

مدلسازی عددی اثر انفجار بر خطوط لوله های مدفون انتقال نفت و گاز در خاکهای مختلف به روش اویلری-لاگرانژی

محسن پرویز^۱، بابک امین نژاد^{۲*}، علیرضا فیوض^۳، محمد هادی علیزاده الیزئی^۴

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

۴- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

چکیده

در این مقاله به بررسی تنش و فشار تحت انفجار بر روی لوله مدفون در خاک با استفاده از نرم افزار اجزا محدود ال اس داینا پرداخته شده است. در این مقاله پنج مدل ماده سیال، هوا، خاک، لوله و تی ان تی مورد استفاده قرار گرفته است و روش حل مسئله روش اویلری-لاگرانژی می باشد. در ادامه مقایسه ای بین تنش و فشار بدست آمده از سیال ها صورت گرفته و نتایج حاصل از این مقاله نشان میدهد که با کاهش چگالی سیال، فشار وارده بر لوله بیشتر شده است و تنش و فشار بیشتری به لوله منتقل میشود و همچنین با افزایش چگالی سیال، تنش و فشار کمتری به لوله وارد میشود و همچنین با افزایش چگالی خاک مورد استفاده در مدلسازی در انفجار، تنش و فشار بیشتری به لوله انتقال یافت و با کاهش چگالی خاک، رفتار خاک مانند یک میراگر عمل میکند و تنش و فشار کمتری به لوله وارد میشود و در نتیجه آسیب کمتری به لوله وارد میشود. حال با شناخت عملکرد نوع خاک در انتقال تنش و فشار در لوله های مدفون تحت انفجار می توان پی برد که در خاکهای با چگالی بالا بایستی به دلیل انتقال بالای تنش و فشار از لوله های با مقاومت بالا استفاده نمود و در خاکهای با چگالی پایین تر بدلیل عملکرد بهتر و مناسب تر خاک (مانند میراگر) و انتقال تنش و فشار کمتر می توان از لوله های با مقاومت پایین تر استفاده نمود. مقدار فشار ماکزیمم برای سیال های گاز، نفت و آب به ترتیب برابر ۹۷۶/۶۷، ۵۸۸/۶ و ۵۸۰/۹ مگاپاسگال بدست آمده است که این نتایج بیانگر این موضوع است که با کاهش چگالی سیال ها، فشار افزایش می یابد. فشار وارده از سوی سیال گاز به لوله نسبت به نفت و آب به ترتیب ۳۹/۷۳ و ۴۰/۵۲ درصد بیشتر بدست آمده است.

کلمات کلیدی: انفجار، لوله مدفون، اویلری-لاگرانژی، تنش، فشار، ال اس داینا.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2017.80123.1114	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.80123.1114	۱۳۹۷/۰۳/۳۰	۱۳۹۶/۰۳/۲۵	۱۳۹۶/۰۳/۲۴	۱۳۹۶/۰۳/۲۰	۱۳۹۵/۱۲/۲۱
*نویسنده مسئول:					دکتر بابک امین نژاد	
پست الکترونیکی:					babak_aminnejad1983@yahoo.com	

Numerical modelling of the explosion effect on buried transporting water, oil and gas pipelines in different soils by ALE Method

Mohsen Parviz¹, Babak Aminnejad^{*2}, Alireza Fiouz³, Mohammad Hadi Alizadeh Elizei⁴

1- PhD Candidate in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran

3- Assistant Professor, Department of Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran

4- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran

ABSTRACT

The current research is a parametric study of the behaviour of pipes buried in the soil under blast loading. The effects on the physical properties of liquid, air, soil, pipe and TNT were investigated. The arbitrary Lagrangian-Eulerian method was used in LS-DYNA software and the effects were compared. The results show that the pipe experienced increased pressure and stress as the fluid density of the soil decreased. This indicates that an increase in fluid density of the soil decreased the pressure and stress imposed on a pipe and vice versa. The results show that higher density soil caused higher pressure and stress transfer to the pipe. Explosions in lower density soil resulted in less damage to the pipe because the soil acted as a damper under the waves of explosion. Knowing the soil type performance relating to stress and pressure on the buried pipes subject to explosions indicates that pipes with high resistance should be used in soil of high density to resist the transmission of high stress and pressure to the pipes. Pipelines buried in soil with a lower density can use pipes with lower resistance because the soil will act as a damper and transmit less stress and pressure to the pipes. Peak pressures for gas, oil and water have become equal to 976.67, 588.6 and 580.91 MPa, respectively. This indicates that the higher the fluid density is; the less pressure will be imposed on the pipe. Pressure on gas has been increasing than oil and water pipes 39.73 and 40.52 percent respectively.

ARTICLE INFO

Received: 11/03/2017

Revised: 10/06/2017

Accepted: 14/06/2017

Keywords:

Explosion

Buried Pipes

Lagrangian-Eulerian

Stress

Pressure

LS-Dyna

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2017.80123.1114

*Corresponding author: Dr. Babak Aminnejad.

Email address: babak_aminnejad1983@yahoo.com

ایران با دارا بودن منابع غنی نفت و گاز همیشه خطر ناشی از انفجار بروی خطوط لوله های مدفون را پیش روی خود داشته است. حفاری و اکتشافات زمین بوسیله مواد منفجره، انفجار مخازن و یا انفجار های تصادفی نیز می توانند سرچشمه اعمال بار انفجار به لوله ها و سازه های مدفون باشند [۱]. با توجه به ماهیت پدیده انفجار، مشخص کردن مکان وقوع قطعی آن غیر قابل پیش بینی است لذا تحلیل دقیق پدیده انفجار نیازمند دانش کافی پیرامون مربوط به روابط حاکم بر رفتار سیالات تراکم پذیر است. مدفون کردن خطوط لوله های مدفون دارای ۲ مزیت است: (۱) از دسترسی مستقیم به خطوط در انفجار های تروریستی و برخورد مستقیم در انفجار های نظامی در امان می باشد، (۲) بحث پدافند غیرعامل و عدم دید مستقیم به خطوط لوله، که این موضوع در انفجار های نظامی دارای اهمیت بیشتری است. با توجه به اهمیت لوله های مدفون در زندگی روزمره شهری و تأثیر خرابی آن در اثر زلزله و انفجار، توجه بسیاری از پژوهشگران را به لوله های مدفون جلب کرده است. لمپسون روابطی برای فشار ناشی از انفجار یک ماده منفجره در زیر سطح زمین با در نظر گرفتن تأثیر فاصله از مرکز انفجار، وزن ماده منفجره، خصوصیات خاک و عمق خرج پیشنهاد داد. لمپسون اظهار داشت نسبت قطر چاله انفجار به عمق خرج، حساس بوده و حساسیت کمتری به ثابت خاک (K) دارد [۲]. رونانکی در سال ۱۹۹۷ پاسخ رفتارهای لوله های مدفون را تحت بارگذاری استاتیک و لرزه ای در محیط سه بعدی بدست آورد. روند به کار رفته در تحقیق مذکور، به کارگیری روش اجزای محدود با کمک نرم افزار Sap80 بوده است [۳]. در سال ۲۰۰۷ لوسیونی و آمبروسینی با انجام مدل سازی عددی انفجارهای زیر سطح زمین با مقادیر مختلف TNT به بررسی ابعاد چاله انفجار ناشی از انفجار زیر سطح زمین پرداختند و نمودار فشار بر حسب فاصله مقیاس شده انفجار که از مدل سازی عددی استخراج شده بود را با روابط ارائه شده توسط استاندارد ارتش آمریکا مقایسه کردند که نتایج تطابق قابل قبولی با یکدیگر داشتند [۴]. طراحی لوله های مدفون با تأثیر بارهای انفجاری در سال ۲۰۱۰ توسط اولاریواژ و همکاران بررسی شده است. ایشان با استفاده از روش المان محدود و شبیه سازی با نرم افزار Abaqus لوله های مدفون در خاک و تراشه روباز را بررسی نمودند. در سال ۲۰۰۸ تیان و کاسیدی به ارائه سه مدل پلاستیک برای حل عددی اندرکنش خاک و لوله که می توانند، به تنهایی و یا بصورت ترکیبی از یکدیگر، مقادیر نیرو-جابه جایی در مقطع خطوط لوله مدفون با قطر کم را به دست آورند، پرداختند. مدل اول بر پایه نظریه کرنش سخت شوندگی پلاستیک و با فرض پاسخ الاستیک کامل طرح شده است. مدل دوم با فرض اجازه رفتار پلاستیک در محدوده تسلیم و مدل سوم با فرض سخت شوندگی کینماتیکی طرح شده است. نتایج حاکی از آن بود که مدل سازی به هر سه روش برای لوله های دور از ساحل مدفون شده در خاک ماسه ای، پاسخ های قابل قبولی را ارائه دادند [۵]. در سال ۲۰۰۷ کوریتزیس برای تحلیل کرنش ایجاد شده در لوله بر اثر انفجار بر روی سطح زمین روشی را ارائه کرده است. در این پژوهش بارگذاری انفجار به صورت بار متمرکز بر سطح زمین به صورت جبهه کروی در نظر گرفته شده است. همچنین لوله به صورت یک پوسته نازک استوانه ای در حالت سه بعدی و بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک-لوله در نظر گرفته شده است.

۱-۱- انفجار در زیر سطح زمین

فشار موج انفجار ناشی از انفجار در زیر سطح زمین به عوامل مختلفی بستگی دارد که عبارتند از: فاصله نقطه مورد نظر از مرکز انفجار (R)، وزن ماده منفجره (W)، مشخصات خاک (K) و عمق دفن خرج انفجار (H). آزمایش هایی که عمدتاً طی جنگ جهانی دوم انجام شد، نشان داده است که برای تی ان تی مقدار اضافه فشار آبی در خاک، در تراز عمق دفن ماده منفجره از رابطه (۱) به دست می آید.

$$P_s = fk(R/W^{1/3})^{-n}, \quad S < R/W^{1/3} < 15 \quad (1)$$

که رابطه (۱) توسط لمپسون پیشنهاد شد که پارامترهای به کار رفته در آن به شرح زیر می باشند [۶].

f : ضریبی است که به عمق دفن ماده منفجره (H) مربوط است که از روی منحنی که توسط لمپسون ارائه داده است به دست می آید، (k) ثابت خاک است که دیمانسیون آن از جنس مدول الاستیسیته می باشد و مقادیر آن برای انواع خاکها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: مقادیر ثابت خاک برای انواع خاکها

K(Psi)	نوع خاک
۷۵۰	خاک ماسه خشک
۱۵۰۰	خاک ماسه مرطوب
۵۰۰۰	خاک رس سیلت دار
۷۵۰۰	خاک رس شن دار
۲۰۰۰	گل
۱۰۰۰۰۰	خاک اشباع

برای یافتن زمان تداوم فاز مثبت انفجار از رابطه (۲) استفاده می‌شود.

$$t_d = \frac{0.17W^{1/5} \cdot R^{2/5}}{K^{1.2}} \quad (۲)$$

۲-۱- شیوه‌های محاسبه پارامترهای انفجار در هوا

روش‌های متعددی برای محاسبه پارامترهای انفجار ارائه شده است. در این بخش به بررسی برخی از این روش‌ها پرداخته می‌شود.

