کل محیط انفجاری استفاده شد. روش بدون شبکه برای فواصل نزدیک انفجار و روش شبکه‌بندی برای فواصل دورتر برای خاک استفاده شد. برای خاک از مدل سه فازی، برای بتن از مدل (RHT) و برای ماده منفجره از مدل (JWL) استفاده شد. نتایج نمودارهای تنش بر حسب فاصله مقیاس شده، تنش و سرعت ذرات خاک و تنش در دیوار بتنی به دست آمد. نتایج این مدل‌سازی با نتایج تجربی قبلی مطابقت خوبی داشت [۹].

جدول ۱: مهم‌ترین روابط پیش‌بینی لرزش زمین ناشی از انفجار

سال ارائه	نام معادله تجربی	معادله
۱۹۶۲	اداره معادن آمریکا ^۴ [۴]	$PPV = K \times \left(\frac{R}{Q^{1/2}} \right)^{-b}$
۱۹۶۳	لانگفورد و کیلستروم ^۳ [۵]	$PPV = K \left(\frac{R}{Q^{1/2}} \right)^{1/2}$
۱۹۶۸	امبرسیس و هندرون ^۴ [۶]	$PPV = K \left(\frac{R}{Q^{1/3}} \right)^{-b}$
۱۹۷۳	مؤسسه استاندارد هند ^۵ [۷]	$PPV = K \left(\frac{Q}{R^{2/3}} \right)^b$
۱۹۸۳	گوش و دیمن ^۶ [۸]	$PPV = K \left(\frac{R}{Q^{1/2}} \right)^{-b} e^{-\alpha R}$ $PPV = K \left(\frac{R}{Q^{1/3}} \right)^{-b} e^{-\alpha R}$

که در جدول ۱:

PPV: حداکثر سرعت ذرات (mm/sec)

R: فاصله محل ثبت لرزش از محل انفجار (m)

Q: حداکثر خرج مصرفی در هر تاخیر (Kg)

α : ضریب میرایی غیرالاستیک

K, e و b: ضرایب ثابت مشخصه محل و به پارامترهای

طراحی وابسته‌اند.

توان Q به شکل هندسی ماده منفجره بستگی دارد. برای خرج‌های کروی توان Q برابر ۱/۳ و برای خرج‌های استوانه‌ای توان آن برابر ۱/۲ است.

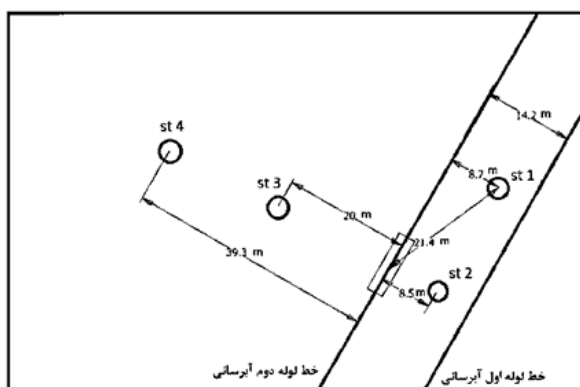
کوریتزیس^۷ و همکاران روشی برای حل تحلیلی کرنش

ارایه شده است. با این حال حد مجاز لرزش ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه را بسیاری از شرکت‌های مهم انتقال خط لوله به عنوان محدودیت سرعت انفجار در کنار خطوط لوله استفاده می‌کنند [۱۶].

۳- موقعیت جغرافیایی و برداشت داده‌های لرزه‌نگاری

پروژه خط دوم آبرسانی تبریز از لحاظ تقسیمات کشوری واقع در استان آذربایجان شرقی و در حدود سه کیلومتری جنوب غربی شهرستان آذرشهر قرار دارد. دستیابی به این محدوده از طریق جاده آسفالتی تبریز-آذرشهر که از جنوب غرب تبریز آغاز می‌شود امکان‌پذیر بوده و در کیلومتر دوم آذرشهر به عجب‌شیر واقع شده است. عملیات انفجار این پروژه مشرف بر جاده اصلی، باغ‌ها، منزل‌های مسکونی، معدن تراورتن و در فاصله حدود ۱۴ متری خط لوله آب اصلی شهر تبریز قرار دارد. با توجه به حساسیت و مجاورت عملیات‌های انفجار پروژه ترانشه خط دوم آبرسانی به تبریز بر خط لوله آب اصلی و مناطق اطراف لزوم طراحی و اجرای عملیات‌های انفجار ویژه الزامی است. با توجه به اینکه در یک طرف ترانشه محدوده معدن تراورتن و در طرف دیگر آن خط لوله فولادی و اصلی آب، باغ‌ها و جاده اصلی قرار دارد، بنابراین چیدمان دستگاه‌ها در دو طرف بلوک انفجاری انجام گرفت. از این‌رو چهار دستگاه لرزه‌نگار سه مولفه‌ای در نقاط مورد نظر نصب شدند.

