

بررسی عددی تأثیر پدیده انفجار بر لوله‌های مدفون در خاک مسلح شده با ژئوسنتتیک

عادل عساکره^{۱*}، محمدرضا حسن پور^۲

۱- استادیار ۲- کارشناس ارشد، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

(دریافت: ۹۷/۰۵/۱۲، پذیرش: ۹۷/۱۰/۱۸)

چکیده

در سال‌های اخیر با گسترش تهدیدهای تروریستی نسبت به عملیات انتحاری - انفجاری در سطح شهرها، مقابله و محافظت از زیرساخت‌های حیاتی شهری در برابر تهدیدهای ناشی از انفجار از اهمیت خاصی برخوردار گردیده است. لذا پیش‌بینی میزان قدرت تخریبی هر انفجار در توده خاک و تبعات آثار آن نیازمند بررسی و مطالعات بیشتری است. به‌منظور کاهش تنش‌های ناشی از انفجار و کنترل ازدیاد تنش‌های فشاری و برشی در خاک و فشارهای جانبی وارده بر لوله‌ها، راهکارهای متعددی ارائه و بررسی شده است. یکی از این راهکارها استفاده از مسلح‌کننده‌های ژئوسنتتیک است. در خاک مسلح مکانیسم انتقال تنش مبتنی بر اندرکنش خاک و المان تسلیح است و عکس‌العمل تنش‌های برشی در این المان‌ها باعث ایجاد نیروهای کششی می‌گردد. این پدیده باعث افزایش مقاومت برشی، خاصیت کشسانی و شکل‌پذیری خاک مسلح شده می‌شود. در این تحقیق با مدل‌سازی عددی لوله‌های مدفون در خاک ماسه‌ای مسلح شده تحت اثر بارگذاری انفجاری سطحی به روش اجزای محدود و مقایسه نتایج، می‌توان به این نتیجه رسید که با استفاده از مسلح‌کننده‌ها می‌توان تنش‌ها و تغییر شکل را در لوله‌های تحت انفجار کاهش داد. نتایج نشان می‌دهد که میزان تغییر شکل به‌دست‌آمده از قرارگیری مسلح‌کننده‌ها در عمق ۱/۵ متری از سطح زمین با عرض ثابت، حدود ۳۵ درصد کاهش یافته است. ضمن آن‌که میزان کاهش تغییر شکل تاج لوله با استفاده از مسلح‌کننده با عرض ۴ متر در عمق ثابت ۱ متری، حدود ۵۱ درصد شده است.

کلیدواژه‌ها: انفجار لوله‌های مدفون، خاک مسلح‌شده، ژئوسنتتیک‌ها، روش اجزای محدود

Numerical Studying of Explosion Effect on Buried Pipelines in Geosynthetics Reinforced Soil

A. Asakereh*, M. R. Hassanpour²

University of Hormozgan, Bandar Abbas

(Received: 03/08/2018; Accepted: 08/01/2019)

Abstract

In recent years by increasing the terrorist threats and explosive operations in urban areas, protecting the important life line infrastructures against threats that arise from the explosion has become more important. Hence, predicting the extent of the destructive power of the explosion and its effects on soil layers necessitates further studies and researches. In order to reduce stress caused by the explosion and to control increasing compressive and shear stresses in the soil and lateral pressure on the pipes, several solutions have been presented. One of these solutions is utilizing geosynthetic reinforcement. In reinforced soils, the mechanism of stress transfer is based on the interaction of soil and reinforcement elements. The shear stress reaction causes tensile forces in reinforcement elements. This phenomenon leads to an increment of shear strength, elasticity and ductility of the reinforced soil. In this study, FEM method is used for modeling pipelines buried in the reinforced sandy soil exposed to surface blast loading. By comparing the results, it can be concluded that by using reinforcement in the soil, the stresses and deformations in the buried pipeline could be reduced. The results show that the deformation rate obtained from the placement of reinforcements at a depth of 1.5 m from the ground level (with a fixed width), has decreased by an amount of 35%. In addition, the rate of reduction in deformation of the pipe crest has decreased about 51% using a 4 meter wide reinforcement at a constant depth of 1 meter.

Keywords: Explosive, Buried Pipelines, Reinforced Soil, Geosynthetics, FEM

* Corresponding Author E-mail: asakereh@hormozgan.ac.ir

۱. مقدمه

با استفاده از نرم‌افزارهای اجزای محدود بتوانند نتایج حاصل از تأثیر انفجار بر خاک و سازه‌های مدفون را استخراج نمایند و در نهایت بتوانند با نتایج صحرایی موجود در مطالعات سایر دانشمندان مقایسه و نتایج را صحت‌سنجی نمایند.

یانگ و همکاران [۱] مدل‌های رفتاری جان‌پناه‌ها تحت اثر بار انفجاری را بررسی کردند. رفتار خاک ویسکو الاستیک و در یک محیط نیمه متناهی خشک و مرطوب در نظر گرفته شد؛ رفتار بتن در قبال بار انفجاری یک رفتار الاستو پلاستیک فرض گردید. هرچند در صورت اینکه فاصله منبع انفجار بسیار دورتر از جان‌پناه باشد می‌توان از رفتار خمیری بتن صرف‌نظر کرد. به دلیل سختی زیاد بتن نسبت به خاک از میرایی صرف‌نظر گردید. در نتایج به‌دست‌آمده توسط این نویسندگان ملاحظه می‌گردد که با افزایش فاصله از مبدأ انفجار، فشار ناشی از انفجار کاهش یافته و در شعاع تقریباً ده متری به‌گونه‌ای می‌شود که می‌توان از اثر آن صرف‌نظر کرد. در مطالعات آن‌ها مشاهده شد که در صورتی که محل انفجار نزدیک به سطح زمین نباشد (انفجار در هوا انجام گیرد)، انفجار اثری بر فشار وارده بر سازه در اعماق ۱۰ و ۲۰ متری ندارد.

گوی و چن [۲] تونل زیرزمینی فرودگاه شانگهای را تحت اثر انفجار خارجی به روش عددی بررسی کردند. مدل‌سازی تونل و خاک پیرامون با فرضیه بمب‌گذاری در خاک آتش‌فشانی و ماسه‌ای اشباع منطقه و با استفاده از مدل رفتاری الاستو پلاستیک موهر-کولمب برای خاک و ضریب میرایی ۳/۵ درصد در نرم‌افزار تحلیلی FLAC 2D انجام گردید. با مقایسه نتایج تحلیل‌های به‌دست‌آمده ملاحظه گردید که بحرانی‌ترین حالت تحلیل، زمانی است که انفجار در تاج تونل رخ دهد. هوایی [۳] جامع‌ترین مطالعات را بر روی انفجار در تونل مورد بررسی و گزارش کاملی در اختیار طراحان و مهندسين تونل قرار داد. این محقق با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus، تونل زیرزمینی نیویورک تحت اثر بار انفجاری در توده‌های خاکی مانند سنگ‌ها، خاک‌های ماسه‌ای متراکم، خاک‌های ماسه‌ای اشباع، به‌عنوان خاک پیرامون خط تونل زیرزمینی را مورد مطالعه قرار داد. این محقق دو تونل مشابه با قطر داخلی ۵ متر و فاصله مرکز به مرکز ۸ متر به عمق ۹ متر زیر سطح زمین را در نظر گرفت. هرچند که عمق دفن تونل به‌عنوان یک پارامتر مورد بررسی قرار گرفته است، ولی بحرانی‌ترین و بیش‌ترین رفتار تونل تحت اثر بارهای انفجاری در حالتی است که خاک از جنس رسی و اشباع باشد. هوایی [۳] با ادامه تحقیقات خود به این نتیجه رسید که با افزایش قدرت انفجار میزان تنش وارده بر تونل، افزایش ناگهانی داشته که منجر به ایجاد لرزش در تونل می‌شود. بیش‌ترین تمرکز تنش در ناحیه‌های نزدیک به محل انفجار بوده و کرنش‌های

سازه‌های زیرزمینی مانند فونداسیون‌ها، تأسیسات اتمی و سیستم‌های زیربنایی شریانی شهرها از قبیل خطوط آب، برق، گاز شهری و خطوط انتقال نفت، نقش مهمی در زندگی مردم در سراسر جهان ایفا می‌کنند، به شکلی که کوچک‌ترین آسیب به این تأسیسات، منجر به آسیب رسیدن به زندگی مردم و حتی فلج شدن تمام و یا بخشی از زندگی مردم می‌گردد. با گسترش تهدیدهای تروریستی در سال‌های اخیر به انجام عملیات انتحاری- انفجاری در سطح شهرها، مقابله و محافظت از زیرساخت‌های حیاتی شهری در برابر تهدیدهای ناشی از انفجار از اهمیت خاصی برخوردار گردیده است. در نظر گرفتن خطرات و آسیب‌های ناشی از انفجار در طراحی و مقاوم‌سازی سازه‌های زیربنایی جدید امری ضروری است. انفجار با تأثیر بر سازندهای ژئوتکنیکی و وقوع پدیده‌هایی مانند روانگرایی ناشی از نیروی محرک انفجاری و یا کاهش مقاومت برشی در سازند خاک منطقه می‌تواند منجر به نشست‌های ناگهانی و دوران پی‌های ساختمان و افزایش میزان باربری یک سازه از حداکثر ظرفیت باربری آن گردد. سازه‌های زیرزمینی مانند تونل‌ها، پارکینگ‌های طبقاتی زیرزمینی مدفون و یا نیمه مدفون و خطوط لوله بیشتر از هر زمان دیگری تحت اثر بارهای بزرگ استاتیکی و دینامیکی قرار می‌گیرند. عدم وجود مقاومت کافی در خاک سربار تهدیدی برای سازه‌های مدفون به‌ویژه خطوط لوله به شمار می‌رود. به همین دلیل افزایش ظرفیت باربری خاک و افزایش مقاومت برشی آن در برابر بارهای وارده و کاهش تغییرشکل‌های بزرگ وارده، در جهت ایمن‌سازی سازه‌ها و کاهش خطر آسیب‌پذیری آن‌ها، امری خاص و ضروری است.