۱-۲-۱- روابط براد

براد روابط زیر را برای محاسبه فشار مینای انفجار ارائه داد:

$$p_{so} = \frac{6.7}{Z^3} + 1 \quad (p_{so} > 10 \text{ kg/cm}^2) \quad (۳)$$

$$p_{so} = \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019 \quad (0.1 < p_{so} < 10 \text{ kg/cm}^2) \quad (۴)$$

که در روابط فوق Z فاصله مقیاس شده می‌باشد.

۱-۲-۲- روابط هنریش

روابط براد انطباق خوبی با نتایج تجربی در حوزه میانی و دور دارد، در حالیکه روابط هنریش برای حوزه نزدیک انطباق خوبی با نتایج تجربی از خود نشان می‌دهند.

$$p_{so} = \frac{14.072}{Z} + \frac{5.54}{Z^2} + \frac{0.357}{Z^3} + \frac{0.00625}{Z^4} \quad (0.05 \leq Z < 0.3) \quad (۵)$$

$$p_{so} = \frac{6.194}{Z} + \frac{0.326}{Z^2} + \frac{2.132}{Z^3} \quad (0.3 \leq Z < 1) \quad (۶)$$

$$p_{so} = \frac{0.662}{Z} + \frac{4.05}{Z^2} + \frac{3.288}{Z^3} \quad (1 \leq Z \leq 10) \quad (۷)$$

۱-۳- قوانین مقیاس

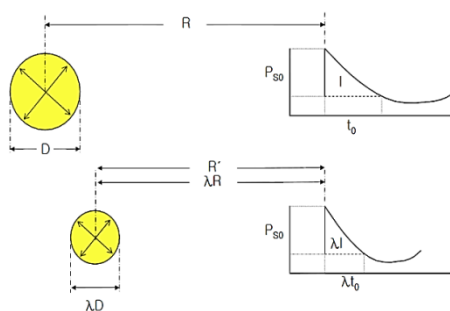
در بارگذاری انفجاری، مقیاس کردن خصوصیات موج انفجار روشی معمول می باشد و روش های متعددی به منظور تخمین مشخصات موج انفجار پیشنهاد شده است. با استفاده از قوانین مقیاس که برپایه نتایج آزمایشگاهی می باشد، می توان خصوصیات موج انفجار حاصل از مقدار و فاصله دلخواه را تخمین زد. اما با فرض گاز کامل و صرف نظر از جاذبه و لزجت، این قوانین برای برخی موج های شوک قوی و یا برای فواصل نزدیک به منبع انفجار مناسب نمی باشند. ویژگی های موج انفجاری هم به انرژی آزاد شده از ماده منفجره و هم به محیط انتشار امواج بستگی دارد. این خواص را تحت شرایط کنترل شده در آزمایش ها می توان اندازه گیری نمود و به عنوان مبنا برای بدست آوردن اطلاعات در مورد سایر انفجارها با استفاده از قانون مقیاس انفجار استفاده نمود. رایج ترین قانون برای مقیاس بندی موج انفجار قانون Hopkinson می باشد. این قانون بیان می کند دو خرج انفجاری با اندازه متفاوت از یک ماده منفجره زمانی اضافه فشار (ps) مشابه ایجاد می کنند که فاصله مقیاس بندی شده (Z) یکسان باشد و البته در مکان و فشار اتمسفری یکسان باشند. یعنی:

$$\frac{R_1}{W_1^{1/3}} = \frac{R_2}{W_2^{1/3}} \quad (8)$$

روش هایپکینز-کرانز و یا روش ریشه سوم می باشد که در شکل (۱) به نمایش درآمده است. این روش اول بار توسط هایپکینز در سال ۱۹۱۵ رابطه سازی شد و بعد از آن بصورت مستقل توسط کرانز در ۱۹۲۶ براساس تشابه مشخصات موج انفجارهایی که در فاصله مقیاس شده یکسان، هنگامی که دو خرج انفجاری متفاوت در شرایط اتمسفری مشابه منفجر شده اند ارائه گردید. بر اساس این نگرش، پارامتر بعنوان فاصله مقیاس شده همانند آنچه در رابطه (۹) تعریف شده، مورد استفاده قرار می گیرد [۶].

$$Z = \frac{R}{E^{1/3}} \quad (9)$$

که در رابطه E مقدار کل انرژی آزاد شده از ماده منفجره و R فاصله مرکز انفجار تا نقطه مورد نظر می باشد.



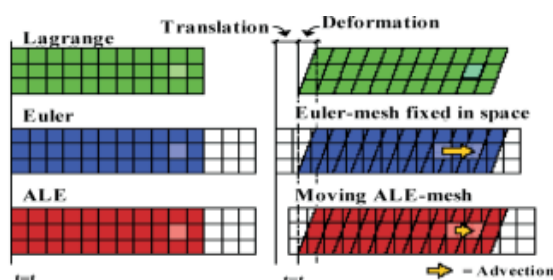
شکل ۱: مقیاس هایپکینز-کرانز [۶].

در واقع روش مقیاس ساز در شرایط اتمسفری یکسان بین داده های آزمایشگاهی و شرایط موجود، همان روش مقیاس هایپکینز-کرانز می باشد.

۱-۴- روش اویلری و لاگرانژی

با توجه به اینکه روش های اویلری و لاگرانژی خود به تنهایی برای مدلسازی انفجار دارای محدودیت ها و ضعف های زیادی هستند بنابراین برای غلبه بر محدودیت های روش های فوق، روشی مبتنی بر تلفیق این روش ها به نام ALE بنا نهاده شده است. در این روش که خود مبتنی بر یک فرمولاسیون مکانیک محیط پیوسته منحصر به فرد است، هر وقت تغییر فرم المان های لاگرانژی از حد بیشتر باشد، با استفاده

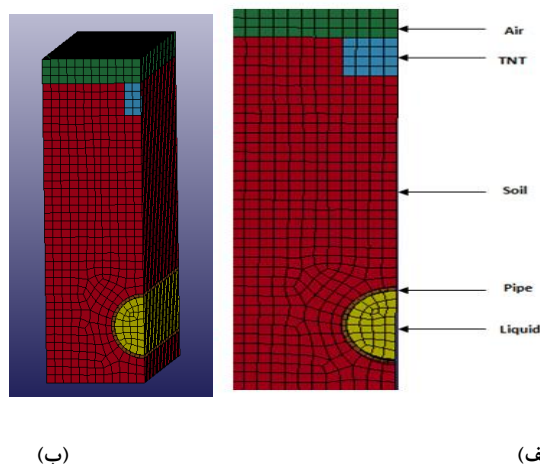
از روش اویلری ماده درون سلول‌ها جابجا می‌شود و مش‌بندی جدید لاگرانژی مطابق با محل جدید ماده مورد بررسی ایجاد می‌گردد. بدین ترتیب هم می‌توان از قابلیت منحصر به فرد روش اویلری در تغییر فرم‌های بسیار بزرگ بهره برد و هم مرزهای مواد را با دقت مناسبی پیش‌بینی کرد.



شکل ۲: حالت ذرات در مش اویلری-لاگرانژی.

۲- شبیه سازی عددی

در این مقاله به بررسی رفتار لوله فولادی مدفون در خاک تحت اثر انفجار پرداخته شده است. برای مدلسازی در این مقاله از نرم افزار Ls-Dyna مورد استفاده قرار گرفته است. لوله فولادی مورد بررسی در این مقاله دارای قطر خارجی ۰,۴ متر و قطر داخلی ۰,۳۶ متر می‌باشد. ابعاد خاک مدلسازی شده دارای طول ۱,۸ متر و عرض ۰,۶ متر و ارتفاع ۲ متر می‌باشد. المان مورد استفاده در مدلسازی solid 164 در نظر گرفته شده است. المان solid 164 هشت گره می‌باشد که هر کدام از این گره‌ها دارای نه درجه آزادی می‌باشند که شامل: شتاب، سرعت و جابجایی هر کدام در سه جهت می‌باشد و بایستی توجه داشت که در مش‌بندی اشکال منظم می‌توان از این المان استفاده کرد. به منظور جلوگیری از تخریب و نابودی المان‌ها در تغییر شکل‌های بزرگ و آنالیز غیرخطی سازه از روش اویلری-لاگرانژی استفاده شده است. پنج مدل ماده در مدلسازی مورد استفاده قرار گرفته است که می‌توان از آن به هوا، سیال، خاک، لوله و مواد منفجره تی‌ان‌تی اشاره نمود که ماده منفجره، هوا، خاک و سیال درون لوله بصورت اویلری-لاگرانژی مش‌بندی شده و خود لوله فولادی بصورت لاگرانژی مش‌بندی شده است. سائز تمامی مش‌بندی‌ها در کل مدلسازی حتی الامکان پنج سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. شرط مرزی مورد استفاده در این مقاله بدین صورت است که حرکت در کف و دو سطح جانبی مدل کاملاً بسته شده و بدون حرکت می‌باشد که اصطلاحاً آنرا non-reflecting می‌نامند و سطح بالای مدل کاملاً آزاد و دو سطح دیگر دارای جابجایی انتقالی در حرکت به بیرون و داخل در جهت عمود بر سطح مقید می‌باشد.



شکل ۳: (الف) مدل المان محدود، (ب) معرفی اجزای مدل المان محدود

۲-۱- مدل ماده

برای مدل‌سازی مورد مطالعه در این شبیه‌سازی از پنج ماده متفاوت استفاده شده است. این مدل ماده‌ها عبارتند از:

مدل ماده خاک، مدل ماده سیال (نفت و گاز)، مدل ماده لوله فولادی و بتنی، مدل ماده هوا و مدل ماده TNT. مدل ماده‌های مورد استفاده در این شبیه‌سازی MAT_SOIL_AND_FOAM برای خاک و همچنین MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN برای تی‌ان‌تی، MAT_NULL برای هوا، GRUNEISEN EQUATION برای سیال و MAT_PLASTIC_KINEMATIC برای لوله فولادی و برای لوله بتنی HOLMQUIST_JOHNSON در نظر گرفته شده است.