شکل ۱ موقعیت ترانشه انفجاری و دستگاه‌های لرزه‌نگار سه مولفه‌ای نسبت به خط لوله اصلی آب تبریز در عملیات انفجار را نشان می‌دهند.



شکل ۱: موقعیت ترانشه انفجاری نسبت به دستگاه‌های لرزه‌نگار سه مولفه‌ای Blast Recorder در ترانشه خط دوم آبرسانی به تبریز بر خط لوله فولادی انتقال آب مجاور

ارایه شده در شرایط مشابه زمین‌شناسی برای توده‌سنگ آهک مقایسه کرده و همچنین حداکثر سرعت ذرات به دست آمده از نتایج مدل‌سازی را با استانداردهای موجود برای انفجار در مجاورت خطوط لوله مقایسه کردند. نتایج نشان از دقت خوب مدل‌سازی بوده و آسیبی به خطوط لوله وارد نمی‌شود [۱۴].

۲- استانداردهای لرزش زمین برای خطوط لوله

خطوط لوله به عنوان یکی از شریان‌های حیاتی اهمیت فراوانی دارد و اطمینان از ایمنی آن طی دوران بهره‌برداری ضروری است. خطوط لوله انتقال نفت، گاز و از جمله آب با توجه به عواقب شدید آسیب آنها اهمیت دو چندان دارند. توسعه فعالیت‌های عمرانی در کنار تاسیسات ایجاد شده قبلی و ضرورت استفاده از انفجار در چنین طرح‌هایی، سبب توسعه تحقیق اثرات انفجار بر سازه‌های مجاور از جمله خطوط لوله و ایجاد معیارهایی در این زمینه شده است.

سیسکایند^{۱۳} و همکاران طی یک بررسی جامع در اداره معادن آمریکا، اثرات انفجار در معادن زیرزمینی در جنوب ایندیانا را بر خطوط لوله گاز و آب تحت فشار را بررسی کردند. آنها در تحقیق خود از بررسی انفجارهای مختلف در فاصله‌های متفاوت از خطوط لوله استفاده و روابطی را برای پیش‌بینی مقادیر تنش و کرنش حاصل از انفجار در خطوط لوله ارایه کردند. آنها در پژوهش خود برای بیان معیار لرزش قابل قبول، رابطه کرنش ایجاد شده در خطوط لوله با مقادیر سرعت ذره‌ای بررسی و مقادیر لرزش قابل قبول برای لوله‌های فولادی با مشخصات گوناگون را طبق جدول ۲ ارایه کردند. همان‌طور که مشخص است حداقل لرزش مجاز برای لوله‌ها ۱۲۷ میلی‌متر بر ثانیه برآورد شده است [۱۵].

جدول ۲: حدهای مجاز لرزش برای انواع مختلف لوله [۱۵]

نوع لوله	حد مجاز (میلی‌متر بر ثانیه)	
	لرزش شعاعی	لرزش قائم
Grade B	۱۵۵	۱۲۷
X-42	۱۸۰	۱۵۰
X-56	۲۵۰	۲۰۰

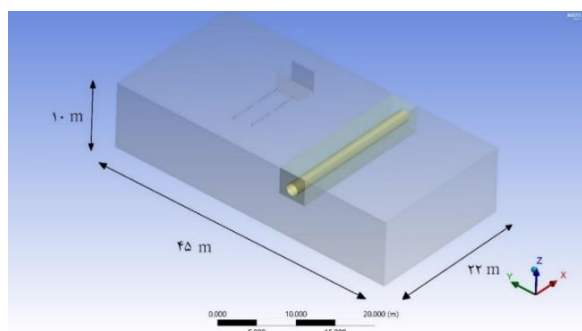
با گذشت زمان و با توجه به گسترش فعالیت‌های عمرانی و انجام عملیات انفجار در مجاورت خطوط لوله، محدودیت‌ها و استانداردهای مجاز به وسیله سازمان‌ها و شرکت‌های مختلف

انتشار صحیح امواج، به مدل‌سازی همراه با خط لوله و خاک کانال دربرگیرنده آن اقدام شده و اثرات انفجار بر روی خط لوله بررسی شده است.