یکی از راهکارهای افزایش مقاومت لوله‌ها تحت اثر بارهای انفجاری و کاهش اثرات مخرب، استفاده از مسلح‌کننده‌هایی همچون ژئوسنتتیک‌ها است. در خاک مسلح مکانیسم انتقال تنش مبتنی بر اندرکنش خاک و المان تسلیح است و تنش‌های فشاری وارد بر محیط مرکب با ایجاد تغییر شکل در المان‌های محیط باعث بسیج شدن تنش‌های برشی در محل فصل مشترک خاک و المان تسلیح می‌شود و عکس‌العمل این تنش‌ها در المان‌های تسلیح باعث ایجاد نیروهای کششی می‌گردد که افزایش مقاومت برشی، خاصیت کشسانی و شکل‌پذیری خاک مسلح را در پی دارد.

با گسترش و توسعه سخت‌افزارهای کامپیوتری در سال‌های اخیر امکان مدل‌سازی انفجار در سازه‌های زیرزمینی و در خاک و یا بر سطح خاک و بررسی تأثیرات ناشی از انفجار بر آن‌ها سهولت یافت. نزدیک بودن نتایج عددی به نتایج نمونه‌های صحرایی صورت گرفته توسط دانشمندان متعدد؛ همگان را بر آن داشت تا

عمق زیاد، محققان را بر آن داشت تا با روش‌های بهسازی و تثبیت خاک، به بهبود شرایط خاک و لوله و به دنبال آن افزایش مقاومت در برابر بارهای وارده، اقدام نمایند. در این تحقیق تلاش شده با توجه به پارامترهای اساسی در مطالعه اثر انفجار سطحی بر خطوط لوله مدفون در خاک ماسه‌ای، نقش مسلح‌کننده‌ها در افزایش ظرفیت باربری و مقاومت خاک و اثر آن بر میزان تغییر شکل‌ها و تنش‌های وارده بر لوله‌های مدفون در خاک بررسی شود و طول و عمق مؤثر قرارگیری ژئوسنتتیک‌ها را برآورد و ارائه نماید. از نتایج پر کاربرد این مطالعات، طراحی بهینه سازه‌ها از مصالح مناسب، تقویت خاک منطقه و طراحی بهینه مکانی سازه است.

۲. مفاهیم و روابط

وقوع انفجار در زیر یا روی سطح زمین، بلافاصله با پدیده زمین‌لرزه همراه خواهد شد [۱۰]. زمین‌لرزه از انتشار امواج ناشی از انفجار در لایه‌های زمین تولید می‌شود. زمین‌لرزه در لایه‌های خاک، تابع پیچیده‌ای از خواص دینامیکی خاک تشکیل‌دهنده زمین، مواد تشکیل‌دهنده انفجاری، هندسه و موقعیت مکانی انفجار است. به دلیل پیچیدگی این نوع مسائل، پیش‌بینی پاسخ زمین و سازه‌های بناشده سطحی در برابر نیروهای وارده از انفجار کار بسیار سخت و گاهی غیرقابل پیش‌بینی است. از نکات اصلی و مهم در لرزش زمین، انتشار امواج محرک انفجاری است. انرژی آزادشده از یک انفجار باعث افزایش فشار ناگهانی در محیط اطراف نقطه انفجار می‌شود. تغییر ناگهانی فشار موجب ایجاد موج انفجار می‌گردد. موج انفجار از افزایش فشار محدود به فشار حداکثر (p_{so}) در چند میلی‌ثانیه ایجاد می‌گردد.

فشار ضمنی، فشاری است که در سطح موازی با موج انفجار گسترش می‌یابد. سرعت موج انفجاری بسته به فشار دینامیکی یا فشار ناشی از باد انفجار توسط جبهه پیشانی موج شوک تولید می‌شود. هنگامی که فشار پیشانی موج شوک ناشی از انفجار به یک توده حجمی بزرگ گسترش می‌یابد، فشار حداکثر ضمنی پیشانی شوک کاهش یافته و مدت‌زمان اعمال فشار افزایش می‌یابد [۱۱].

بیش‌ترین مطالعات جهت یافتن رابطه ریاضی معادله فشار پیشانی شوک در بین سال‌های ۱۹۵۰ الی ۱۹۶۰ میلادی صورت گرفت. اولین مطالعات و تلاش‌ها برای حل تعاریف و روابط برای تحلیل این فشار، به روش عددی، توسط شارپ با ارائه یک روش تئوریک بر پایه نظریه شارپ بیان گردید. دووال رابطه نظری شارپ را بر پایه معادله فشار انفجاری تعمیم داد، به این صورت که فرم معادله تابعی از فشار حداکثر ناشی از انفجار و تابعی مشخص از زمان انفجار بود. این تابع بنیان بسیاری از مطالعات اندیشمندان بر روی مدل موج انفجاری بوده است [۱۰].

خمیری که منجر به آسیب رسیدن به جداره تونل می‌شود، در همین ناحیه رخ می‌دهد.

الرواجو [۴] با بررسی پارامترهای جابه‌جایی زمین تحت انفجارهای داخلی و سطحی بر لوله‌های مدفون، به این نتیجه رسید که هرچه چشمه انفجار از محل لوله دورتر باشد، از میزان سرعت موج انفجاری و شتاب موج انفجاری در حالت انفجار سطحی و خارجی کاسته شده و پارامترهای انفجار سطحی به مراتب اثر کمتری بر لوله نسبت به انفجار داخلی می‌گذارد. الرواجو [۵] اثر میزان مواد منفجره بر رفتار لوله‌های مدفون تحت اثر بارهای انفجاری داخلی و سطحی با نرم‌افزار تحلیلی آباکوس را مورد مطالعه قرار داد و به این نتیجه رسید که، با افزایش ماده انفجاری میزان فشار حداکثر وارده بر لوله‌ها افزایش می‌یابد و آسیب‌پذیری لوله‌ها محتمل‌تر گردیده است.

نورزاد و همکاران [۶] در مطالعه پارامتریک خود جنس لوله‌ها و اندازه لوله‌ها را در خاک‌های مختلف تحت اثر بارهای انفجاری بررسی کردند. خاک پیرامون لوله و حفاصل بین محل انفجار و خط لوله، بر اساس سختی و میزان تخلخل و درجه اشباع می‌تواند نوع و شدت موج شوک و موج‌های فشاری گذرا را تعیین نماید. آنان دریافتند که در خاک‌های ماسه‌ای نرم لوله‌های فولادی بیشتر بارهای وارده را تحمل می‌کنند و تسلیم نمی‌شود. کرنش‌های وارده به لوله‌های پلی‌اتیلن در خاک‌های ماسه‌ای نرم با هر قطری به‌راحتی به تسلیم می‌رسد. خاک پیرامون لوله‌ها نقش مهمی در بررسی اثر انفجار ایفا می‌کند. به‌گونه‌ای که خاک ماسه‌ای تراکم‌یافته، بهترین مقاومت را در برابر رفتار لوله تحت انفجار داخلی از خود نشان می‌دهد. خاک‌های ماسه‌ای نرم ضعیف‌ترین نوع خاک هستند، لذا تقویت خاک محیط اطراف لوله میزان کرنش‌ها در لوله‌ها را تا ۶۰٪ کاهش می‌دهد.

الرواجو و مانان [۷] اثر انفجار داخلی معادل ۲۵۰ کیلوگرم TNT را بر لوله‌هایی با سختی کم در خاک‌های رسی اشباع بررسی کردند. مصالح تشکیل‌دهنده لوله و خاک، الاستیک و همگن فرض شده است. آنان دریافتند، هرچه عمق دفن لوله‌ها بیشتر باشد، امکان تسلیم زودرس مصالح و به‌ویژه لوله حداقل خواهد شد.

مساح و ترابی‌پور [۸] به شبیه‌سازی عددی پاسخ سازه‌های زیرزمینی زیر اثر امواج ضربه‌ای پرداختند. آن‌ها در نرم‌افزار آباکوس به شبیه‌سازی عددی امواج ضربه‌ای بر روی کرنش پیشینه سازه‌های مدفون پرداختند. حسینی‌نسب و موحدی‌فر [۹] با ارزیابی عمق دفن تونل و هندسه مقطع، کاهش آثار تخریبی ناشی از انفجارهای سطحی را ارزیابی کردند.