۲-۲- مدل ماده منفجره

در این مقاله مدل ماده منفجره مورد استفاده که در نرم‌افزار ال‌اس‌داینما بنام MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN می‌باشد که دارای یک معادله حالت کلی معروف بنام (JWL) است که معادله فشار آن در نرم‌افزار ال‌اس‌داینما بصورت زیر تعریف شده است:

$$p = A \left[1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right] e^{-R_1 V} + B \left[1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right] e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (10)$$

که در آن p فشار، A, B, R_1 و R_2 ضرایبی هستند که بر حسب نوع مواد منفجره تغییر می‌کند. V حجم ماده منفجره و E انرژی مشخصه انفجار است. خصوصیات مدل‌سازی TNT در جدول زیر بصورت خلاصه آورده شده است:

جدول ۲: مشخصات مدل ماده منفجره

$\rho(g/cm^3)$	$V_D(m/s)$	$P_{CJ}(GPa)$	$A(GPa)$	$B(GPa)$
۱/۶۳	۶۹۳۰	۲۱	۳۷۴	۳/۲۳
R1	R2	ω	V	$E_0(J/m^3)$
۴/۱۵	۰/۹۵	۰/۳۸	۱	۶×10^9

۲-۳- مدل ماده هوا

مدل ماده هوای مورد استفاده در این مقاله یک معادله حالت کلی بنام NULL MATERIAL می‌باشد که معادله فشار آن در نرم‌افزار ال‌اس‌داینما بصورت زیر تعریف شده است:

$$P = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E_0 \quad (11)$$

که در آن P فشار، μ برابر رابطه $1 - \frac{\rho}{\rho_0}$ می‌باشد که ρ چگالی و ρ_0 چگالی مینا می‌باشد. C_0 تا C_5 نیز ضرایب ثابت معادله حالت می‌باشند. E_0 انرژی مشخصه داخلی بر واحد حجم می‌باشد. خصوصیات مدل‌سازی هوا در جدول زیر بصورت خلاصه آورده شده است:

جدول ۳: مشخصات مدل ماده هوا

$\rho(kg/m^3)$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	$E_0(J/m^3)$	$\rho_0(kg/m^3)$
۱/۲۹	۰	۰	۰	۰	۰/۴	۰/۴	$۲/۵ \times 10^5$	۱/۰

۲-۴- مدل ماده لوله فولادی

در این مقاله به بررسی چندین نوع لوله فولادی با تنش تسلیم‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است مدل ماده لوله فولادی مورد استفاده در این مقاله بنام PLASTIC KINEMATIC MODEL در نرم‌افزار انتخاب شده است که خصوصیات مدل‌سازی لوله X80 در جدول زیر بصورت خلاصه آورده شده است:

جدول ۴: مشخصات مدل ماده لوله فولادی

$\rho(g/cm^3)$	$E(GPa)$	ν	$\sigma_y(MPa)$	$E_{tan}(GPa)$
۷/۸۵۰	۲۱۰	۰/۳	۶۵۷	۱۳/۵

تنش‌های تسلیم مورد استفاده در سایر لوله‌های فولادی که از آن در این مقاله به، STEEL، X80 و X60 نام برده شده است دارای تنش تسلیم به ترتیب $480 MPa$ و $657 MPa$ و $413 MPa$ می‌باشد.

۲-۵- مدل ماده بتن

در این مقاله از مدل ماده جانسون هلکوئست برای مدل‌سازی لوله بتنی استفاده شده است. مقاومت‌های فشاری در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی لوله‌های بتنی به ترتیب ۴۸، ۵۱ و ۱۵۶ مگاپاسکال می‌باشد. پارامترهای استفاده شده برای لوله‌ها در جداول ۵ تا ۷ آورده شده است:

جدول ۵: مشخصات مدل ماده لوله [۷] CON A

مقدار	خواص	مقدار	خواص
عددی	مصالح	عددی	مصالح
۰/۰۰۰۵۸	U_C	۲۴۴۰	$R_o(kg/m^3)$
$1/0.5E+0.6$	$P_L(Pa)$	$1/3.6E+1.0$	$G(Pa)$
۰/۱	U_L	۰/۷۵	A
۰/۰۳	D_1	۱/۹۵	B
۱	D_2	۰/۰۰۷	C
$1/7.4E+1.0$	$K_1(Pa)$	۰/۷۶	N
$3/8.8E+1.0$	$K_2(Pa)$	$4/8.0E+7$	$F_C(Pa)$
$2/9.8E+1.0$	$K_3(Pa)$	$4/0.0E+6$	T (Pa)
۰/۳	F_s	۰/۰۰۱	EPSO
$1/3.6E+0.7$	$P_C(Pa)$	۰/۰۱	EF_{MIN}
		۱۱/۷	SF_{MAX}

جدول ۶: مشخصات مدل ماده لوله [۷] CON B

مقدار	خواص	مقدار	خواص
عددی	مصالح	عددی	مصالح
۰/۰۰۰۵۸	U_C	۲۳۳۰	$R_o(kg/m^3)$
$1/0.5E+0.6$	$P_L(Pa)$	$1,2.6E+1.0$	$G(Pa)$
۰/۱	U_L	۰/۷۵	A
۰/۰۳	D_1	۱/۶۵	B
۱	D_2	۰/۰۰۷	C
$1/7.4E+1.0$	$K_1(Pa)$	۰/۷۶	N
$3/8.8E+1.0$	$K_2(Pa)$	$5/1.0E+0.7$	$F_C(Pa)$
$2/9.8E+1.0$	$K_3(Pa)$	$2/9.2E+0.6$	T (Pa)
۰/۳	F_s	۰/۰۰۱	EPSO
$1/3.6E+0.7$	$P_C(Pa)$	۰/۰۱	EF_{MIN}
		۱۱/۷	SF_{MAX}

جدول ۷: مشخصات مدل ماده لوله [۸] CON C

مقدار	خواص	مقدار	خواص
عددی	مصالح	عددی	مصالح
۰/۰۰۰۱	U_C	۲۲۵۰	$R_o(kg/m^3)$
$8/5.0E+0.8$	$P_L(Pa)$	$3/3.2E+1.0$	$G(Pa)$
۰/۱	U_L	۰/۷۹	A
۰/۰۵	D_1	۱/۶	B
۱	D_2	۰/۰۰۷	C
$8/5.0E+0.9$	$K_1(Pa)$	۰/۶۱	N
$1/7.1E+1.0$	$K_2(Pa)$	$1/5.6E+0.8$	$F_C(Pa)$
$2/0.8E+1.0$	$K_3(Pa)$	$8/4.0E+0.6$	T (Pa)
۰/۳	F_s	۰/۰۰۱	EPSO
$1/9.0E+0.7$	$P_C(Pa)$	۰/۰۱	EF_{MIN}
		۱۲/۵	SF_{MAX}

۲-۶- مدل ماده خاک

مدل ماده خاک مورد استفاده در این مقاله بنام SOIL AND FOAM در نرم افزار انتخاب شده است که توسط کاریج در سال ۱۹۷۲ مطرح گردیده است. لازم بذکر است که دو نوع خاک در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. خاک نوع اول دارای چگالی برابر ۱۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول برشی $1/72$ مگاپاسگال و مدول بالک 5.51 مگاپاسگال با ضرائب ثابت تنش $a_0=0$ ، $a_1=0$ و $a_2=0.87$ می باشد و خاک نوع دوم مورد بررسی در این مقاله دارای چگالی برابر 1800 کیلوگرم بر متر مکعب، مدول برشی 11 مگاپاسگال و مدول بالک 190 مگاپاسگال با ضرائب ثابت تنش $a_0=0.33$ Mpa، $a_1=0.7$ Mpa و $a_2=0.3$ می باشد که در نرم افزار، ρ چگالی خاک و G مدول برشی و K مدول بالک و a_0 ، a_1 و a_2 نیز ضرائب ثابت تابع تنش می باشند که بسته به نوع مدل ماده خاک متغییر می باشند [۹].

۲-۷- مدل ماده نفت

مدل ماده نفت مورد استفاده در این مقاله بنام NULL MATERIAL در نرم افزار انتخاب شده است که دارای یک معادله حالت کلی معروف بنام GRUNEISEN EQUATION می باشد که معادله فشار آن در نرم افزار ال اس داینا بصورت زیر تعریف شده است:

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu (1 + (1 - \gamma_0/2)\mu - a \mu^2/2)}{(1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \mu^2/(1 + \mu) - S_3 \mu^3/(1 + \mu^2))^2} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E \quad (12)$$

که در آن P فشار، μ برابر رابطه $1 - \frac{\rho}{\rho_0}$ می باشد که ρ چگالی و ρ_0 چگالی مینا می باشد S_1 تا S_3 و γ_0 و α نیز ضرائب ثابت معادله حالت می باشند. E مقدار ویژه داخلی و C سرعت موج انتشار در نفت می باشد.

مشخصات مدل ماده نفت در جدول زیر بصورت خلاصه آورده شده است:

جدول ۸: مشخصات مدل ماده نفت

$\rho(\text{kg/m}^3)$	C (m/s)	S_1	S_2	S_3	γ_0
۸۰۰	۱۲۸۰/۶۱	۰	۰	۰	۰/۳

۲-۸- مدل ماده گاز

مدل ماده گاز مورد استفاده در این مقاله یک معادله حالت کلی بنام NULL MATERIAL می باشد که معادله فشار آن در نرم افزار ال اس داینا بصورت زیر تعریف شده است:

$$P = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E_0 \quad (13)$$

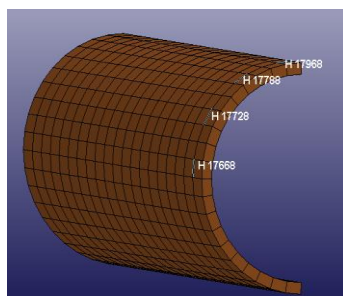
که در آن P فشار، μ برابر رابطه $1 - \frac{\rho}{\rho_0}$ می باشد که ρ چگالی و ρ_0 چگالی مینا می باشد. C_0 تا C_5 نیز ضرائب ثابت معادله حالت می باشند. E_0 انرژی مشخصه داخلی بر واحد حجم می باشد. خصوصیات مدلسازی گاز در جدول زیر بصورت خلاصه آورده شده است:

جدول ۹: مشخصات مدل ماده گاز

$\rho(\text{kg/cm}^3)$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	$E_0(\text{J/m}^3)$
۰/۶۸	۰	۰	۰	۰	۰/۴	۰/۴	$2/5 \times 10^8$

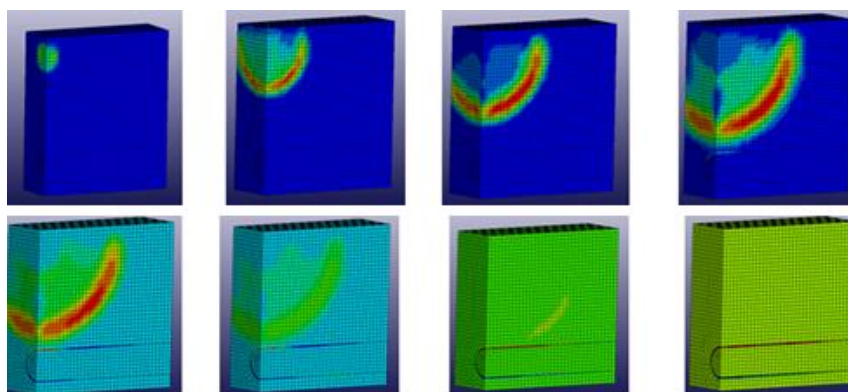
۳- بررسی اثر انفجار بر روی المان‌های انتخابی لوله مدفون

مطابق با شکل ۴، چهار المان انتخابی H17968، H17788، H 17728 و H17668 در دو خاک مختلف با مشخصات گوناگون تحت انفجار بررسی و آنالیز شده است. شکل ۴ موقعیت المان‌ها را بر روی لوله نشان می‌دهد. المان‌های H17968 و H17788 در ناحیه ی با زاویه ۰ تا ۴۵ درجه و المان‌های H 17728 و H 17668 در ناحیه با درجه ۴۵ تا ۹۰ درجه قرار گرفته است. شبیه‌سازی برای جرم‌های ۱/۶ و ۳/۲ و ۴/۸ و ۶/۵ و ۸ کیلوگرم انجام شده است.