۵-۱- مدل هندسی

خط لوله اول آب شرب تبریز به موازات ترانسه انفجار و ردیف‌های چال‌های انفجاری قرار گرفته و در یک امتداد هستند. لوله از جنس فولاد St 37-2، و به قطر ۱٫۸ متر و ضخامت ۱۴ میلی‌متر بوده و در عمق ۲٫۵ متری زمین از مرکز لوله قرار گرفته و فشار عملیاتی خط لوله ۱ مگاپاسکال است. اطراف خط لوله پوشیده از ماسه متراکم بوده و در داخل ترانسه‌ای به طول، عرض و ارتفاع تقریبی $4 \times 4.2 \times 22$ متر قرار گرفته است.

هندسه مدل اصلی از چهار بخش توده سنگ، خاک، مواد منفجره و لوله تشکیل شده است. شکل زمین به صورت مکعبی به ابعاد $10 \times 22 \times 45$ متر ایجاد شده است. شکل ۲ جانمایی خط لوله آب و خاک اطراف آن نسبت به ترانسه انفجاری را نشان می‌دهد. قسمتی از زمین که ترانسه در اطراف لوله حفاری شده و با خاک پر و متراکم شده است با مکعبی به ابعاد $4 \times 4.2 \times 22$ متر مدل شده و بقیه قسمت مدل متشکل از توده سنگ است. در داخل قسمت خاک لوله‌ای به قطر ۱٫۸ و طول ۲۲ متر و ضخامت ۱۴ میلی‌متر قرار دارد. مواد منفجره به صورت چال‌هایی با عمق ۳ متر و شعاع ۵۱ میلی‌متر ایجاد شده است.



شکل ۲: جانمایی سه بعدی اجزای مدل اصلی در نرم‌افزار ANSYS

در این پروژه هدف بررسی اثرات لرزش‌های انفجار ترانسه خط دوم بر خط لوله اول آبرسانی تبریز است. هدف از این چیدمان بررسی کامل اثرات لرزش بر خط لوله فولادی آب، منازل مسکونی و توده سنگ معدن تراورتن در اطراف منطقه انفجار است.

۴- الگوی حفاری و انفجار

این انفجار با استفاده از سیستم کورتکس و ماده منفجره امولایت انجام گرفته است. تاخیر بین چال‌ها به علت استفاده از سیستم کرتکس ناچیز بوده و همه چال‌ها حداکثر در ۱٫۵ میلی‌ثانیه منفجر می‌شوند. در این انفجار ۳۵ چال انفجاری در ۲ ردیف به عمق ۳ متر و قطر ۵۱ میلی‌متر منفجر شدند. در مجموع ۲۱٫۸ کیلوگرم امولایت در این انفجار استفاده شد. فواصل هر کدام از چال‌ها در هر ردیف با همدیگر ۰٫۵ متر و فواصل چال‌های دو ردیف ۲٫۸ متر بوده است.

۵- مدل‌سازی عددی

در این پژوهش اثر لرزش انفجار بر لوله فولادی مدفون تحت اثر انفجار بررسی شده است. برای مدل‌سازی انفجار، ابتدا مدل هندسی در نرم‌افزار Autodesk Inventor برای افزایش دقت به صورت سه بعدی ساخته شد و پس از انتقال به محیط نرم‌افزاری ANSYS سایر عملیات مانند اختصاص مواد، مش‌بندی و اعمال شرایط مرزی انجام شده است. بعد از ایجاد مدل، برای حل عددی مساله از نرم‌افزار حل صریح Autodyn استفاده شده است.