به دنبال اهمیت لوله‌های مدفون و مقاومت آن‌ها در برابر بارهای انفجاری داخلی و سطحی و عدم امکان دفن لوله‌ها در

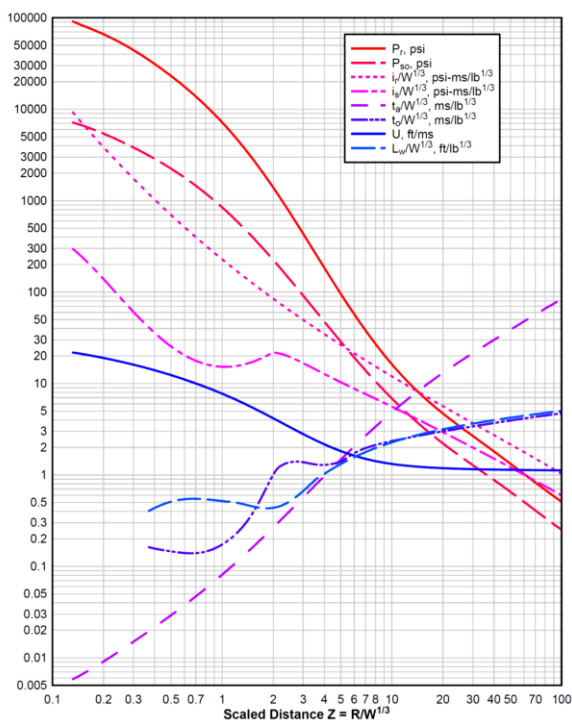
$$P_0 = \rho c * f * 160 * \left(\frac{R}{W^{1/3}}\right) - n \quad (۸)$$

$$V_0 = f * 160 * \left(\frac{R}{W^{1/3}}\right) - n \quad (۹)$$

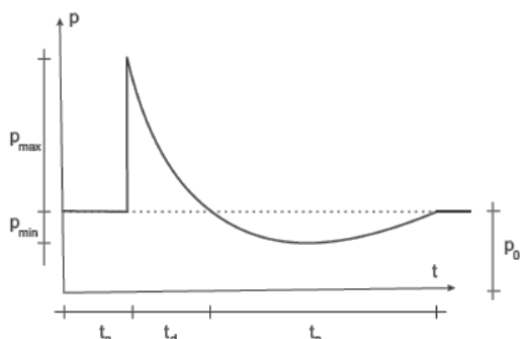
$$a_0 * W^{1/3} = f * 50 * \rho c * \left(\frac{R}{W^{1/3}}\right) - n \quad (۱۰)$$

که f = ضریب کوپلینگ، R = فاصله از چشمه انفجار (ft)، W = وزن منبع انفجار (lb)، n = ضریب میرایی، C = سرعت لرزه‌ای (fps) است.

جهت تعیین شدت و میزان فشار ناشی از انفجار بر سطح زمین از رابطه (۸) استفاده شده است.



شکل ۱. محاسبه فشار ناشی از انفجار سطحی [۱۱]



شکل ۲. نمودار فشار-زمان [۹]

۳. مدل‌سازی عددی

آباکوس یک نرم‌افزار مبتنی بر روش حل اجزای محدود بوده که قابلیت مدل‌سازی انواع مواد فلزی، پلاستیکی و ژئوتکنیکی مانند

اولین بار براد [۱۲] رابطه تعیین فشار حداکثر مثبت را با استفاده از مقیاس فاصله Z را به صورت روابط (۱) و (۲) بیان نمود:

$$p_{so} = \frac{6.7}{Z^3} + 1 \text{ bar} \quad (p_{so} > 10 \text{ bar}) \quad (۱)$$

$$p_{so} = \frac{0.975}{Z^1} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019 \text{ bar} \quad (۲)$$

$(0.1 \text{ bar} < p_{so} < 10 \text{ bar})$

با توجه به روابط (۱) و (۲) می‌توان فهمید که فشار موجود کاملاً وابسته به فاصله و وزن ماده انفجاری است و بر اساس مقیاس هاپکینز می‌توان این مقدار را پیدا نمود.

نیومارک و هنسن [۱۳]، رابطه (۳) را برای بیان فشار نهایی ناشی از انفجار برحسب بار برای انفجارهایی با شدت زیاد در سطح زمین بیان نمودند:

$$p_{so} = 6784 \frac{W}{R^3} + 93 \left(\frac{1.455}{Z^2}\right)^{1/2} \quad (۳)$$

میلز و همکاران رابطه (۴) را برحسب مقیاس Z جهت تعیین فشار ناشی از انفجار در سیستم SI بیان نمودند [۱۰ و ۱۴]:

$$p_{so} = \frac{108}{Z^1} + \frac{114}{Z^2} + \frac{1772}{Z^3} \quad (۴)$$

که $z=R/W^{1/3}$ برحسب متر و وزن ماده انفجاری TNT (W) برحسب کیلوگرم و فشار حداکثر مثبت برحسب کیلوپاسکال (kPa) بیان شد. نشریه TM-855 [۱۵] و نیز UFC [۹] با توجه به ضریب مقیاس برای محاسبه فشار نهایی p_{so} ناشی از انفجار از رابطه تجربی و نتایج حاصل از آزمایش‌های مشخص، مطابق شکل (۱) استفاده می‌نمایند.

تمامی دانشمندان به‌طور کلی به رابطه معلوم و مشخص برای معادله فشار زمان انفجار دست یافتند، ولی در سال‌های سپری شده آن را به شکل‌های متفاوت ولی با ماهیت یکسان ارائه نمودند. مطابق شکل (۲) از نشریه TM-855 [۱۵] و رابطه (۵) و رابطه (۶) که به روابط فریدلاندر معرفی می‌شود، مشاهده می‌شود اگر $p_0=0$ باشد:

$$p(t) = p_{so} \left(1 - \frac{t-t_a}{t_0}\right) \cdot \exp\left(-\beta \frac{t-t_a}{t_0}\right) \quad (۵)$$

که t_0 طول مدت زمان فاز مثبت است. اگر $p_0 \neq 0$ باشد:

$$p(t) = p_0 + p_{max} \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) \quad (۶)$$

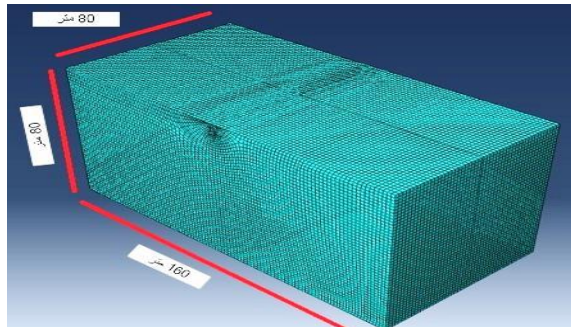
که تقریباً $b=0.4$ است و t_d همان زمان فاز مثبت و $t = t_i - t_a$ است. نشریه TM-855 [۱۵] بیان می‌کند که V_0 و P_0 مقادیر حداکثر فشار و سرعت موج انفجاری هستند که می‌توان گفت که رابطه (۷) بین سرعت و فشار حداکثر برقرار است:

$$p_0 = \rho c V_0 \quad (۷)$$

که: ρc = مقاومت ظاهری صوتی (psi/fps)، p_0 = فشار حداکثر فاز مثبت (psi)، V_0 = سرعت حداکثر (fps) است. همچنین می‌توان فشار (رابطه (۸))، سرعت (رابطه (۹)) و شتاب (رابطه (۱۰)) موج انفجاری را به شکلی دیگر نمایش داد [۱۱]:

جدول ۱. مشخصات خاک ماسه‌ای متراکم در مدل‌سازی [۵]

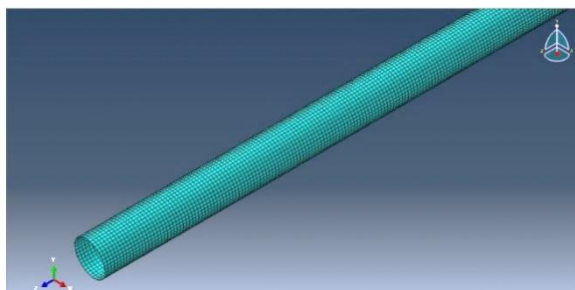
نوع مصالح	نسبت پواسن (v)	ضریب ارتجاعی (MPa)	وزن مخصوص (kN/m ³)
لوله	۰/۲۵	$۲/۱ \times ۱۰^۵$	۷۸/۵



شکل ۳. هندسه مش‌بندی خاک با استفاده از نرم‌افزار آباکوس

جدول ۲. مشخصات مکانیکی لوله [۵]

وزن مخصوص (kN/m ³)	۱۹
ضریب ارتجاعی (MPa)	۲۵
نسبت پواسن (v)	۰/۳
زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)	۳۰
زاویه اتساع (ψ)	۰
چسبندگی (kPa)	۵



شکل ۴. مش‌بندی لوله مدفون در خاک با نرم‌افزار تحلیلی آباکوس

اندر کنش بین لوله و خاک به صورت قید-گره‌ای سطح به سطح تعریف شده، به این شکل که هر گره از المان خاک به یک گره از المان لوله متصل شده است. در این تعریف اندر کنش برای المان سطحی که مدول الاستیک کمتری دارد، به‌عنوان سطح لغزش و دیگری به‌عنوان سطح اصلی انتخاب می‌شود. خاک مجاور لوله به‌عنوان سطح لغزش و لوله به‌عنوان سطح اصلی در نظر گرفته می‌شود. ژئوتکستایل‌ها به‌عنوان مسلح‌کننده، برای این مدل‌سازی مناسب است [۱۸]. در این تحقیق مطالعه پارامتریک بر روی عرض و عمق قرارگیری ژئوتکستایل‌ها انجام گرفته است. طول مسلح‌کننده با طول المان خاک یکسان و برابر ۸۰ متر و ضخامت آن نیز ۳ میلی‌متر فرض گردیده است. سایر مشخصات ژئوتکستایل‌ها در جدول (۳) ارائه شده است.