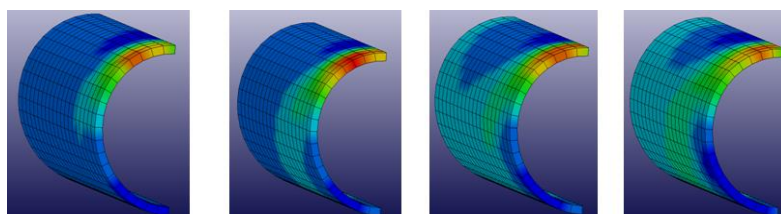


شکل ۴: نمایی از انتخاب المان لوله فولادی جهت تحلیل عددی.

در ادامه شکل ۵ و ۶ گام‌های پاسخ دینامیکی و کانتور فشار لوله مدفون تحت انفجار که مدلسازی شده است را می‌توان مشاهده نمود که این فرایند برای جرم ۶/۵ کیلوگرم برای ۹ میلی ثانیه اتفاق افتاده است.



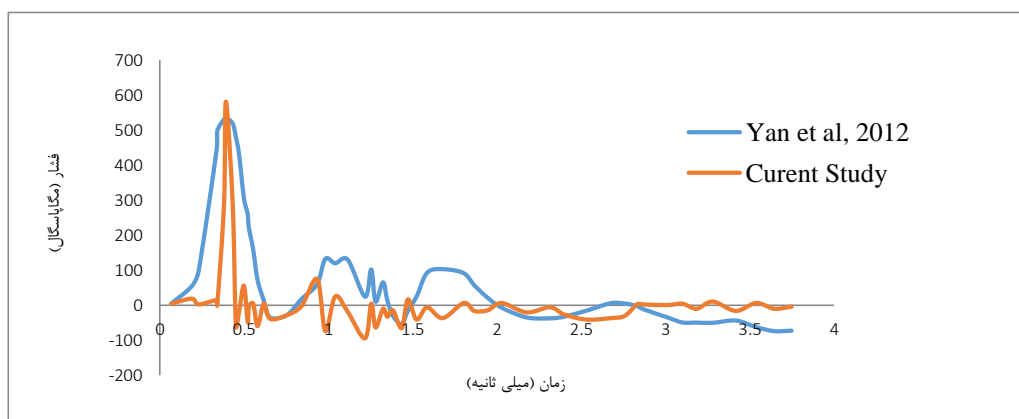
شکل ۵: شماتیک کلی از کانتور فشار در مدلسازی هندسی تحت انفجار برای ۹ میلی ثانیه.



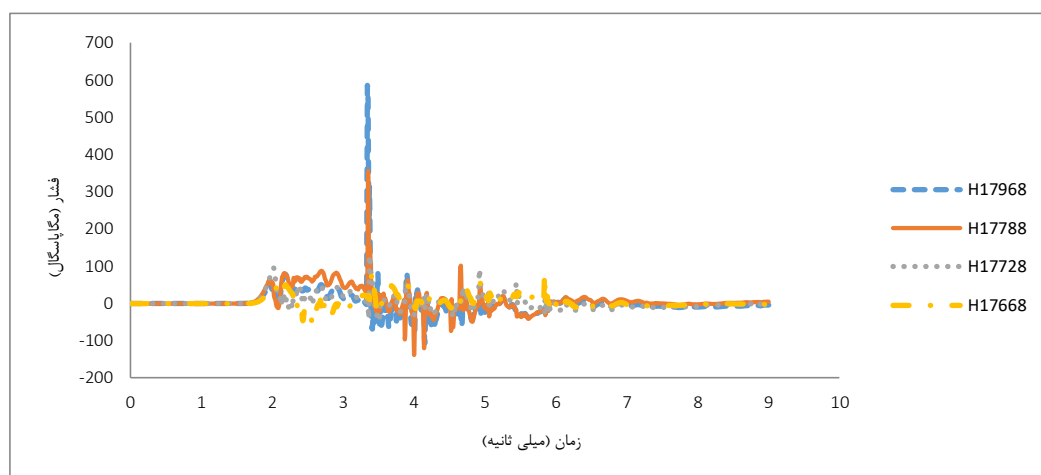
شکل ۶: کانتور فشار در لوله مدفون تحت انفجار برای ۹ میلی ثانیه.

۳-۱- صحت سنجی مدل‌سازی عددی

در مقاله حاضر در ابتدا مقایسه‌ای بین مدل‌سازی عددی این مقاله با مدل‌سازی یان در سال ۲۰۱۲ برای صحت‌سنجی مدل انجام شده است. در شبیه‌سازی انجام شده در ابتدا ۴ المان را بر روی لوله انتخاب کرده و یک چهارم لوله را نسبت به تاج لوله به زوایای ۰، ۲۲/۵، ۴۵ و ۹۰ درجه تقسیم بندی شده است و ۴ المان مورد نظر را در نواحی مذکور قرار گرفته است، بدین ترتیب که اگر تاج لوله در زاویه صفر درجه قرار داشته باشد ماکزیمم فشار رخ داده از لبه ۰ تا ۴۵ درجه اتفاق افتاد و در مینیمم فشار در زاویه ۴۵ تا ۹۰ درجه اتفاق افتاده است. به طور کلی هدف از تقسیم‌بندی لوله از زاویه ۰ تا ۹۰ درجه بررسی محل اثر موج انفجار بر روی لوله بوده است. مطابق با شکل موج انفجار برای ۹ میلی‌ثانیه بر اساس نمودار فشار بر حسب زمان انجام شده است. با توجه به اینکه نقطه پیک فشار در انفجار بسیار حائز اهمیت می‌باشد در این مقاله سعی بر این بوده است که نقاط پیک فشار هم از نظر مقدار و هم از نظر زمانی بر روی یکدیگر تطابق مناسبی داشته باشند. پیک فشار شبیه‌سازی مقاله برابر ۵۸۰/۹ مگاپاسکال شده است و پیک فشار مقاله مربوط به صحت‌سنجی برابر ۵۳۵/۳ مگاپاسکال می‌باشد. همانطور که در شکل ۷ کاملاً مشخص است پیک فشار در ۰/۳۹ میلی‌ثانیه اتفاق افتاده است که مقدار آن برابر ۵۸۰/۹ مگاپاسکال شده است. میزان اختلاف به دست آمده از شبیه‌سازی انجام شده برای صحت‌سنجی حدود ۷/۸۵٪ می‌باشد. که این میزان خطا بیانگر این موضوع است که نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی بسیار نزدیک به مدل‌سازی یان در سال ۲۰۱۲ می‌باشد. [۹]



شکل ۷: مقایسه منحنی فشار بر حسب زمان مدل‌سازی عددی مقاله حاضر با مطالعات یان، ۲۰۱۲.



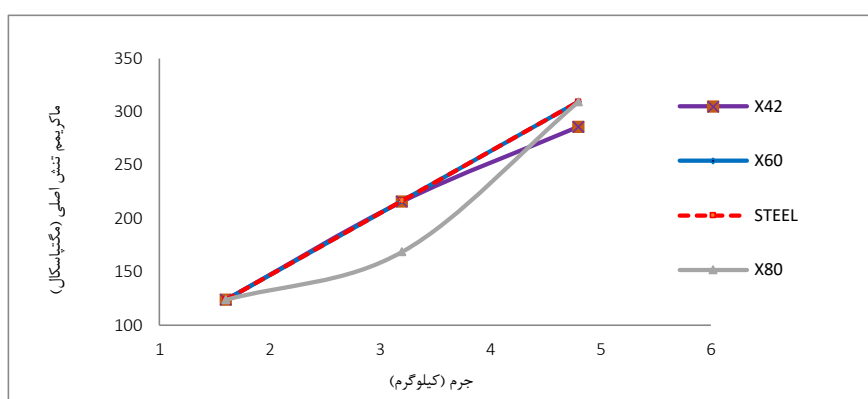
شکل ۸: منحنی فشار بر حسب زمان برای ۴ المان انتخابی لوله مدفون تحت انفجار برای جرم ۶/۵ کیلوگرم.

مقدار فشار بدست آمده از المان مذکور در در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۸ مشخص است نمودار در ابتدا بصورت افقی و مستقیم می‌باشد و شیب آن افزایش می‌یابد تا در زمان ۳/۳۳ میلی‌ثانیه به پیک خود می‌رسد، و در نهایت کاهش می‌یابد و

پس از طی گذشت ۲ میلی ثانیه تا ۴ میلی ثانیه کم کم دمپ می شود تا به صفر نزدیک می شود. علت این رفتار جهت بارگذاری انفجار است که در جهت مخالف فشار سیال لوله وارد می شود که این امر منجر به دمپ فشار ناشی از موج انفجار می شود. همانطور که مشخص است تقریباً ۴ المان انتخابی بروی لوله در یک زمان یکسان به نقطه پیک خود رسیده است. بنابراین می توان گفت که فشار ناشی از سیال به پایداری لوله کمک می کند. به طور کلی اگر فشار منفی باشد بصورت کششی و اگر فشار مثبت باشد نمودار به صورت فشاری نشان داده شده است. [۹ و ۱۰].

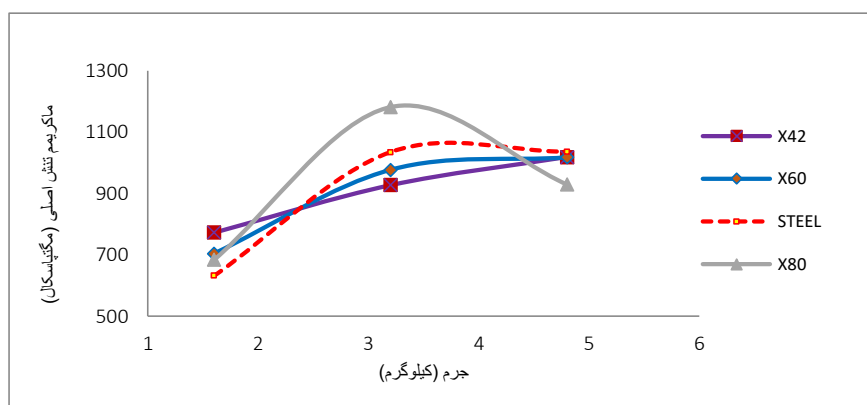
۳-۲- عملکرد لوله فلزی مدفون در خاک تحت انفجار برای سیال نفت

شکل های ۹ و ۱۰ مربوط به مقدار تنش های اصلی به دست آمده مربوط به لوله های فولادی که در بخش های قبل به آن اشاره شده است را نشان می دهد.