رفتارسنجی لرزش ناشی از انفجار در فواصل دور با هدف بررسی و مطالعه خواص میرایی محیط انجام می‌گیرد. به این منظور مدل‌سازی این رفتار باید مطابق با شرایط زمین باشد. در مقابل، در فواصل نزدیک‌تر رفتارسنجی با اهداف تشخیصی و کنترل خسارت ناشی از انفجار انجام می‌پذیرد. در این شرایط، می‌توان مدل‌سازی را با شرایط همگن و با درصد خطای نسبتاً کمی انجام داد.

در ابتدا برای شبیه‌سازی شرایط محیط پروژه، مدلی بدون خط لوله و متشکل از چال‌های انفجار در محیط توده سنگ آهک ایجاد شده تا شرایط میدان آزاد را مهیا کند. در ادامه نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی با نتایج لرزه‌نگارها اعتبارسنجی و ارزیابی شده است. با اطمینان از صحت مشخصات و شرایط نسبت داده شده به محیط و همچنین

۵-۲- مدل ماده منفجره

بعد از انفجار ماده منفجره، محصولات واکنش در حالت گازی رخ می‌دهد. برای پیش‌بینی رفتار مواد منفجره باید یک معادله حالت مناسب برای مواد منفجره مدل‌سازی شده استفاده شود. به طور کلی معادله حالت جونز-ویلکینز-لی^{۱۴} (JWL)، که یک معادله غیرخطی بوده و رابطه بین فشار و حجم مخصوص از واکنش محصولات گازی انفجار را بیان می‌کند برای این منظور استفاده می‌شود [۱۷]. در نرم‌افزار Autodyn برای محاسبه رابطه حجم-فشار گاز حاصل از انفجار از رابطه JWL استفاده شده است. در این رابطه انرژی آزاد شده از ماده منفجره به صورت رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (1)$$

که در آن:

A, B, R_1, R_2 و ω : مقادیر ثابت برای هر ماده منفجره است که از آزمون انفجار آزمایشگاهی به دست می‌آید.

V : برابر حجم نسبی ماده منفجره

E : معادل انرژی ویژه است.

۵-۳- خصوصیات مواد و مدل رفتاری

نرم‌افزار Autodyn برای مدل‌های پیوسته طراحی شده به همین علت از درزه و ناپیوستگی موجود چشم‌پوشی شده و محیط به صورت پیوسته در نظر گرفته شده است. برای تعریف مدل مقاومتی سنگ و خاک از مدل دراکر-پراگر که یک مدل رفتاری الاستوپلاستیک تعمیم یافته از معیار ون‌میزرز^{۱۵} است، استفاده شده است. این مدل برای بیان رفتار مواد اصطکاکی دانه‌ای، مانند ماسه و سنگ استفاده می‌شود [۱۸]. برای تعریف رفتار مقاومتی فلز در حالت پلاستیک از مدل جانسون-کوک^{۱۶} استفاده شده است. در جدول ۳ مشخصات ژئومکانیکی توده‌سنگ آهک آورده شده است.

۵-۴- مش‌بندی

برای بیان دقیق انتقال موج در یک مدل عددی باید ابعاد المان بین ۰٫۱ تا ۰٫۱۲۵ طول موج ورودی باشد [۲۰]. برای تعیین ابعاد مش‌بندی، ابتدا مدت زمان‌های دوام موج با استفاده از فشار وارد شده به دیواره چال انفجاری در انفجار با استفاده از امولایت اندازه‌گیری شده و سپس با استفاده از مقادیر به

جدول ۳: مشخصات ژئومکانیکی توده‌سنگ آهک اطراف خط لوله اول آبرسانی تبریز [۱۹]

مقدار	واحد	مشخصات توده سنگ
۲۶۸۰	Kg/m ³	چگالی
۳۴	GPa	مدول الاستیسیته
۰٫۳	-	نسبت پواسون
۱۳٫۳	GPa	مدول برشی
۲۵٫۷	GPa	مدول حجمی

دست آمده و سرعت انتشار امواج فشاری در توده سنگ آهک مقدار طول موج محاسبه شده است. برای این انفجار طول موج ۱٫۶۵ متر برآورد شد. با بررسی ابعاد پیشنهادی و پس از آنالیز حساسیت ابعاد مش و توزیع آن ابعاد المان‌های بهینه مش‌بندی برای توده‌سنگ آهک و خاک ۲۵ سانتی‌متر لحاظ شد. برای مش‌بندی توده‌سنگ، خاک و مواد منفجره از المان جامد^{۱۷} یا توپر و برای لوله از المان پوسته‌ای^{۱۸} استفاده شده است. برای مش‌بندی لوله از المان مربعی به ابعاد ۱۰ سانتی‌متر استفاده شده است.