خاک و سنگ را دارد. این نرم‌افزار در سه دسته استاندارد، صریح و CAE تعریف می‌گردد [۱۶].

در حالت استاندارد گستره وسیعی از مسائل استاتیکی خطی و غیرخطی را می‌توان به روش اجزای محدود ضمنی تحلیل کرد. درحالی‌که محصول ABAQUS/Explicit برای تحلیل مسائل دینامیکی گذرا مانند برخورد، ضربه، انفجار، فشردگی و نیز مسائل شبه‌استاتیکی غیرخطی که در آن شرایط تماس تغییر می‌کند، مناسب است. دستگاه معادلات حاکم بر این تحلیل بر پایه انتگرال گیری صریح به همراه ماتریس قطری جرم، المان را تحلیل می‌کند. تحلیل در این حالت بر پایه پایداری و به‌صورت اتوماتیک انجام می‌گیرد [۱۷].

به‌منظور تعیین ابعاد هر یک از المان‌های مدل، فرآیند آنالیز حساسیت نسبت به بار انفجاری صورت گرفته است، تا در نهایت به ابعاد موردنظر رسیده شده است. خاک به‌عنوان فضای کلی مدل ساخته شده در فضای سه‌بعدی به ابعاد $۸۰ \times ۱۶۰ \times ۸۰$ متر به‌صورت فضای جامد با خاصیت انعطاف‌پذیر (به علت رفتار الاستو-پلاستیک) تعریف شده است (شکل ۳). در این مدل‌سازی خاک به‌عنوان ماده همگن و جامد و با رفتار الاستو-پلاستیک تعریف گردیده است. خاک ماسه‌ای متراکم خشک است که سطح آب زیرزمینی پایین‌تر از سطح لوله‌گذاری شده قرار گرفته است. مدل رفتاری خاک، مدل رفتاری موهر-کولمب است [۴] که می‌تواند رفتار ارتجاعی و درعین حال خمیری خاک را به‌خوبی نشان دهد. سایر پارامترهای خاک که در مدل‌سازی استفاده شده، در جدول (۱) آمده است. فرض بر آن است که تمامی پارامترهای خاک طی مدل‌های ساخته‌شده ثابت است. شکل المان مش‌بندی، شش‌وجهی (مکعبی) هشت‌گره‌ای با تکنیک جاروبی با الگوریتم تقارن محوری انتخاب شده است. نوع المان مش‌بندی C3D8R است، که تحلیل از نوع تنش در راستای سه‌بعدی و به‌صورت خطی با روش انتگرال کاهشی می‌شود. اندازه تقریبی هر المان مش‌بندی خاک $۱/۶$ متر، فرض شده که با انجام آنالیز حساسیت، این عدد به‌دست آمده است (شکل ۳).

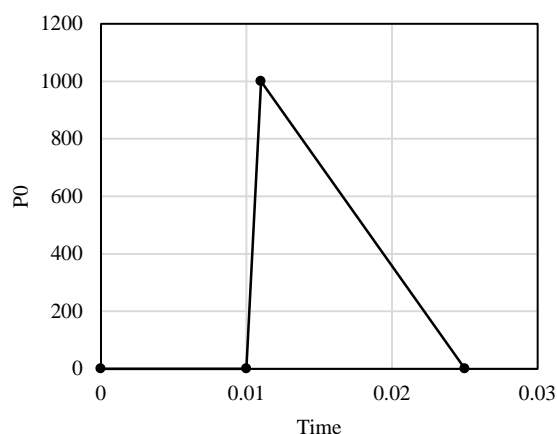
قطر لوله بر اساس حداقل قطر استاندارد برای انتقال میعانات در شبکه‌ی خطوط لوله مدفون [۴]، برابر با یک متر در نظر گرفته شد و لوله با ضخامت ۵ میلی‌متر و طول ۸۰ متر در خاک، مدفون گردیده است. لوله‌های فولادی را می‌توان با توجه به قابلیت تغییر شکل‌پذیری و تحمل تنش‌های بیشتر (به علت دارا بودن مدول الاستیک زیاد)، به‌عنوان جنس لوله مناسب با این تحقیق انتخاب نمود. لوله از جنس فولاد با نوع رفتار ارتجاعی یکسان تعریف گردیده و سایر مشخصات لوله در جدول (۲) آمده است. اندازه تقریبی هر المان مش‌بندی لوله $۰/۰۸$ متر با توجه به ابعاد در نظر گرفته‌شده، فرض شده است (شکل ۴).

انفجار به صورت تنش انفجاری معادل و در متوسط سطح ایجاد شده ناشی از چاله انفجاری و به صورت انفجار زیرسطحی واقع بر سطح زمین اعمال می‌گردد. حداکثر بازه زمانی انفجار ۲۵ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است. میزان تنش تجربی وارد شده بر سطح زمین از رابطه (۱۱) و بر اساس استاندارد ارتش آمریکا [۱۵] به دست آمده است.

$$p_0 = f \cdot (\rho \cdot c) \cdot 160 \cdot \left(\frac{R}{\sqrt{W}}\right)^{-n} \quad (11)$$

که n معرف ضریب فرسایش خاک و f معرف ضریب چسبندگی و ρc امیدانس صوتی است. برای خاک ماسه‌ای متراکم طبق نشریه آمریکا، ضرایب به دست می‌آید. به عنوان مثال برای فشار ناشی از انفجار در خاک ماسه‌ای متراکم، ضریب فرسایش ۲/۵ و ضریب چسبندگی ۰/۴، امیدانس صوتی ۴۴ است [۱۵].

فشار ناشی از انفجار به صورت بار آنی مثلثی است که در زمان اوج به حداکثر مقدار خود و در زمان حداکثر فشار به میزان صفر باز می‌گردد (شکل ۷).



شکل ۷. نمودار شماتیک بارگذاری مثلثی فشار ناشی از انفجار

مشخصه تنش ناشی از انفجار که بر سطح زمین وارد شده مطابق جدول (۴) است.

جدول ۴. تنش ناشی از بار انفجاری سطحی بر خاک سربار [۱۵]

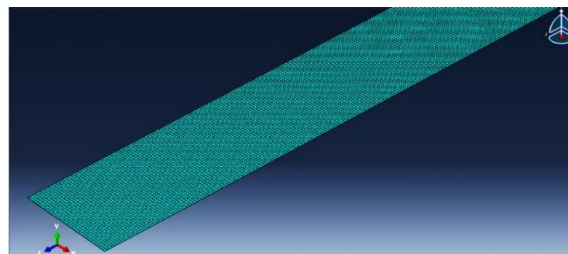
تنش ناشی از انفجار (MPa)	تنش ناشی از انفجار (Psi)	وزن ماده انفجاری (kg)
۴۸/۳	۷۰۰۶/۳۸	۵۰
۸۶	۱۲۴۷۷/۱	۱۰۰
۱۲۰/۴	۱۷۴۶۶/۹۵	۱۵۰
۱۵۳/۲	۲۲۲۳۲/۲۶	۲۰۰
۱۸۴/۷	۲۶۷۹۵/۱	۲۵۰

تعداد مدل‌های ساخته شده بسته به شرایط مطالعات پارامتریک به شرح جدول (۵) است.

جدول ۳. مشخصات مکانیکی مسلح‌کننده ژئوتکستایل [۱۹]

نوع مصالح	نسبت پواسن (V)	ضریب ارتجاعی (Pa)	وزن مخصوص (kN/m ³)
ژئوتکستایل	۰/۴۵	7×10^6	۹

ژئوتکستایل‌ها به علت رفتار شکل‌پذیری و قابلیت تحمل تنش‌های برشی بزرگ به دلیل خاصیت کشسانی و مقاومت کششی زیاد با دانه‌بندی‌های مناسب و توزیع یکنواخت تنش‌های فشاری در سطح، باعث گردیده نسبت به سایر مسلح‌کننده‌های ژئوسنتتیک جهت استفاده در تحلیل لوله‌های مدفون در خاک مسلح مناسب‌تر باشد. مدل رفتاری این مسلح‌کننده در مدل، الاستیک تعریف شده است [۲۰]. اندازه تقریبی هر المان مش‌بندی ژئوتکستایل ۰/۱ متر، فرض شده است (شکل ۵).



شکل ۵. مش‌بندی مسلح‌کننده (ژئوتکستایل) با نرم‌افزار آباکوس

برای بررسی تحلیل دینامیکی و بررسی اثر انفجار علاوه بر مرزهای استاتیکی، می‌بایست مرزهای جاذب انرژی را نیز لحاظ نمود. علت این امر وجود موج‌های انعکاسی ناشی از انفجار است که بازتاب آن‌ها در محیط خاکی می‌تواند جواب‌ها را تحت تأثیر خود قرار دهد. بر اساس نتایج براد [۱۲] می‌توان با بزرگ در نظر گرفتن ابعاد مدل، از اثرات انعکاس موج انفجاری در سطح توده خاک پیشگیری نمود.

مرزهای جاذب درصدی از انرژی را جذب و درصدی را به محیط باز می‌گرداند. فاصله مرز جاذب و مرکز انفجار به نحوی در نظر گرفته می‌شود که امواج انعکاسی کمترین اثر را بر روی محیط بگذارد. المان‌های مرز جاذب به صورت المان‌های CIN3D8 در مدل‌سازی مرز جاذب استفاده شده است. انفجار برحسب کیلوگرم در بالای تاج لوله، بر سطح زمین، مطابق شکل (۶) اعمال شده است.