شکل ۹: مقدار تنش وارد شده به لوله فلزی در خاک نوع اول تحت انفجار.

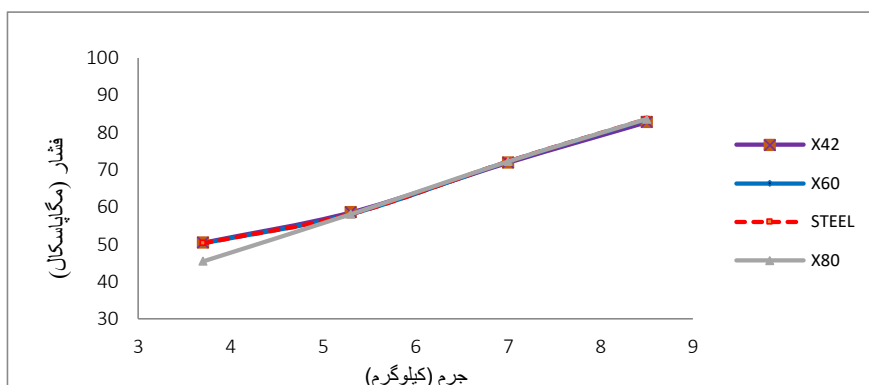
مقدار ماکزیمم تنش وارد شده به ۴ نوع لوله مذکور و در دو نوع خاک I و II و برای جرم های ۱/۶ و ۳/۲ و ۴/۸ کیلوگرم بررسی شده است. شکل ۹ مقدار ماکزیمم تنش وارد شده به لوله مدفون در خاک I برای ۴ نوع فولادی X42، X60، X80، Steel را نشان می دهد.



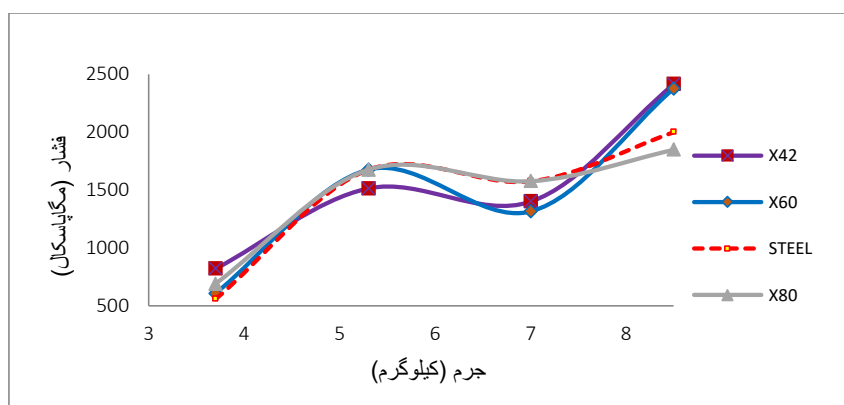
شکل ۱۰: مقدار تنش وارد شده به لوله فلزی در خاک نوع دوم تحت انفجار

شکل (۱۰) نیز مقدار تنش های اصلی و حداکثر را برای جرم های ۱/۶ و ۳/۲ و ۴/۸ کیلوگرم برای ۴ نوع فولادی بکار برده شده در مدل سازی را برای خاک نوع II نشان می دهد. لازم به ذکر است که تنش تسلیم لوله های مصرفی در مدل سازی فولادی Steel، X80، X60 و X42 به ترتیب ۶۵۷، ۴۸۰، ۴۱۳، ۲۹۰ مگاپاسکال می باشد. شکل های ۹ و ۱۰ نشان می دهد که با ۳ برابر شدن مقدار تی ان تی

مقدار تنش‌ها برای لوله‌های X80 و X60 و X42 و Steel، ۲/۴۹ و ۲/۵۱ و ۲/۳۱ و ۲/۵ و برابر برای خاک نوع اول و ۲۶/۳٪، ۳۰/۸۱٪، ۲۴/۱۷٪ و ۳۸/۹۲٪ برای خاک نوع II افزایش یافته است.



شکل ۱۱: مقدار فشار وارده به لوله فلزی در خاک نوع اول تحت انفجار.



شکل ۱۲: مقدار فشار وارده به لوله فلزی در خاک نوع دوم تحت انفجار.

شکل ۱۱ و ۱۲ مقدار ماکزیمم فشار وارده بر لوله مدفون برای ۲ نوع خاک برای جرم‌های ۳/۲ و ۴/۸ و ۶/۵ و ۸ کیلوگرم را نشان می‌دهد. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب نشان می‌دهد که با ۲/۵ برابر کردن جرم تی‌ان‌تی مقدار فشار برای لوله‌های مدفون X42، X60، X80 و Steel حدود ۵۴/۶۳٪ و ۳۹/۸٪ و ۳۹/۰۴٪ و ۳۹/۸٪ برای خاک نوع اول افزایش داشته و برای خاک نوع دوم ۲/۶۸ و ۳/۹۲ و ۲/۹۴ و ۳/۵۸ برابر افزایش یافته است. به طور کلی همه نمودارها بیانگر این موضوع هستند که فشار سیال می‌تواند به پایداری لوله تحت امواج انفجار کمک کند. در ادامه به بررسی تاثیر خاک‌ها در میزان تنش و فشار وارده به لوله‌های بتنی پرداخته شده است.

۳-۳- بررسی اثر نوع خاک در لوله‌های بتنی تحت امواج انفجار

جداول ۱۱ تا ۱۶ مربوط به تاثیر خاک‌های مورد بررسی برای جرم‌های ۳/۲، ۶/۵ و ۸ کیلوگرم می‌باشد که برای ۳ نوع لوله بتنی CONA، CONB و CONC مورد بررسی قرار گرفته است. جداول ۱۰ تا ۱۵ میزان اختلاف تنش و فشار ایجاد شده بین خاک نوع اول و دوم را نشان می‌دهد. این جداول در حقیقت بیانگر تاثیر جنس خاک را تحت انفجار نشان می‌دهد که میزان اختلاف و اثر خاک‌ها را در قالب تنش و فشار در جداول زیر ارائه شده است.

جدول ۱۰: اختلاف فشار خاک نوع اول و دوم برای CON A, Fc= 48 MPA

جرم (کیلوگرم)	فشار خاک ۱ (مگاپاسکال)	فشار خاک ۲ (مگاپاسکال)	اختلاف (%)
۳/۲	۱۳/۱۷	۲۵/۵	۴۸/۳۵
۶/۵	۱۳/۶	۵۶/۱۵	۷۵/۷۸
۸	۱۳/۲۶	۶۳/۶۶	۷۹/۱۷

جدول ۱۱: اختلاف تنش خاک نوع اول و دوم برای CON A, Fc= 48 MPA

جرم (کیلوگرم)	تنش خاک ۱ (مگاپاسکال)	تنش خاک ۲ (مگاپاسکال)	اختلاف (%)
۳/۲	۲۹/۳۷	۵۲/۷	۴۴/۲۶
۶/۵	۳۹/۲۶	۵۵/۷۳	۲۹/۵۵
۸	۵۱/۸۵	۵۵/۱۷	۶/۰۲

جدول ۱۰ و ۱۱ اختلاف فشار و تنش برای خاک‌های نوع اول و دوم را برای CONA نشان می‌دهد که این مقدار فشار و تنش برای جرم ۳/۲ به ترتیب برای خاک نوع اول ۲۹/۱۳، ۳۷/۱۷ مگاپاسکال و برای خاک نوع دوم ۲۵/۵، ۵۲/۷ مگاپاسکال بدست آمده است که اختلاف فشار و تنش بدست آمده بین خاک نوع اول و دوم برابر با ۴۸/۳۵٪ و ۴۴/۲۶٪ بدست آمده است. این مقدار فشار و تنش برای جرم ۶/۵ کیلوگرم برای خاک نوع اول ۳۹/۱۳، ۲۶/۶ مگاپاسکال و برای خاک نوع دوم ۵۵/۵۶، ۷۳/۱۵ مگاپاسکال بدست آمده است که اختلاف فشار و تنش ایجاد شده برای جرم ۶/۵ برابر با ۷۵/۷۸٪ و ۲۹/۵۵٪ بدست آمد. همچنین مقدار فشار و تنش برای جرم ۸ کیلوگرم برای خاک نوع اول ۵۱/۱۳، ۸۵/۲۶ مگاپاسکال و برای خاک نوع دوم ۵۵/۶۳، ۱۷/۶۶ مگاپاسکال بدست آمده که در نهایت اختلاف فشار و تنش خاک‌های نوع اول و دوم برابر با ۷۹/۱۷٪ و ۶/۰۲٪ بدست آمد.

جدول ۱۲: اختلاف فشار خاک نوع اول و دوم برای CON B, Fc= 51 MPA

جرم (کیلوگرم)	فشار خاک ۱ (مگاپاسکال)	فشار خاک ۲ (مگاپاسکال)	اختلاف (%)
۳/۲	۱۰/۸۸	۱۳/۶	۲۰
۶/۵	۱۲/۲۶	۵۴/۱۶	۷۷/۳۶
۸	۱۲/۸۴	۶۱/۵	۷۹/۱۲

جدول ۱۳: اختلاف تنش خاک نوع اول و دوم برای CON B, Fc= 51 MPA

جرم (کیلوگرم)	تنش خاک ۱ (مگاپاسکال)	تنش خاک ۲ (مگاپاسکال)	اختلاف (%)
۳/۲	۲۹/۲۱	۵۹/۱۰	۵۰/۵۷
۶/۵	۳۹/۶	۵۷/۶۳	۳۱/۲۸
۸	۴۸/۵	۵۷/۹۸	۱۶/۳۵

جدول ۱۲ و ۱۳ اختلاف فشار و تنش برای خاک‌های نوع اول و دوم را برای CONB نشان می‌دهد که این مقدار فشار و تنش برای جرم ۳/۲ به ترتیب برای خاک نوع اول ۲۹/۱۰، ۲۱/۸۸ مگاپاسکال و برای خاک نوع دوم ۱۰/۸۸، ۱۳/۶ مگاپاسکال بدست آمده است که مقدار فشار و تنش بدست آمده بین خاک نوع اول و دوم برابر با ۲۰٪ و ۵۰/۵۷٪ بدست آمده است. این مقدار فشار و تنش برای جرم ۶/۵ کیلوگرم برای خاک نوع اول ۳۹/۱۲، ۶۰/۲۶ مگاپاسکال و برای خاک نوع دوم ۵۷/۵۴، ۶۳/۱۶ مگاپاسکال بدست آمده است که اختلاف فشار و تنش ایجاد شده برای جرم ۶/۵ برابر با ۷۷/۳۶٪ و ۳۱/۲۸٪ بدست آمد. همچنین مقدار فشار و تنش برای جرم ۸ کیلوگرم برای خاک نوع اول ۴۸/۱۲، ۵۰/۸۴ مگاپاسکال و برای خاک نوع دوم ۵۷/۶۱، ۹۸/۵۰ مگاپاسکال بدست آمده که در نهایت اختلاف فشار و تنش خاک‌های نوع اول و دوم برابر با ۷۹/۱۲٪ و ۱۶/۳۵٪ بدست آمد.