۵-۵- شرایط مرزی

در مدل‌های دینامیکی عددی یکی از موضوعات مورد توجه عدم انعکاس امواج به داخل مدل در شرایط نامتناهی است که می‌توان از مرزهای جاذب و بدون بازتاب استفاده کرد. مرزهای مدل باید به گونه‌ای باشد تا امواج بعد از برخورد به دیواره مدل بازتابی به داخل نداشته باشد و باعث بروز خطا نشود. در نرم‌افزار Autodyn از مرزهای امپدانس^{۱۹} یا مرز انتقالی^{۲۰} برای فراهم کردن این فرض استفاده می‌شود. این شرط مرزی در قسمت‌هایی از بلوک که آزاده نبوده اعمال شده است.

۶- نتایج و بحث

بعد از ایجاد مدل هندسی و اعمال تمام شرایط لازم برای شروع انفجار، زمان حل مساله تعیین می‌شود که برای این انفجار زمان حل ۳۰۰ میلی‌ثانیه در پایان محاسبات تعیین شد. بعد از اتمام زمان حل مدل عددی، نتایج آنها بررسی شدند. با توجه به پارامتر مورد بررسی حداکثر سرعت ذرات، نمودارهای سرعت نسبت به زمان برای سه مولفه شعاعی، مماسی و قائم در فاصله ۱۴٫۲ متری از مرکز انفجار و بر روی خط لوله استخراج و

۷- بررسی آسیب به خط لوله با توجه با استانداردها

حداکثر سرعت ذرات بر روی خط لوله با توجه به مدل‌سازی عددی در بدترین حالت ۳۰ میلی‌متر بر ثانیه برآورد شده است. از طرفی مطابق استانداردهای موجود کمترین حد مجاز لرزش برای شروع آسیب به لوله فولادی ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه است. با توجه به نتایج انفجار آسیبی به خط لوله وارد نشده و عملیات انفجار به صورت ایمن است.

۸- بررسی حداکثر تنش، کرنش موثر و جابه‌جایی در مدل‌سازی عددی

بعد از حل مدل‌های اصلی انفجار اول، اثرات ناشی از انفجار بر روی خط لوله بررسی شد. شکل ۵ بیانگر نمودارهای حداکثر تنش، کرنش و جابه‌جایی ایجاد شده ناشی از انفجار اول در مرز خط لوله و محیط است.

با توجه به نمودارهای به دست آمده حداکثر تنش، کرنش و جابه‌جایی وارد شده در مرز لوله و محیط اطراف آن به ترتیب

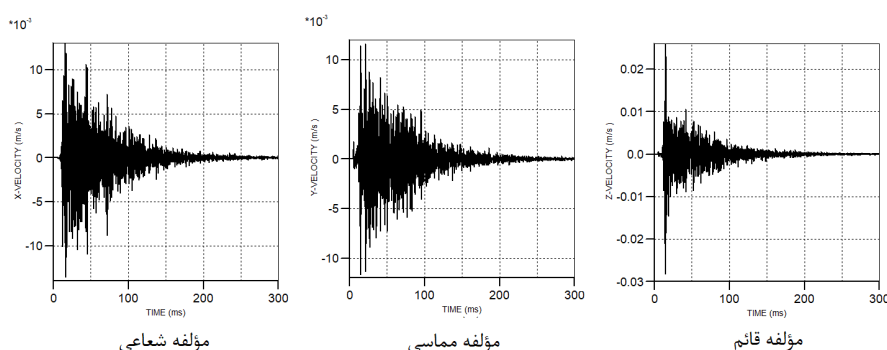
در شکل ۳ نشان داده شده است.

مقادیر به دست آمده با نتایج واقعی آنها در برداشت‌های میدانی مقایسه و بررسی شده است.