شکل ۶. محل اعمال بار انفجاری بر سر تاج لوله

جدول ۵. تعداد مدل‌سازی‌های انجام گرفته جهت تحلیل و استخراج نتایج حاصل

مدل‌سازی لوله تحت اثر بار انفجاری در خاک مسلح	مدل‌سازی لوله تحت اثر بار انفجاری در خاک غیرمسلح	مدل‌سازی خاک ماسه‌ای غیرمسلح	مدل‌سازی خاک ماسه‌ای مسلح	برای ۵۰ کیلوگرم ماده انفجاری
تعداد مدل برحسب پارامتر متغیر عمق قرارگیری مسلح‌کننده	۱۵	-	-	-
تعداد مدل برحسب پارامتر متغیر عرض مسلح‌کننده	۱۵	-	-	-
تعداد مدل برحسب پارامتر متغیر عمق قرارگیری لوله	-	۱۵	-	-
تعداد مدل برحسب پارامتر متغیر میزان بار انفجاری	-	-	۵	۵
مجموع		۴۰		

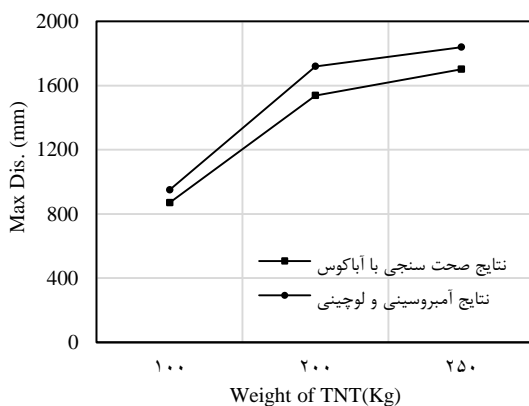
۴. اعتبارسنجی مدل‌سازی عددی

به منظور اعتبارسنجی کار انجام شده در نرم‌افزار آباکوس دو مدل-سازی تحت بارگذاری انفجاری انجام شده است. در مدل‌سازی اول به بررسی اثر بارگذاری انفجاری بر سطح خاک ماسه‌ای با و بدون استفاده از ژئوسنتتیک‌ها و مقایسه کار انجام شده با نتایج مطالعاتی آمبروسینی و لوچینی [۲۱] پیرامون بررسی اثر انفجار سطحی و عمق چاله‌های به وجود آمده بر سطح زمین، پرداخته شده است. در مدل‌سازی دوم اثر انفجار بر لوله‌های مدفون در خاک ماسه‌ای و مقایسه میزان جابه‌جایی در لوله با مطالعات الراجو و همکاران [۵] بر اثر بارگذاری انفجاری سطحی بر لوله‌های مدفون و نتایج حاصل بررسی شده است.

به منظور اعتبارسنجی، مدل‌سازی خاک ماسه‌ای در نرم‌افزار المان محدود آباکوس تحت بارگذاری سطحی انفجاری و مقایسه نتایج به دست آمده با مطالعات آمبروسینی و لوچینی [۲۱] انجام شده است. نتایج در جدول (۶) به تفکیک بار انفجاری نشان داده شده است. با مقایسه نتایج به دست آمده از تحلیل با نتایج مطالعات آمبروسینی و لوچینی مشاهده می‌گردد که نتایج به یکدیگر نزدیک بوده و اختلاف نتایج به دست آمده محسوس نیست. نتایج به دست آمده در جدول‌های (۶) و (۷) و شکل‌های (۸) و (۹) نشان می‌دهد که تغییرشکل‌های چاله انفجاری ایجاد شده در خاک رابطه مستقیمی با میزان بار انفجاری دارد.

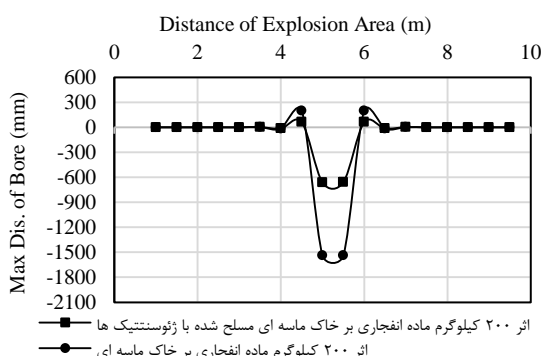
جدول ۶. مقایسه نتایج نشست سطحی زمین با نتایج به دست آمده از مطالعات آمبروسینی و لوچینی [۲۱]

ماده انفجاری (kg)	نشست سطحی زمین بدون حضور مسلح‌کننده (mm)	نتایج آمبروسینی و لوچینی [۲۱] (mm)	درصد اختلاف
۵۰	۷۲۰	-	-
۱۰۰	۸۷۰	۹۵۰	۸/۴
۱۵۰	۱۳۷۵	-	-
۲۰۰	۱۵۳۸	۱۷۲۰	۱۰/۶
۲۵۰	۱۷۰۲	۱۸۴۰	-

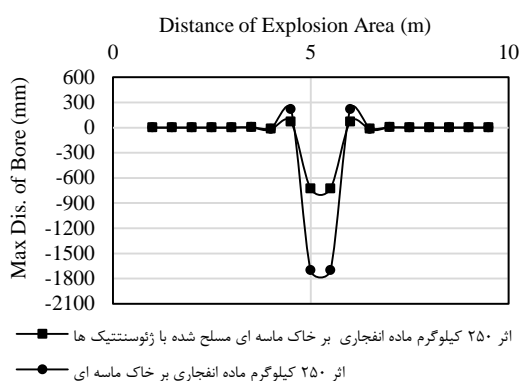


شکل ۸. نمودار بین شدت انفجار و عمق چاله انفجاری در خاک

هرچه میزان بار انفجاری بیشتر باشد، میزان تغییرشکل و عمق چاله انفجاری بیشتر شده است. در صورت استفاده از

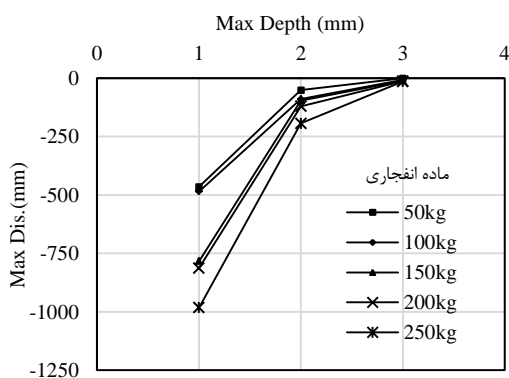


شکل ۱۰. تفاوت تغییر شکل چاله انفجاری خاک با استفاده و بدون استفاده از مسلح کننده ها تحت اثر بار انفجاری ۲۰۰ کیلوگرم TNT



شکل ۱۱. تفاوت تغییر شکل چاله انفجاری خاک با استفاده و بدون استفاده از مسلح کننده ها تحت اثر بار انفجاری ۲۵۰ کیلوگرم TNT

به منظور صحت سنجی کار انجام شده در نرم افزار آباکوس، اثر انفجار سطحی بر لوله های مدفون در خاک ماسه ای و مقایسه میزان جابه جایی در لوله با مطالعات الراجو و همکاران [۵]، بررسی شده است. با مدل سازی لوله الاستیک در خاک ماسه ای تحت اثر بارگذاری انفجار، اثر انفجار بر لوله های مدفون در عمق های مختلف بررسی شد (شکل ۱۲).



شکل ۱۲. نمودار جابه جایی تاج لوله ناشی از انفجار

نتایج به دست آمده بیانگر آن است که با قرارگیری لوله در عمق ۳ متری تحت اثر بار انفجار، تغییر شکل ثابتی در تاج، جداره و زیر لوله اتفاق می افتد و تغییر شکل های به دست آمده به سمت صفر همگرا است. مهم ترین دلیلی که می توان در این نتایج به آن اشاره نمود آن است که وقتی لوله در عمق ۳ متری قرار

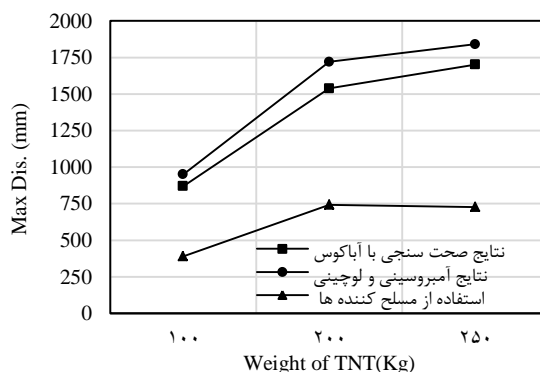
مسلح کننده ها، میزان تغییر شکل های ایجاد شده و چاله های ناشی از انفجار به دلیل اندر کنش بین مسلح کننده و خاک و جذب انرژی و نیز تنش برشی بین خاک و مسلح کننده رو به کاهش است.

با مدل سازی خاک ماسه ای مسلح شده با استفاده از یک لایه ژئوتکتایل در نرم افزار المان محدود آباکوس، مشاهده می شود (جدول ۷) که وجود یک لایه مسلح کننده تا حدود ۵۰ درصد میزان تغییر شکل های سطحی مانند چاله های انفجاری نسبت به حالتی که از ژئوسنتتیک ها استفاده نشده، را می توان کاهش داد.