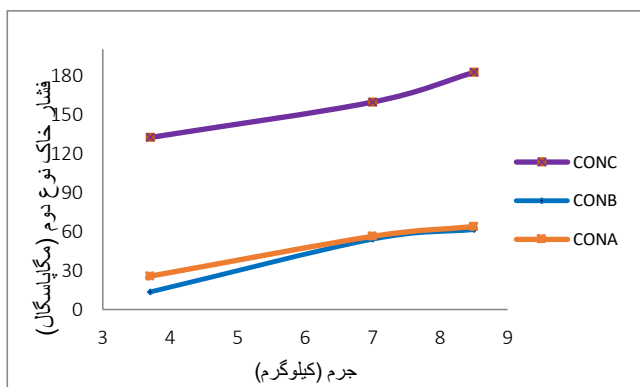
جدول ۱۴: اختلاف فشار خاک نوع اول و دوم برای CON C, Fc= 156 MPA

جرم (کیلوگرم)	فشار خاک ۱ (مگاپاسکال)	فشار خاک ۲ (مگاپاسکال)	اختلاف (%)
۳/۲	۲۰/۸۸	۱۳۲/۱۸	۸۴/۲۰
۶/۵	۲۴/۱	۱۵۹/۳۷	۸۴/۸۷
۸	۲۴/۹۷	۱۸۲/۱	۸۶/۲۸

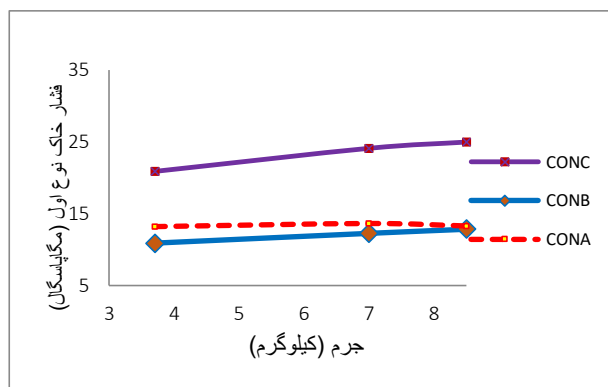
جدول ۱۵: اختلاف تنش خاک نوع اول و دوم برای CON C, Fc= 156 MPA

جرم (کیلوگرم)	تنش خاک ۱ (مگاپاسکال)	تنش خاک ۲ (مگاپاسکال)	اختلاف (%)
۳/۲	۴۶/۶۵	۱۴۰/۵۶	۶۶/۸۱
۶/۵	۶۱/۷۲	۱۵۵/۹۶	۶۰/۴۲
۸	۸۳/۰۶	۱۶۵/۷۱	۴۹/۸۷

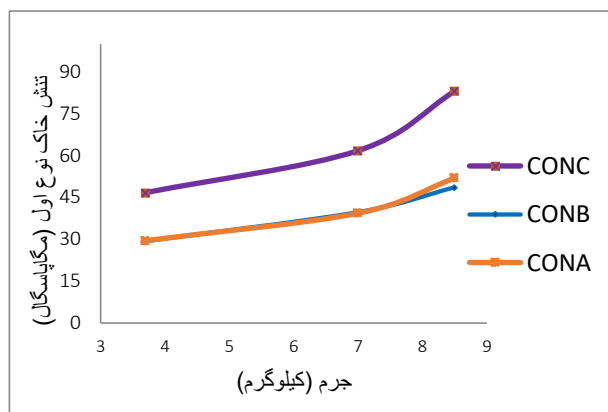
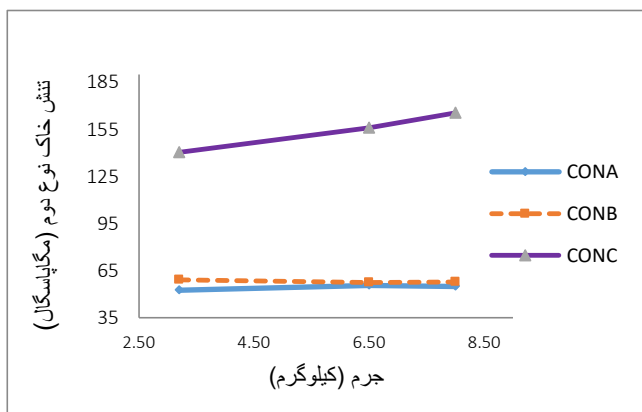
جدول ۱۴ و ۱۵ اختلاف فشار و تنش برای خاک‌های نوع اول و دوم را برای CON C نشان می‌دهد که این مقدار فشار برای جرم ۳/۲ به ترتیب برای خاک نوع اول 46/65، 20/88 مگاپاسکال و برای خاک نوع دوم 132/18، 140/56 مگاپاسکال بدست آمده است که اختلاف فشار بدست آمده بین خاک نوع اول و دوم برابر با 84/20٪ و 66/81٪ بدست آمده است. این مقدار برای جرم ۶/۵ کیلوگرم برای خاک نوع اول 61/72، 24/1 مگاپاسکال و برای خاک نوع دوم 155/96، 159/37 مگاپاسکال بدست آمده است که اختلاف فشار ایجاد شده برای جرم ۶/۵ برابر با 84/87٪ و 60/42٪ بدست آمد. همچنین این مقدار برای جرم ۸ کیلوگرم برای خاک نوع اول 83/06، 24/97 مگاپاسکال و برای خاک نوع دوم 165/71، 182/10 مگاپاسکال بدست آمده که در نهایت اختلاف فشار خاک‌های نوع اول و دوم برابر با 86/28٪ و 49/87٪ بدست آمد. بطور خلاصه مطابق با جداول ۱۰ تا ۱۵، نتایج حاصل از تاثیر ۲ نوع خاک مورد بررسی بدین ترتیب است که برای CONA برای جرم‌های ۳/۲ و ۶/۵ و ۸ کیلوگرم مقدار فشار به ترتیب ۴۸/۳۵٪، ۷۵/۷۸٪ و ۷۹/۱۷٪ و مقدار تنش بدست آمده به ترتیب ۴۴/۲۶٪، ۲۹/۵۵٪ و ۶/۰۲٪ می‌باشد. مقدار فشار برای CONB، به ترتیب ۲۰٪، ۷۷/۳۶٪، و ۷۹/۱۲٪ و مقدار تنش به ترتیب، ۵۰/۵۷٪، ۳۱/۲۸٪، ۱۶/۳۵٪ بدست آمد. همچنین مقدار فشار برای CONC، به ترتیب ۸۴/۲٪، ۸۴/۸۷٪، و ۸۶/۲۸٪ و مقدار تنش به ترتیب، ۶۶/۸۱٪، ۶۰/۴۲٪، ۴۹/۸۷٪ بدست آمد. در ادامه نمونه ای از نمودارهای مربوط تاثیر پوشش خاک در مقدارهای تنش و فشار برای لوله های بتنی مذکور نشان داده شده است.



شکل ۱۴- مقدار فشار وارده به لوله بتنی در خاک نوع دوم تحت انفجار



شکل ۱۳- مقدار فشار وارده به لوله بتنی در خاک نوع اول تحت انفجار



شکل ۱۶- مقدار تنش وارده به لوله بتنی در خاک نوع دوم تحت انفجار

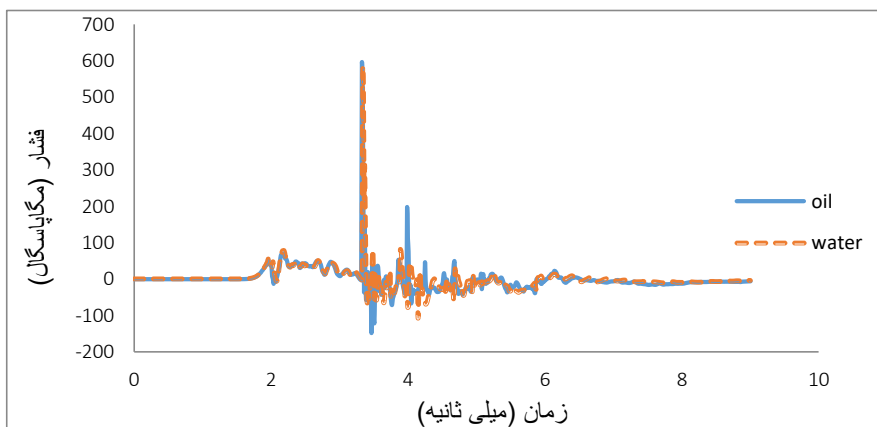
شکل ۱۵- مقدار تنش وارده به لوله بتنی در خاک نوع اول تحت انفجار

نتایج و اشکال فوق در حقیقت بیانگر این موضوع است که میزان تغییرات فشار و تنش وارده به لوله بسیار حساس نسبت به مدول بالک و مدول برشی و چگالی خاک هستند یا به عبارت دیگر نتایج حاصل از جدول ۱۰ تا ۱۵ و نمودارهای فوق بیانگر این موضوع است که هرچه خاک چگالی بیشتر داشته باشد به لوله فشار بیشتری انتقال می‌یابد و هرچه خاک دارای چگالی کمتر باشد عملکرد خاک در برابر لوله تحت انفجار مانند یک میراگر می‌باشد که در هنگام انتشار امواج انفجار بخش زیادی از تنش و فشار وارده به لوله را می‌گیرد و مانند یک تا دمپر عمل می‌کند.

شکل های ۱۳ تا ۱۶ مربوط به مقدار حداکثر تنش‌های اصلی و فشار لوله بتنی برای جرم‌های $3/2$ و $6/5$ و 8 کیلوگرم می‌باشد که به بعضی از نتایج کمی نمودارهای فوق اشاره شده است. در بررسی گلوبال برای لوله‌های بتنی Con C، Con B، Con A، در خاک اول مشاهده شد که با افزایش $2/5$ برابری جرم تی‌ان‌تی، سطح فشار به ترتیب به میزان $16/40\%$ ، $15/26\%$ ، و $16/40\%$ افزایش یافت. در بررسی گلوبال برای لوله‌های بتنی Con C، Con B، Con A، در خاک اول مشاهده شد که با افزایش $2/5$ برابری جرم تی‌ان‌تی، سطح تنش به ترتیب به میزان 43% ، $39/80\%$ و 44% افزایش یافت.

۲-۴- مقایسه ای بین سیال نفت و آب

شکل ۱۷ مقایسه‌ای بین سیال نفت و آب را نشان می‌دهد. یک فشار برای سیال‌ها تقریباً در یک بازه زمانی یکسان اتفاق افتاده است. شکل فوق نشان می‌دهد که با کاهش چگالی سیال، فشار وارده به لوله افزایش یافته است و بالعکس. پیک فشار برای نفت و آب به ترتیب $588/9$ و $580/91$ مگاپاسکال بدست آمده است. بطور کلی با افزایش چگالی سیال فشار کمتری به لوله وارد شد که این نتیجه تاثیر بسیار زیاد جنس سیال در لوله را در هنگام انفجار نشان می‌دهد.