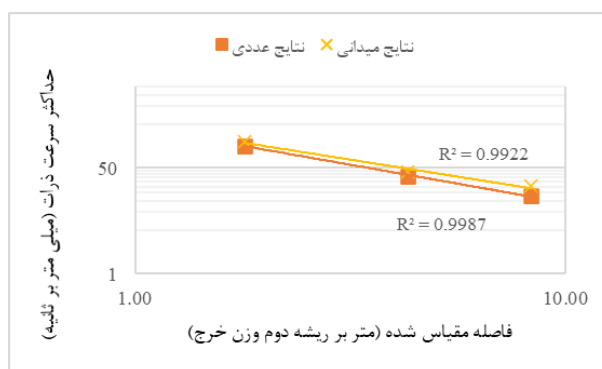
با توجه به خطاهای محاسبه شده متوسط خطاها حدود ۲۰ درصد محاسبه شده است. بیشترین اختلاف خطای ۲۳ درصد در برآیند حداکثر سرعت ذرات مشاهده می‌شود که بیانگر نتایج قابل قبول است. با توجه به اینکه در این مدل‌سازی محیط پیوسته بوده اما در محیط واقعی وجود هرگونه ناپیوستگی و درزه و شکاف ممکن است باعث افزایش یا کاهش مقدار در برداشت داده‌ها شود. معادله انتشار موج در برداشت میدانی و مدل‌سازی عددی در توده‌سنگ آهک طبق روابط ۲ و ۳ محاسبه شده است. در شکل ۴ نمودارهای برآیند حداکثر سرعت ذرات در برداشت‌های لرزه‌نگاری و مدل‌سازی عددی با فاصله مقیاس شده مقایسه شده است.

$$PPV = 212.7 SD^{-1.159} \quad (2)$$

$$PPV = 192.23 SD^{-1.11} \quad (3)$$



شکل ۳: نمودارهای سرعت جابه‌جایی ذرات- زمان مولفه‌های شعاعی، مماسی و قائم در فاصله ۱۴/۲ متری از مرکز انفجار در مدل‌سازی عددی



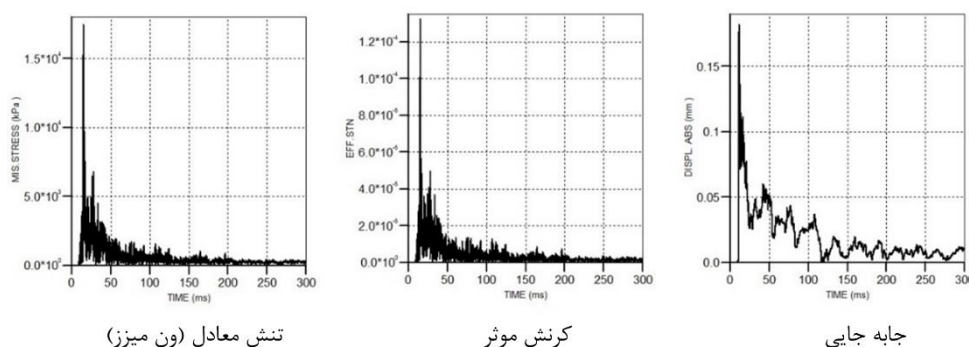
شکل ۴: نمودار مقایسه برآیند حداکثر سرعت ذرات برداشت‌های لرزه‌نگاری و مدل‌سازی عددی با فاصله مقیاس شده

یک محیط پیوسته متشکل از توده سنگ و خاک بدون در نظر گرفتن ناپیوستگی‌های آن‌ها انجام شدند. مدل‌سازی عددی برای اعتبارسنجی محیط و انتشار صحیح امواج انجام گرفته و با نتایج داده‌های لرزه‌نگاری مقایسه شدند. نتایج به دست آمده از مدل عددی بیانگر خطای متوسط حدود ۲۰ درصد است. حداکثر سرعت ذرات در فاصله ۱۴٫۲ متری از مرکز انفجار و بر روی خط لوله در حدود ۳۰ میلی‌متر بر ثانیه محاسبه می‌شود. نتایج انفجار نشان می‌دهد حداکثر تنش، کرنش و جابه‌جایی در مرز لوله و محیط اطراف آن به ترتیب برابر $17,24 \text{ MPa}$ ، $135 \text{ } \mu\text{m}/\text{m}$ و $0,18 \text{ mm}$ است. با توجه به حداکثر