جدول ۷. تغییر شکل سطحی زمین بر اساس بارگذاری متفاوت با و بدون حضور مسلح کننده ها

ماده انفجاری (kg)	بدون حضور مسلح کننده (mm)	بدون حضور مسلح کننده (mm)	با حضور مسلح کننده (mm)	درصد اختلاف
۵۰	۷۲۰	-	۳۹۰	۴۵/۸
۱۰۰	۸۷۰	۹۵۰	۴۱۰	۵۲/۹
۱۵۰	۱۳۷۵	-	۶۶۰	۵۴
۲۰۰	۱۵۲۸	۱۷۲۰	۷۴۳	۵۴/۹
۲۵۰	۱۷۰۲	۱۸۴۰	۷۲۷	۵۷/۳

با بررسی اثر انفجار بر چاله های انفجاری ایجاد شده در خاک، با حضور و بدون حضور مسلح کننده ها، اثر انفجار و میزان تغییر شکل های ایجاد شده بر حسب فاصله، نسبت به محل انفجار بررسی شده است. با مقایسه نتایج جدول (۷) و شکل (۹) و نمودار چاله انفجاری برای بارهای انفجاری ۲۰۰ و ۲۵۰ کیلوگرمی (شکل های ۱۰ و ۱۱)، می توان نتیجه گرفت که هرچه از محل انفجار فاصله گرفته شود از میزان تنش های ناشی از انفجار کاسته و تغییر شکل های به وجود آمده کاهش می یابد.



شکل ۹. نمودار بین شدت انفجار و عمق چاله انفجاری در خاک مسلح

جدول ۸. مطالعه پارامتریک بررسی عمق قرارگیری مسلح‌کننده‌ها

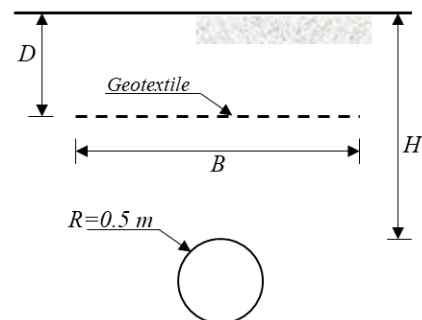
جهت بررسی اثر بار انفجاری			
عمق قرارگیری مسلح‌کننده (D)	تعداد لایه‌های تسلیح (N)	عرض مسلح‌کننده (B)	عمق قرارگیری مسلح‌کننده (H)
۱	۱	۴	۳
۱/۵	۱	۴	۳
۲	۱	۴	۳

شکل (۱۴-الف) میزان تغییر شکل تاج تونل تحت اثر بار انفجاری ۵۰ تا ۲۵۰ کیلوگرمی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که هرچه مسلح‌کننده در عمق بیشتر نسبت به سطح زمین و در فاصله کمتری نسبت به تاج لوله قرار گیرد، از میزان تغییر شکل‌ها کاسته شده است. میزان تغییر شکل کاهش یافته در عمق ۱/۵ الی ۲ متری محسوس بوده است. شکل (۱۴-ب) تغییر شکل کف لوله را نشان می‌دهد. به واسطه کاهش شدت تنش ناشی از بارهای انفجاری ملاحظه می‌شود که هرچه عمق قرارگیری مسلح‌کننده نسبت به سطح زمین بیشتر شده از میزان تغییر شکل‌ها کاسته شده که میزان کاهش یافته در عمق ۱/۵ الی ۲ متری محسوس بوده است. کاهش تغییرشکل‌های ایجاد شده در تاج و کف لوله بیانگر نقش فعال و مؤثر مسلح‌کننده‌ها در کشش و کاهش تنش‌ها بوده است. شکل (۱۴-ج) تغییر شکل جانبی لوله را نشان می‌دهد. به‌رغم کاهش تنش‌های افقی ناشی از انفجار مشاهده می‌شود که تغییرات جانبی لوله مقداری افزایش یافته است که این افزایش به علت افزایش تنش‌های برشی در لوله است، زیرا مسلح‌کننده‌ها در کشش مؤثر و در فشار ضعیف‌تر عمل می‌کنند و دلیل افزایش تنش برشی و ایجاد تغییرات برشی (جانبی) در لوله به این دلیل بوده است. با مراجعه به نمودار شکل (۱۴-ج) این تغییرشکل‌های ایجاد شده محسوس نبوده است و تنش‌های قائم وارد شده بر لوله نقش مهم‌تری در تعیین وضعیت بحرانی لوله ایفا می‌کند.

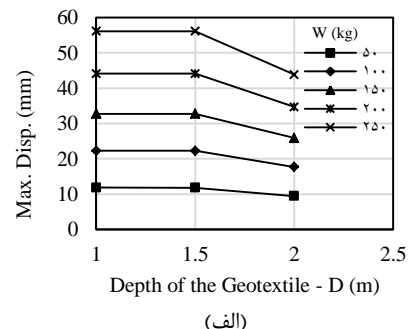
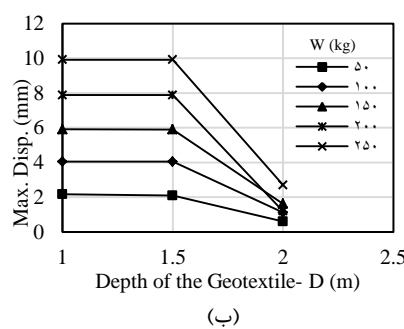
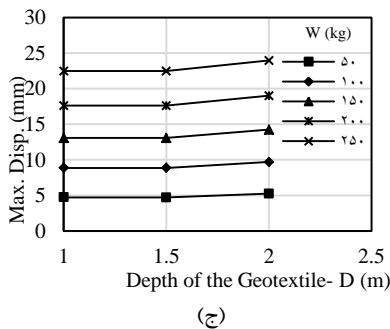
می‌گیرد، تنش به وجود آمده ناشی از انفجار و امواج ناشی از انفجار به علت جذب انرژی توسط خاک و نیز کشش و اندر کشش بین ذرات خاک و لوله، انرژی امواج ناشی از انفجار که باعث ایجاد تنش در خاک شده، رو به کاهش گذاشته و در نهایت باعث کاهش تنش و تغییرشکل‌های ناشی از انفجار در لوله می‌شود. لذا می‌توان از عمق روباره ۳ متری خاک به‌عنوان یک عمق حداقل و بهینه جهت مدفون نمودن لوله یاد کرد. از طرف دیگر با توجه به شکل (۱۰)، با افزایش بار ناشی از انفجار میزان شدت انفجار در عمق ثابت افزایش یافته است. در تاج لوله نسبت به جداره لوله و زیر لوله تغییرشکل‌های بزرگ‌تری ایجاد می‌گردد و بیشتر در معرض آسیب و خطر است. با توجه به شکل (۱۲)، هر چه عمق قرارگیری لوله‌های مدفون بیشتر شود، میزان تغییر شکل‌ها کاهش می‌یابد. پیشنهاد می‌گردد که با مسلح کردن خاک با ژئوسنتتیک، میزان تغییر شکل‌ها و عمق قرارگیری لوله‌ها را کاهش داد.

۵. نتایج و بحث

به‌منظور بررسی اثر عمق قرارگیری مسلح‌کننده بر میزان تغییر شکل ایجاد شده در لوله ناشی از بارهای انفجاری با ثابت در نظر گرفتن عرض مسلح‌کننده (B) و تغییر عمق قرارگیری مسلح‌کننده (D) برای ۵ بار متفاوت انفجاری (شکل ۱۳)، سعی شده تا عمق بهینه مسلح‌کننده‌ها انتخاب گردد. با توجه به جدول (۸)، مدل‌سازی و تحلیل‌ها انجام گرفته است.



شکل ۱۳. شماتیک قرارگیری لوله و مسلح‌کننده



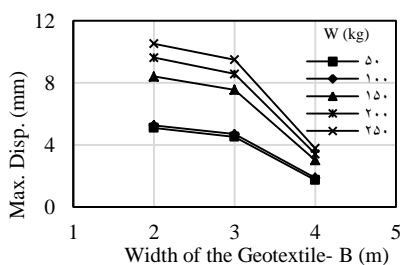
شکل ۱۴. نمودار جابه‌جایی حداکثر (الف) تاج، (ب) کف و (ج) جدار لوله نسبت به عمق مسلح‌کننده مدفون در خاک

شده و انرژی بیشتری جذب آن می‌شود. تاج لوله به دلیل قرار گرفتن در معرض تنش‌های قائم ایجاد شده ناشی از بار انفجار بیشتر در معرض آسیب و خطر هستند و به‌عنوان نتایج بحرانی بیشتر مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

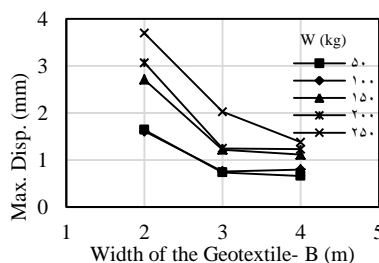
با توجه به شکل (۱۵-ب) با افزایش عرض مسلح‌کننده، تغییرشکل‌های ایجاد شده در کف لوله کاسته شده است. با توجه به میزان کاهش تغییر شکل‌های ایجاد شده در لوله چه در تاج و چه در کف لوله می‌توان گفت که عرض بین ۳ الی ۴ متر برای به حداقل رساندن تغییرشکل‌های ناشی از انفجار ایده‌آل است. با توجه به شکل (۱۵-ج)، میزان تغییر شکل‌ها بر اثر انفجار وارد بر جداره لوله، کاهش یافته است. چون محل قرارگیری مسلح‌کننده ثابت فرض شده و تنها پارامترهای عرضی مسلح‌کننده ملاک سنجش قرار گرفته، لذا نتایج به‌دست‌آمده برخلاف نتایج شکل (۱۲-ج) با کاهش روبرو شده است.