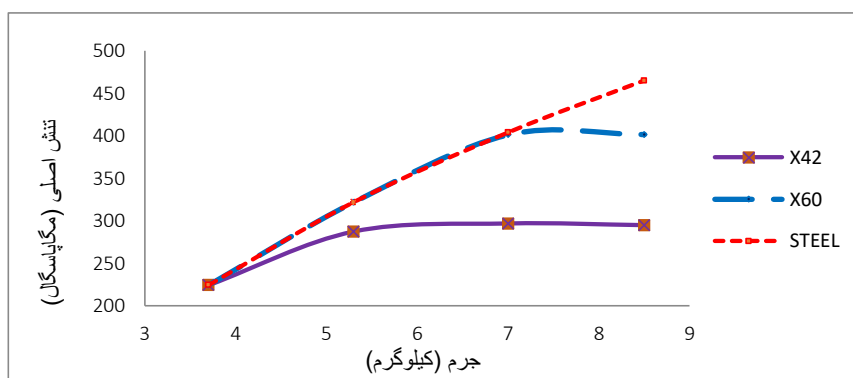


شکل ۱۷: مقایسه فشار وارده به لوله مدفون حاوی سیال نفت و آب تحت انفجار

بطور کلی شکل ۱۷ مقایسه‌ای بین فشار وارده به لوله مدفون حاوی سیال نفت و آب صورت گرفته است. همانطور که مشخص است پیک فشار برای هر دو سیال تقریباً در زمان ۳,۳۳ میلی ثانیه اتفاق افتاده است. همانطور که مشخص است و نمودارها نشان می‌دهد با کاهش چگالی سیال، فشار وارده بر لوله بیشتر شده است بدین ترتیب که پیک فشار برای آب با چگالی 1000 kg/m^3 برابر با ۵۸۰,۹۱ مگاپاسگال شده است و پیک فشار برای نفت با چگالی 800 kg/m^3 برابر با ۵۸۸,۶ مگاپاسگال بدست آمده است که بیانگر این مطلب است که هرچه چگالی سیال بیشتر باشد فشار کمتری به لوله وارد می‌شود و هرچه چگالی سیال کمتر باشد فشار بیشتری به لوله منتقل می‌شود که شکل ۱۷ این موضوع را تایید می‌کند. نمودارها نشان می‌دهد با کاهش چگالی سیال، فشار وارده بر لوله بیشتر شده است و فشار بیشتری به لوله منتقل می‌شود و همچنین با افزایش چگالی سیال فشار کمتری به لوله وارد می‌شود.

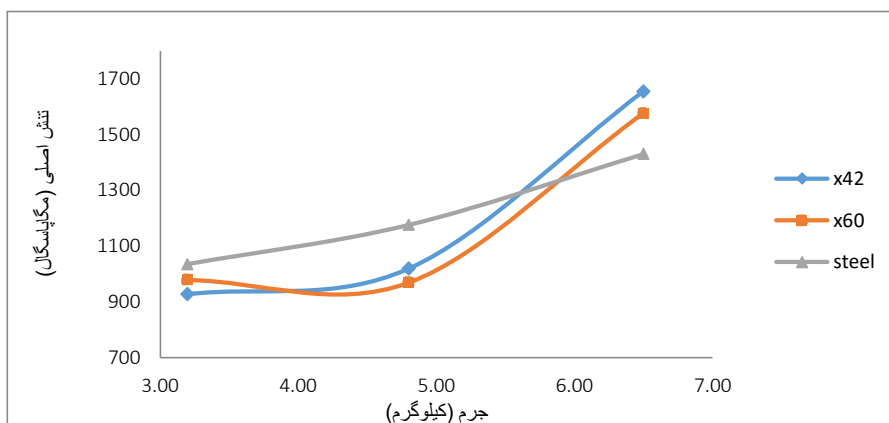
۳-۵- عملکرد لوله فلزی مدفون در خاک تحت انفجار برای سیال گاز

شکل‌های ۱۸ و ۱۹ مربوط به مقدار تنش‌های اصلی به دست آمده مربوط به لوله‌های فولادی که در بخش‌های قبیل به آن اشاره شده است را نشان می‌دهد.



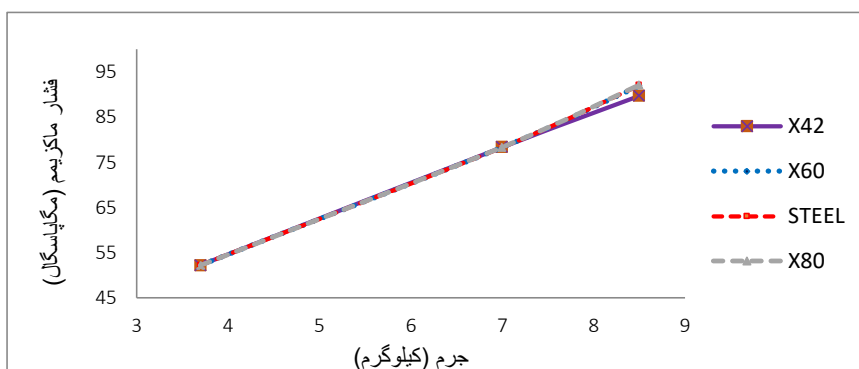
شکل ۱۸: مقدار تنش وارده به لوله فلزی در خاک نوع اول تحت انفجار

مقدار ماکزیمم تنش وارده به ۳ نوع لوله مذکور و در دو نوع خاک I و II و برای جرم‌های $3/2$ و $4/8$ و $6/5$ و 8 کیلوگرم بررسی شده است. شکل ۱۸ مقدار ماکزیمم تنش دار به لوله مدفون در خاک I برای سه نوع لوله فولادی Steel، X60 و X42 را نشان می‌دهد.

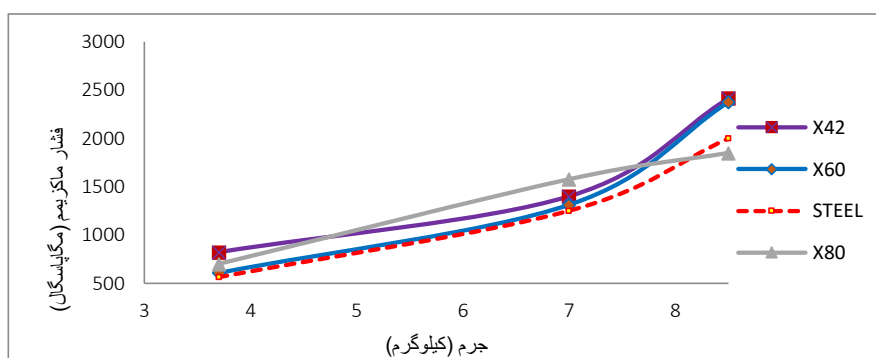


شکل ۱۹: مقدار تنش وارده به لوله فلزی در خاک نوع دوم تحت انفجار

شکل ۱۹ نیز مقدار تنش‌های اصلی و حداکثر را برای جرم‌های ۳/۲ و ۴/۸ و ۶/۵ کیلوگرم برای نوع لوله فولادی بکار برده شده در مدل‌سازی را برای خاک نوع II نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که تنش تسلیم لوله‌های مصرفی در مدل‌سازی فولادی Steel، X42 و X60 به ترتیب ۶۵۷ و ۴۱۳، ۲۹۰ مگاپاسکال می‌باشد. شکل ۱۹ نشان می‌دهد که با ۲ برابر شدن مقدار تی‌ان‌تی مقدار تنش‌ها برای لوله‌های X60 و X42 و Steel، ۱/۷۹ و ۱/۳۲ و ۱/۸۰ برابر برای خاک نوع اول و ۳۷/۹۳٪، ۴۳/۹۷٪ و ۵۸/۲۷٪ برای خاک نوع II افزایش یافته است.



شکل ۲۰: مقدار فشار وارده به لوله فلزی در خاک نوع اول تحت انفجار

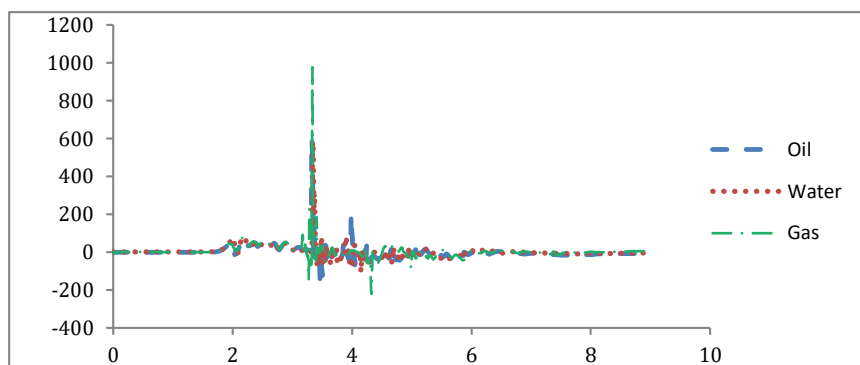


شکل ۲۱: مقدار فشار وارده به لوله فلزی در خاک نوع دوم تحت انفجار

شکل ۲۰ و ۲۱ مقدار ماکزیمم فشار وارده بر لوله مدفون برای نوع خاک برای جرم‌های ۳/۲ و ۶/۵ و ۸ کیلوگرم را نشان می‌دهد. شکل‌های ۲۰ و ۲۱ به ترتیب نشان می‌دهد که با ۲/۵ برابر کردن جرم تی‌ان‌تی مقدار فشار برای لوله‌های مدفون X60، X80 و X42 و Steel حدود ۴۳/۲۹٪، ۴۳/۲۲٪، ۴۱/۸٪ و ۴۳/۲٪ برای خاک نوع اول افزایش داشته و برای خاک نوع دوم ۲/۶۴ و ۳/۹۰ و ۲/۹۴ و ۳/۵۴ برابر افزایش یافته است. به طور کلی همه نمودارها بیانگر این موضوع هستند که فشار سیال می‌تواند به پایداری لوله تحت امواج انفجار کمک کند.

۳-۶- مقایسه فشار سیال های نفت، آب و گاز تحت امواج انفجار

شکل ۲۲ مقایسه‌ای بین فشار وارده به لوله مدفون حاوی سیال‌های نفت و آب و گاز می‌باشد که همانطور که مشخص است پیک فشار برای هر سه سیال تقریباً در یک بازه زمانی و حدود ۳/۳۳ میلی ثانیه افتاده است.