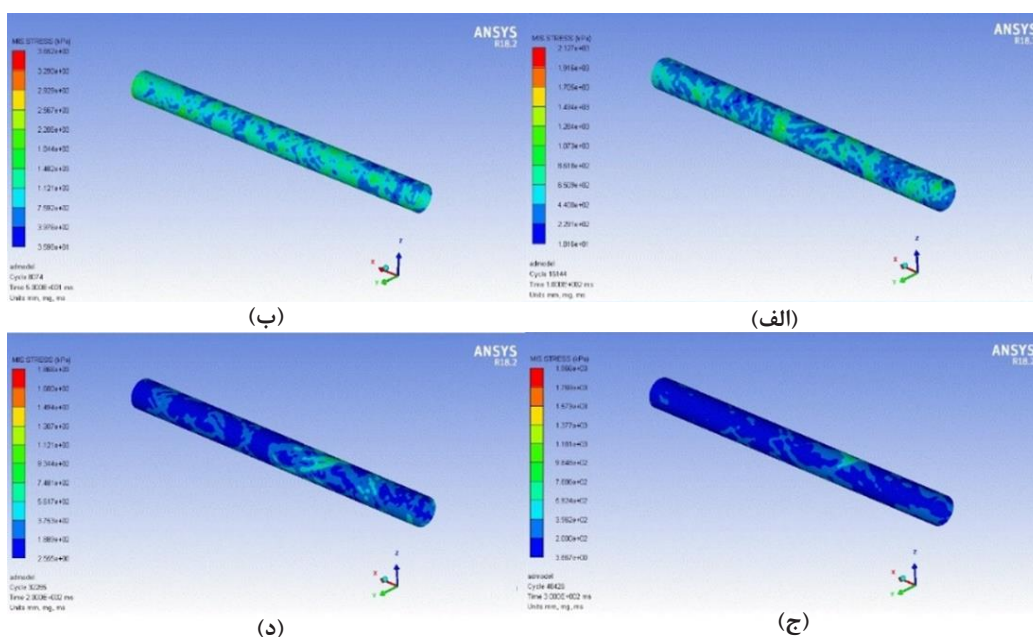
تنش معادل ون‌میزز ایجاد شده در خط لوله ناشی از انفجار را نشان می‌دهد. طبق مقادیر تنش مشاهده شده بر روی خط لوله (مقادیر بسیار کوچکتر از حد پلاستیک فولاد است)، لوله دچار آسیبی نمی‌شود که با نتایج میدانی تطابق دارد.

۹- نتیجه‌گیری

در این مقاله بعد از برداشت میدانی انفجار انجام گرفته و تحلیل نتایج آنها به مدل‌سازی انفجار در نرم‌افزار المان محدود ANSYS-Autodyn اقدام شد. این مدل‌سازی‌ها در



شکل ۵: نمودار تنش، کرنش و جابه‌جایی حداکثر وارد شده در مرز لوله و محیط اطراف آن نسبت به زمان



شکل ۶: تنش موثر (ون‌میزز) ایجاد شده در خط لوله با گذشت زمان در انفجار اول بعد از گذشت: (الف) ۵۰ میلی‌ثانیه، (ب) ۱۰۰ میلی‌ثانیه، (ج) ۲۰۰ میلی‌ثانیه، (د) ۳۰۰ میلی‌ثانیه

Materials Research, 671-674: 519-522.

[۱۳] پرویز، م.، امین‌نژاد، ب.، فیوض، ع.، علیزاده الیزئی، م.، ۱۳۹۷؛
"مدل‌سازی عددی اثر انفجار بر خطوط لوله‌های مدفون انتقال
نفت و گاز در خاک‌های مختلف به روش اویلری-لاگرانژی".
نشریه مهندسی سازه و ساخت، دوره ۵، ص ۸۸-۱۰۸.

[۱۴] بخشنده امنیه، ح.، جعفری، و.، شیرین، د.؛ ۱۳۹۷؛ "تحلیل عددی
اثر امواج لرزش ناشی از انفجار آزادراه ایذه-کرون ۳ بر خطوط
لوله نفت و گاز". سومین کنفرانس بین‌المللی عمران معماری و
طراحی شهری، تبریز.

[15] Siskind, D. E., Stagg, M. S., Wiegand, J. E., and Schulz,
D. L. (1994). "Surface mine blasting near transmission
pipelines". Technical Report, Unated State Department
of the Interior, RI9523.