جدول ۹. مطالعه پارامتریک بررسی عرض مسلح‌کننده‌ها جهت بررسی اثر بار انفجاری

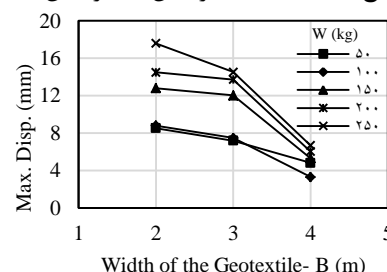
عمق قرارگیری مسلح‌کننده (D)	تعداد لایه‌های تسلیح (N)	عرض مسلح‌کننده (B)	عمق قرارگیری لوله (H)
۱	۱	۲	۳
۱	۱	۳	۳
۱	۱	۴	۳



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۱۵. نمودار جابه‌جایی حداکثر (الف) تاج، (ب) کف و (ج) جدار لوله نسبت به عرض مسلح‌کننده مدفون در خاک

TNT با فرض عرض ۲ متری مسلح‌کننده در عمق ۱ متری حدود ۲۳۰ میلی‌متر و با عرض مسلح‌کننده ۳ متری به حدود ۱۷۰ میلی‌متر می‌رسد، که نشان از کاهش ۲۷ درصدی تغییر شکل در جداره لوله است و با عرض مسلح‌کننده ۴ متری به حدود ۶/۷ میلی‌متر می‌رسد، که نشان از کاهش ۵۵ درصدی تغییر شکل در جداره لوله است. در مرحله دوم، مطالعات اثر انفجار و تأثیر آن بر تنش ایجاد شده در لوله با توجه به عرض و عمق مسلح‌کننده پرداخته شده است. برای بررسی اثر عمق قرارگیری مسلح‌کننده بر میزان تنش نهایی وارده بر لوله، ناشی از بارهای انفجاری با توجه به فرضیه‌های جدول (۸) تنش در لوله بررسی و نقش استفاده از مسلح‌کننده‌ها، مطابق شکل (۱۶) بیان شده است. با

با فرض ثابت بودن عرض مسلح‌کننده‌ها عمق ۱/۵ الی ۲ متری برای قرار گرفتن مسلح‌کننده‌ها عمق مناسب و ایده‌آلی است. می‌توان گفت که بیش‌ترین نشست تاج ناشی از انفجار ۲۵۰ کیلوگرم TNT با فرض قرارگیری مسلح‌کننده در عمق ۱ متری حدود ۵۶ میلی‌متر و با قرارگیری مسلح‌کننده در عمق ۲ متری به حدود ۴۴ میلی‌متر می‌رسد، که نشان از کاهش ۲۸ درصدی تغییر شکل در تاج لوله است. بیش‌ترین تغییر شکل جانبی ناشی از انفجار ۲۵۰ کیلوگرم TNT با فرض قرارگیری مسلح‌کننده در عمق ۱/۵ متری حدود ۲۲/۴۶ میلی‌متر و با قرارگیری مسلح‌کننده در عمق ۲ متری به حدود ۲۳ میلی‌متر می‌رسد، که نشان از افزایش ۶ درصدی تغییر شکل در جداره لوله است.

به‌منظور بررسی اثر عرض مسلح‌کننده بر میزان تغییر شکل ناشی از بارهای انفجاری با ثابت در نظر گرفتن عمق مسلح‌کننده (D) و تغییر عرض مسلح‌کننده (B) برای ۵ بار متفاوت انفجاری، عرض بهینه مسلح‌کننده‌ها به‌دست آمده است. تحلیل‌ها بر اساس جدول (۹) انجام شده است.

با توجه به شکل (۱۵) به‌طور کلی هرچه عرض مسلح‌کننده بیشتر شده است، از میزان تغییر شکل‌ها کاسته شد. با توجه به شکل (۱۵-الف) با افزایش عرض مسلح‌کننده، از میزان تغییر شکل ایجاد شده در تاج لوله کاسته شده است. افزایش عرض مسلح‌کننده‌ها باعث اندرکنش بیشتر بین خاک و مسلح‌کننده

در شکل (۱۵) ملاحظه می‌شود که با فرض ثابت بودن عمق قرارگیری مسلح‌کننده‌ها، در عرض ۴ متری (عرض ۴ برابر قطر لوله) تغییر شکل‌ها به یک عدد ثابت کوچک نزدیک شده و قابل صرف‌نظر است. به‌عنوان مثال می‌توان گفت، بیش‌ترین نشست تاج ناشی از انفجار ۲۵۰ کیلوگرم TNT با فرض عرض ۲ متری مسلح‌کننده در عمق ۱ متری حدود ۱۷/۵ میلی‌متر و با عرض مسلح‌کننده ۳ متری به حدود ۱۴/۵ میلی‌متر می‌رسد، که نشان از کاهش ۳۳ درصدی تغییر شکل در تاج لوله است و با عرض مسلح‌کننده ۴ متری به حدود ۱۰ میلی‌متر می‌رسد، که نشان از کاهش ۹۵ درصدی تغییر شکل در تاج لوله است.

بیش‌ترین جابه‌جایی جداره ناشی از انفجار ۲۵۰ کیلوگرم

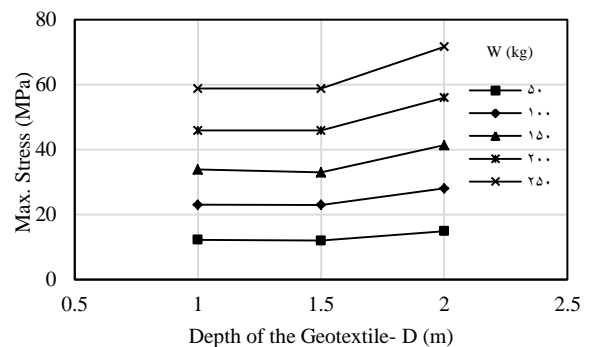
کاهش محسوس تنش نشده است.

با توجه به شکل (۱۷)، هرچه عرض مسلح‌کننده افزایش یابد، شیب کاهش تنش، تدریجی خواهد بود. میزان تنش کاسته شده برای انفجار ۲۵۰ کیلوگرم TNT، با فرض قرارگیری عرض مسلح‌کننده ۳ متری نسبت به عرض ۲ متری به میزان ۳۹ درصد و با فرض عرض مسلح‌کننده ۴ متری نسبت به عرض ۲ متری، ۵۱ درصد کاهش می‌یابد. بیشتر شدن عرض مسلح‌کننده‌ها و امکان اندرکنش بیشتر بین خاک و مسلح‌کننده و کنترل تنش برشی بیشتر، باعث کاهش محسوس تنش در لوله شده است. افزایش عرض مسلح‌کننده‌ها حتی باعث کاهش جذب انرژی در لوله‌ها شده است.

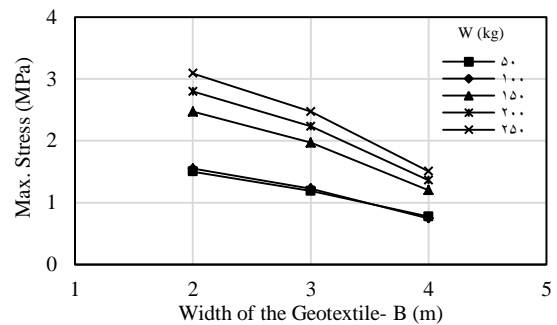
۶. نتیجه‌گیری

با بررسی نتایج حاصل از تنش و تغییرشکل‌های ناشی از انفجار بر لوله‌های مدفون در خاک و با توجه به در نظر گرفتن قطر ثابت لوله و ارتفاع روباره و بر اساس میزان بار انفجاری در نظر گرفته نتایج زیر به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فاصله از مبدأ انفجار، تنش و تغییر شکل ناشی از انفجار کاهش می‌یابد و در شعاع تقریباً ۱۰ متری می‌توان از اثر تنش ناشی از انفجار صرف‌نظر کرد. همچنین هرچه چشمه انفجار از محل لوله دورتر باشد، از میزان سرعت و شتاب موج انفجاری در حالت انفجار سطحی و نیز خارجی کاسته شده است. از طرفی دیگر تنش‌ها و تغییرشکل‌های ناشی از انفجار سطحی به مراتب اثر کمتری بر لوله نسبت به انفجار داخلی می‌گذارد. با بررسی اثر انفجار بر خاک مسلح‌شده با استفاده از ژئوتکستایل‌ها در عمق ۱ متری از سطح زمین، این نتیجه حاصل شده است که وجود مسلح‌کننده‌ها می‌تواند تا ۵۰ درصد میزان تغییرشکل‌های سطحی مانند چاله‌های انفجاری را نسبت به حالتی که از ژئوسنتتیک‌ها استفاده نشده را کاهش دهد. این کاهش کمک می‌نماید که میزان تنش و تغییر شکل وارده به لوله‌ها نیز کاسته شود. تنش به وجود آمده ناشی از انفجار و امواج ناشی از انفجار به علت جذب انرژی توسط خاک و نیز کنش و اندرکنش بین ذرات خاک و لوله، انرژی امواج ناشی از انفجار که باعث ایجاد تنش در خاک شده، رو به کاهش گذاشته و به طبع باعث کاهش تنش و تغییر شکل‌های ناشی از انفجار در لوله می‌شود. با بررسی اثر انفجار بر خطوط لوله مدفون در خاک ماسه‌ای بدون در نظر گرفتن مسلح‌کننده‌ها، هرچه عمق قرارگیری لوله‌های مدفون بیشتر شود، میزان تغییر شکل‌ها کاهش می‌یابد. می‌توان از عمق ۳ متری خاک به‌عنوان یک عمق حداقل و بهینه جهت مدفون نمودن لوله در خاک مسلح‌نشده یاد کرد که با مسلح‌شدن خاک می‌توان این عمق را کاهش داد. تاج و جداره لوله بحرانی‌ترین