شکل ۲۲: مقایسه فشار وارده به لوله مدفون حاوی سیال نفت و آب و گاز تحت انفجار برای جرم ۶/۵ کیلوگرم

مقدار فشار ماکزیمم برای گاز، نفت و آب به ترتیب برابر ۹۷۶/۶۷، ۵۸۸/۶ و ۵۸۰/۹ مگاپاسکال بدست آمده است که این نتایج بیانگر این موضوع است که با کاهش چگالی سیال‌ها با افزایش فشار به لوله مواجه شد که این افزایش بدین شرح است که فشار وارده از سوی سیال گاز به لوله نسبت به نفت و آب به ترتیب ۳۹/۷۳ و ۴۰/۵۲ درصد بیشتر بوده است که شکل ۲۲ این نتایج را تایید می‌کند.

۳-۷- بررسی اثر نوع خاک در لوله های مدفون تحت امواج انفجار

جداول ۱۶ تا ۱۹ مربوط به تاثیر خاک‌های مورد بررسی برای جرم‌های ۳/۲، ۶/۵ و ۸ کیلوگرم می‌باشد که برای نوع لوله فولادی X42، X60، X80 و Steel مورد بررسی قرار گرفته است. جداول ۱۶ تا ۱۹ میزان اختلاف تنش و فشار ایجاد شده بین خاک نوع اول و دوم را نشان می‌دهد. این جداول در حقیقت بیانگر تاثیر جنس خاک را تحت انفجار نشان می‌دهد که میزان اختلاف و اثر خاک‌ها را در قالب تنش و فشار در جداول زیر ارائه شده است.

جدول ۱۶: اختلاف فشار خاک نوع اول و دوم برای X42

جرم (کیلوگرم)	فشار خاک ۱ (مگاپاسکال)	فشار خاک ۲ (مگاپاسکال)	اختلاف (%)
۳/۲	۵۲/۲۰	۸۱۹/۸۷	۹۳/۶۳
۶/۵	۷۸/۳۵	۱۳۹۹/۶	۹۴/۴۰
۸	۸۹/۷۴	۲۴۱۴/۴	۹۶/۲۸

جدول ۱۶ اختلاف فشار برای خاک‌های نوع اول و دوم را برای X42 نشان می‌دهد که این اختلاف فشار برای جرم ۳/۲، ۶/۵ و ۸ کیلوگرم به ترتیب ۹۳/۶۳٪، ۹۴/۴۰٪ و ۹۶/۲۸٪ بدست آمده است.

جدول ۱۷: اختلاف فشار خاک نوع اول و دوم برای X60

اختلاف (%)	فشار خاک ۲ (مگاپاسکال)	فشار خاک ۱ (مگاپاسکال)	جرم (کیلوگرم)
۹۱/۴۰	۶۰۷/۴۵	۵۲/۲۰	۳/۲
۹۴/۰۳	۱۳۱۲/۵۸	۷۸/۳	۶/۵
۹۶/۱۲	۲۳۷۳/۶۲	۹۱/۹۴	۸

جدول ۱۷ اختلاف فشار برای خاک‌های نوع اول و دوم را برای X60 نشان می‌دهد که این اختلاف فشار برای جرم ۳/۲، ۶/۵ و ۸ کیلوگرم به ترتیب ۹۱/۴۰٪، ۹۴/۰۳٪ و ۹۶/۱۲٪ بدست آمده است.

جدول ۱۸: اختلاف فشار خاک نوع اول و دوم برای Steel

اختلاف (%)	فشار خاک ۲ (مگاپاسکال)	فشار خاک ۱ (مگاپاسکال)	جرم (کیلوگرم)
۹۰/۷۳	۵۶۳/۱۵	۵۲/۲۰	۳/۲
۹۳/۷۳	۱۲۵۰/۶	۷۸/۳	۶/۵
۹۵/۳	۱۹۹۸/۷	۹۲/۰۶	۸

جدول ۱۸ اختلاف فشار برای خاک‌های نوع اول و دوم را برای Steel نشان می‌دهد که این اختلاف فشار برای جرم ۳/۲، ۶/۵ و ۸ کیلوگرم به ترتیب ۹۰/۷۳٪، ۹۳/۷۳٪ و ۹۵/۳۰٪ بدست آمده است.

جدول ۱۹: اختلاف فشار خاک نوع اول و دوم برای X80

اختلاف (%)	فشار خاک ۲ (مگاپاسکال)	فشار خاک ۱ (مگاپاسکال)	جرم (کیلوگرم)
۹۲/۵	۶۹۹/۲۳	۵۲/۲۰	۳/۲
۹۵/۰۳	۱۵۷۵/۴۸	۷۸/۳	۶/۵
۹۵/۰۱	۱۸۴۷/۶۲	۹۲/۰۶	۸

جدول ۱۹ اختلاف فشار برای خاک‌های نوع اول و دوم را برای X80 نشان می‌دهد که این اختلاف فشار برای جرم ۳/۲، ۶/۵ و ۸ کیلوگرم به ترتیب ۹۲/۵۰٪، ۹۵/۰۳٪ و ۹۵/۰۱٪ بدست آمده است. جداول ۱۶ تا ۱۹ در حقیقت بیانگر تاثیر جنس خاک را تحت انفجار نشان می‌دهد که همانطور در بخش‌های پیش مشاهده شد با افزایش چگالی خاک مورد استفاده در مدلسازی در انفجار، تنش و فشار بیشتری به لوله انتقال یافت و با کاهش چگالی خاک رفتار خاک نرم و مانند یک میراگر عمل می‌کند و تنش و فشار کمتری به لوله وارد می‌شود و در نتیجه آسیب کمتری به لوله وارد می‌شود و با افزایش چگالی خاک رفتار خاک ترد و سخت‌تر و فشار بیشتری به لوله وارد می‌شود و در نتیجه آسیب بیشتری به لوله وارد می‌شود که جداول ۱۶ تا ۱۹ این موضوع را تایید می‌کند.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از نتایج نمودارها و جداول مربوط به سیال نفت و گاز به شرح زیر می‌باشد:

- نتایج حاصل از تاثیر دو نوع خاک مورد بررسی در بخش بررسی سیال نفت، در حقیقت بیانگر این موضوع است که هرچه خاک چگالی بیشتر داشته باشد به لوله فشار بیشتری انتقال می‌یابد و هرچه خاک دارای چگالی کمتر باشد عملکرد خاک در برابر لوله تحت انفجار مانند یک میراگر می‌باشد که در هنگام انتشار امواج انفجار بخش زیادی از تنش و فشار وارده به لوله را می‌گیرد و مانند یک تا دمپر عمل می‌کند.

- حال با شناخت عملکرد نوع خاک در انتقال تنش و فشار در لوله های مدفون تحت انفجار می توان پی برد که با توجه به اینکه لوله گذاری خطوط انتقال مدفون به ویژه نفت در پروژه های مهم و با هزینه های بسیار بالا طبقه بندی م شود لذا با بررسی در این مقاله می توان پی برد که در خاکهای با چگالی بالا بایستی به دلیل انتقال بالای تنش و فشار از لوله های با مقاومت بالا استفاده نمود و در خاک های با چگالی پایین تر بدلیل عملکرد بهتر و مناسب تر خاک (مانند میراگر) و انتقال تنش و فشار کمتر می توان از لوله های با مقاومت پایین تر استفاده نمود که این امر یکی از موارد بسیار حایز اهمیت می باشد که می تواند در قیمت اجرای پروژه های خطوط انتقال نفت تاثیرگذار باشد.
- در نمودار مقایسه ای فشار بین سیال نفت و آب، رفتار فشار لوله در ابتدا به صورت مستقیم بوده و در ادامه به سرعت افزایش یافته تا به نقطه پیک فشار خود رسیده اند و با یک شیب ملایم کاهش و در نهایت دمپ شده اند که همانطور که قبلا گفته شد دلیل این رفتار به علت جهت بارگذاری انفجار است که در جهت مخالف فشار سیال به لوله وارد می شود که این امر موجب کاهش فشار وارده به لوله می شود تا اینکه بعد از مدتی مقدار فشار به صفر نزدیک می شود. به طور کلی فشار سیال درون لوله به پایداری لوله کمک زیادی می کند. با افزایش چگالی سیال فشار کمتری به لوله وارد می شود و بالعکس و با کاهش چگالی سیال فشار بیشتری به لوله وارد می شود که موجب رساندن آسیب بیشتر به لوله می شود. نتایج نشان می دهد که با افزایش $1/23$ برابری چگالی سیال تقریباً $1/3$ درصد فشار وارده به لوله کاهش یافت و این کاهش بیانگر آسیب کمتر به لوله می باشد.
- مقدار فشار ماکزیمم برای گاز، نفت و آب به ترتیب برابر $976/67$ ، $588/6$ و $580/9$ مگاپاسگال بدست آمده است که این نتایج بیانگر این موضوع است که با کاهش چگالی سیال ها با افزایش فشار به لوله مواجه شده است که این افزایش بدین شرح است که فشار وارده از سوی سیال گاز به لوله نسبت به نفت و آب به ترتیب $39/73$ و $40/52$ درصد بیشتر بدست آمده است.

سیاسگزاری

نویسندگان این مقاله از دانشکده مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن کمال سپاسگزاری را دارند.

مراجع

- [1]. Yang, Zh. (1997). Finite element simulation of response of buried shelters to blast loadings. *Finite Elements in Analysis and Design*, 113-132
- [2]. Lampson, C.W. (1946). Effects of impact and explosion, *Explosions in Earth*, NRDC Washington USA, Vol.1, No. 2, AD 221-586.
- [3]. Reanking, W.J.M. (1870). *On the thermodynamic theory of Waves of finite longitudinal disturbance*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol. 160, pp. 277-288.
- [4]. Luccioni, B. Ambrosini, D. (2007). *Effect of buried explosions*, *Mecanica computational*, 26: p.2656- 2673.
- [5]. Tian, Y. Cassidy, M.J. (2008). *Modeling of pipe-soil interaction and its application in numerical simulation*", *International Journal of Geomechanics* 8(4): P. 213- 229.
- [6]. Lampson. C.W. (1946). *Effects of impact and explosions*, *Explosions in Earth*", NRDC Washington, USA, Vol, 1, Chapter 3.
- [7]. Tham, C. (2006). Numerical and empirical approach in predicting the penetration of a concrete target by an ogive-nosed projectile. *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 42, No. 14, pp. 1258-1268, DOI: 10.1016/j.finel.2006.06.011.
- [8]. Wu, C., Oehlers, D., Rebrost, M., Leach, J., and Whittaker, A. (2009). Blast testing of ultra-high performance fibre and FRP-retrofitted concrete slabs. *Engineering Structures*, Vol. 31, No. 9, pp. 2060-2069, DOI: 10.1016/j.engstruct.2009.03.020.
- [9]. Yan, S. and Xu, Y. R., Chang, H. Y. (2012). Numerical Simulation of Dynamic Response of Buried Pipeline by Ground Explosion. *Earth and Space*, pp. 1159-1166.
- [10]. Parviz M, Aminnejad, B. Fiouz, A.R. (2017). Numerical Simulation of Dynamic Response of Water in Buried Pipeline under Explosion. *KSCE Journal of Civil Engineering*. doi: 10.1007/s12205-017-0889-y.