[16] Rigas, F. (2009). "Safety of buried pressurized gas
pipelines near explosion sources". Proceedings of the
1st Annual Gas Processing Symposium, 1-10.

[17] Topkaraoglu, E. (2014). "Design and development of
a cylinder expansion test setup for determination of
equation of state parameters of various explosives".
Master's Thesis, Mechanical Engineering, Middle East
Technical University.

[18] ANSYS Inc. (2015). "ANSYS Mechanical APDL
Material Reference". In: Advanced Materials Research,
Trans Tech Publications Ltd, 1079: 198-201.

[۱۹] شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس؛ ۱۳۹۶؛ "گزارش لرزش‌های
ناشی از انفجارات بر روی خطوط انتقال آب در پروژه خط دوم
آبرسانی به تبریز از زربینه رود".

[20] Park, D., and J.-Kwang, A. (2016). "Numerical
simulation of blast induced vibration propagation".
Japanese Geotechnical Society Special Publication,
4(2): 23-26.

سرعت ذرات به دست آمده و همچنین نتایج تنش بررسی
شده بر روی خط لوله می‌توان گفت که میزان ماده منفجره و
همچنین الگوی انفجار استفاده شده مناسب بوده و آسیبی به
لوله‌ها در اثر انفجار وارد نمی‌شود.

۱۰- مراجع

[1] Jimeno, E. L., Jimino, C. L., and Carcedo, A. (1995).
"Drilling and blasting of rocks". CRC Press, pp. 408.

[۲] مرتضوی، ع.؛ ۱۳۹۴؛ "دینامیک سنگ". انتشارات دانشگاه صنعتی
امیرکبیر.

[۳] امرا، م.؛ ۱۳۹۲؛ "ارزیابی تأثیر آتشباری بر لوله‌های انتقال گاز
(مطالعه موردی تونل راه آهن جاده قم - دلیجان)". پایان‌نامه
کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران.

[4] Duvall, W. I., and Fogelson, D. E. (1962). "Review
of criteria for estimating damage to residences from
blasting vibrations". U.S. Bureau of Mines, RI 5868.

[5] Langefors, U., and Kihlström, B. (1978). "The modern
technique of rock blasting". Wiley, pp. 438.

[6] Ambraseys, N. R., and Hendron, A. J. (1968).
"Dynamic behavior of rock masses in rock mechanics
in engineering practice (KG Stagg & OC Zienkiewicz,
Eds.)". John Wiley and Sons, New York.

[7] Bureau of Indian Standards. (1973). "Criteria for safety
and design of structures subjected to underground
blast". Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.

[8] Ghosh, A., and Daemen, J. J. K. (1983). "A simple new
blast vibration predictor (based on wave propagation
laws)". In: the 24th US Symposium on Rock Mechanics
(USRMS).

[9] Wang, Z., Lu, Y., Hao, H., and Chong, K. (2005). "A
full coupled numerical analysis approach for buried
structures subjected to subsurface blast". Computers &
Structures, 83(4-5): 339-356.

[10] Kouretzis, G. P., Bouckovalas, G. D., and Gantes, C. J.
(2007). "Analytical calculation of blast-induced strains
to buried pipelines". International Journal of Impact
Engineering, 34: 1683-1704.

[11] Yankelevsky, D. Z., Feldgun, V. R., and Karinski, Y. S.
(2008). "Underground explosion of a cylindrical charge
near a buried wall". International Journal of Impact
Engineering, 35: 905-919.

[12] Xu, G., Deng, Z., Deng, F., and Liu, G. (2013).
"Numerical simulation on the dynamic response of
buried pipelines subjected to blast loads". Advanced

¹ Wang

² USBM

³ Langefors and Kihlström

⁴ Ambraseys and Hendron

⁵ Bureau of Indian Standard

⁶ Ghosh and Daemen

⁷ Kouretzis

⁸ Esparza

⁹ Dowding

¹⁰ Yankelevsky

- ¹¹ Xu
- ¹² Mie-Gruneisen
- ¹³ Siskind
- ¹⁴ Jones-Wilkins-Lee
- ¹⁵ Von Mises
- ¹⁶ Jahns-Cook
- ¹⁷ Solid
- ¹⁸ Shell
- ¹⁹ Impedance Boundary
- ²⁰ Transmit Boundary