بررسی شکل (۱۶) نتیجه گرفته شد که، افزایش عمق قرارگیری مسلح‌کننده منجر به افزایش تنش شده است. قرارگیری مسلح‌کننده در عمق بیشتر به دلیل امکان اندرکنش بیشتر بین خاک و مسلح‌کننده در لوله نسبت به بار انفجاری متعدد حساسیت بیشتری نشان داده است. هرچه مسلح‌کننده در فاصله کمتری نسبت به تاج لوله قرار گیرد به دلیل تمرکز تنش در مسلح‌کننده، پس تنش در لوله ایجاد شده که باعث افزایش تنش در لوله شده است. عدم در نظر گرفتن سیال در لوله باعث تشدید تنش در لوله گردیده. حضور سیال می‌توانست به‌عنوان یک تنش بازدارنده به کاهش تنش در لوله کمک نماید. جذب انرژی رخ داده در لوله باعث افزایش تنش‌ها با افزایش میزان بار انفجاری شده است. با توجه به شکل (۱۶)، با قرارگیری مسلح‌کننده در عمق ۱/۵ متری، تنش کاهش، ولی با قرارگیری در عمق ۲ متری میزان تنش برای انفجار ۲۵۰ کیلوگرم TNT، به‌دلیل پس‌تنش و انتقال تنش از مسلح‌کننده به لوله به میزان ۲۲ درصد در لوله افزایش یافته است. جذب انرژی بیشتر در لوله دلیل این افزایش است. نتایج اثر عرض مسلح‌کننده بر میزان تنش حداکثر وارده بر لوله، ناشی از بارهای انفجاری با توجه به فرضیات ذکرشده در جدول (۹)، در شکل (۱۷) آمده است.



شکل ۱۶. نمودار تنش حداکثر در لوله نسبت به عمق مسلح‌کننده مدفون در خاک



شکل ۱۷. نمودار تنش حداکثر در لوله نسبت به عرض مسلح‌کننده مدفون در خاک

با بررسی نتایج به‌دست‌آمده از تنش‌های ایجادشده ناشی از انفجار ملاحظه می‌شود که بیشتر شدن عرض مسلح‌کننده، باعث

- [4] Olarewaju, A. J.; Kameswara Rao, N. S. V.; Mannan, M. A. "Blast Effects on Underground Pipes"; *J. Geotech. Eng.* 2010, 15, 645-658.
- [5] Olarewaju, A. J.; Kameswara Rao, N. S. V.; Mannan, M. A. "Dimensionless Response of Underground Pipes Due to Blast Loads Using Finite Element Method"; *J. Geotech. Eng.* 2011, 16, 563-574.
- [6] Nourzad, D.; Khorshid, S.; Takada, S.; Bargi, K. "Analytical Proposal to Damage Assessment of Buried Continuous Pipelines during External Blast Loading"; *Int. Sci. Index, Civil and Environ. Eng.* 2011, 5, 516-520.
- [7] Olarewaju, A. J. "Effects of Accidental Explosions on Low Stiffness Pipes Buried in Undrained Clay"; *J. Geotech. Eng.* 2012, 17, 101-111.
- [8] Massah, S. R.; Torabipour, M. M. "Numerical Simulation of the Response of Underground Structures to Shock Waves"; *Adv. Defence Sci. Technol.* 2015, 3, 163-170. (In Persian)
- [9] Hosseini Nassab, H.; Movahedifar, S. M. "Evaluation of Tunnel Burial Depth and Section Geometry on Decreasing Destructive Effects of Surface Blast"; *Adv. Defence Sci. Technol.* 2019, 2, 113-121. (In Persian)
- [10] Gamber, N. K. "Shallow Foundation Systems Response to Blast Loading"; Master's Thesis, College of Engineering and Technology, Ohio University, Athens, 2004.
- [11] Unified Facilities Criteria (UFC) "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions"; 3-340-02 Technical Manual 5-1300, U.S. Dept. of Defense, Washington, DC, 2008.
- [12] Brode, H. L. "Numerical Solution of Spherical Blast Waves"; *J. Appl. Phys.* 1955, 26, 766-775.
- [13] Newmark, N. M.; Hansen, R. J. "Design of Blast Resistant Structures"; *Shock and Vibration Handbook*, Vol.3, C.M. Harris, Ed., New York, 1961.
- [14] Mills, C. A. "The Design of Concrete Structure to Resist Explosions and Weapon Effects"; *Proc. 1st Int. Conf. Concrete for Hazard Protections*, Concrete Society, London, 1987, 61-73.
- [15] US Army Engineers Waterways Experimental Station. TM5-855-1, "Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons"; Vicksburg, 1986.
- [16] Abaqus Inc. "ABAQUS/Standard User's Manuals"; Version 6.13. Abaqus Inc., Providence, 2012.
- [17] Bagheri, B. "ABAQUS software Applied Reference"; Kiyanat Publication, Tehran, 2013. (In Persian)
- [18] Koener, R. M. "Designing with Geosynthetics"; 5th Edition, Pearson Prentice Hall, New Jersey, USA, 2005.
- [19] Shukla, S. K. "Handbook of Geosynthetic Engineering"; ICE Publishing, London, 2012.
- [20] Shukla, S. K.; Yin, J. H. "Fundamentals of Geosynthetic Engineering"; Taylor and Francis, London 2006.
- [21] Ambrosini, D.; Luccioni, B. "Craters Produced by Explosions above the Soil Surface"; *Mec'anica Computacional* 2007, 27, 2253-2266.

ناحیه لوله تحت اثر بار انفجاری است. به این معنی که بیش‌ترین تغییر شکل ایجادشده در لوله در این نواحی رخ می‌دهد. حداکثر تغییر شکل تاج تحت اثر انفجار، بدون در نظر گرفتن مسلح‌کننده و با فرض قرارگیری لوله در عمق ۳ متری برابر ۳۰ میلی‌متر است، درحالی‌که با استفاده از مسلح‌کننده‌ها میزان تغییر شکل‌ها با فرض قرارگیری مسلح‌کننده‌ها در عمق ۱ متری با عرض ۴ متر به ۲۴ میلی‌متر می‌رسد. هرچه مسلح‌کننده در عمق بیشتر نسبت به سطح زمین و در فاصله کمتری نسبت به تاج لوله قرار گیرد از میزان تغییر شکل‌ها و تنش‌های وارده به لوله کاسته، به‌گونه‌ای که تغییر شکل ایجادشده در لوله نسبت به بار انفجاری متعدد حساسیت کمتری نشان می‌دهد. کاهش تغییر شکل‌های ایجادشده در تاج و کف لوله بیانگر نقش فعال و مؤثر مسلح‌کننده‌ها در کاهش تنش‌ها بوده است. تغییرات جانبی لوله مقداری افزایش یافته است که این افزایش به علت افزایش تنش‌های جانبی در لوله است. زیرا که مسلح‌کننده‌ها در کاهش مؤثر و در فشار ضعیف‌تر عمل می‌کنند. از سویی دیگر جذب انرژی در لوله اتفاق می‌افتد، که افزایش تنش برشی و ایجاد تغییرات جانبی به این دلایل بوده است. با فرض ثابت بودن عرض مسلح‌کننده‌ها عمق ۱/۵ الی ۲ متری برای قرار گرفتن مسلح‌کننده‌ها، عمقی مناسب و ایده‌آل است. در عمق ۱/۵ متری میزان تغییر شکل تاج لوله ۲۸ درصد کاهش می‌یابد. هرچه عرض مسلح‌کننده بیشتر باشد از میزان تغییر شکل‌ها کاسته شده، به‌گونه‌ای که تغییر شکل ایجاد شده در لوله نسبت به بارهای انفجاری متعدد حساسیت کمتری نشان می‌دهد، ولی این در حالی است که تنش با افزایش عرض مسلح‌کننده تغییر محسوسی نمی‌کند. حداکثر کاهش تنش در عمق ۱ متری با عرض ۴ متری به حدود ۵۱ درصد می‌رسد. با فرض ثابت بودن عمق قرارگیری مسلح‌کننده‌ها عرض ۳ الی ۴ متری برای مسلح‌کننده‌ها مناسب و ایده‌آل است.

۷. مراجع‌ها

- [1] Yang, Z. "Finite Element Simulation of Response of Buried Shelters to Blast Loadings"; *Finite Elem. Anal. Des.* 1997, 24, 113-132.
- [2] Gui, M. W.; Chien, M. C. "Blast-Resistant Analysis for a Tunnel Passing beneath Taipei Shongsan Airport - a Parametric Study"; *Geotech. Geol. Eng.* 2006, 24, 227-248.
- [3] Huabei, L. "Dynamic Analysis of Subways Structures under Blast Loading"; *Geotech. Geol. Eng.* 2009, 27, 699-711.