

## مدل سازی عددی انفجار در خاک و پاسخ سازه های مدفون با استفاده از روش همبسته اویلری-لاگرانژی

سید احمد حسینی<sup>۱\*</sup>، نوید حسینی<sup>۲</sup>

۱- استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۲- دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت: ۹۶/۰۳/۲۸، پذیرش: ۹۶/۰۷/۱۶)

### چکیده

در این پژوهش، به مدل سازی عددی پدیده انفجار مدفون با استفاده از روش همبسته اویلری-لاگرانژی (CEL) و بررسی پاسخ خاک و سازه مدفون به این انفجار پرداخته شده است. مدل سازی ماده منفجره و خاک اطراف آن با رویکرد لاگرانژی به دلیل ایجاد تغییر شکل های بزرگ و گسیختگی خاک در این ناحیه امکان پذیر ناست. به منظور ایجاد یک مدل جامع، باید مزیت های روش اویلری و لاگرانژی با هم ترکیب شوند. منطقه نزدیک محل انفجار با رویکرد اویلری به منظور تحلیل پاسخ حوزه نزدیک انفجار و گودال ناشی از انفجار مدل شده است و رویکرد لاگرانژی برای تحلیل پاسخ حوزه دور انفجار و فشار وارد بر سازه مدفون مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور مدل سازی ماده منفجره از معادله حالت Jones-Wilkins-Lee (JWL) استفاده شده است. پس از ساختن مدل عددی، اثر پارامترهای مختلف ماده منفجره (جرم)، محیط انتشار موج (چگالی، مدول یانگ، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی) و سازه مدفون (هندسه و جنس دیوار) بر پاسخ محیط و سازه به انفجار بررسی شده است.

**کلیدواژه ها:** سازه مدفون، انفجار در خاک، اندرکنش خاک و سازه، روش همبسته اویلری-لاگرانژی

## Numerical Modeling of Underground Explosion and Response of Buried Structures using Coupled Eulerian-Lagrangian Method

S. A. Hosseini \*, N. Hosseini

Malek Ashtar University of Technology  
(Received: 18/06/2017; Accepted: 08/10/2017)

### Abstract

*In the present study, underground explosion and its interaction with buried structures are modeled using Coupled Eulerian-Lagrangian Method (CEL). Modeling of explosive and its surrounding soil with Lagrangian approach is impossible due to large deformations and distortions which occur in soil. In order to develop a comprehensive model, the advantages of the Eulerian and Lagrangian approaches should be combined. The Eulerian approach is used for explosive and its surrounding medium to estimate near-field response such as dimensions of crater; and Lagrangian approach is used for far-field response of the blast such as pressure on buried structures. JWL equation of state is supposed for explosive behavior. Finally, the effect of different parameters of explosive (mass), soil (density, elastic modulus, internal friction angle, and cohesion) and buried structure (geometry and material) on the response of the medium are investigated.*

**Keywords:** Buried Structure, Underground Explosion, Soil-Structure Interaction, Coupled Eulerian-Lagrangian Method

\*Corresponding Author E-mail: hoseini@mut.ac.ir

## ۱. مقدمه

به کار گرفتند. آن‌ها دریافتند که پاسخ خاک در مناطق دور از انفجار صرفاً ناشی از تغییر شکل فاز جامد است. درحالی‌که در مناطق نزدیک نقطه انفجار پاسخ خاک ترکیبی از تغییر شکل تمام فازهای موجود است. گویی و چین [۴] پدیده انفجار را بر تونلی در زیر فرودگاه تایوان با مطالعه پارامترهای مانند میرایی خاک، شدت بار و گودال ناشی از انفجار مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که شدت انفجار از عوامل مؤثر بر میزان افزایش لنگر خمشی و تنش وارد بر تونل است. همچنین میرایی خاک اثر زیادی در پاسخ تونل نخواهد گذاشت.

لو و همکاران [۵] با ترکیب دو روش SPH برای مدل‌سازی ماده منفجره و ناحیه اطراف آن و روش FEM برای نواحی دورتر به این نتیجه رسیدند که مدل پیشنهادی از دقت مناسبی برای تخمین گودال انفجار، بار وارد بر سازه، پاسخ دیوار سازه برخوردار است. یانکولوفسکی و همکاران [۶] نیز رفتار یک دیوار مدفون تحت انفجار مدفون را مورد مطالعه قرار دادند. ما و همکاران [۷] پاسخ عضو خمشی از یک سازه مدفون را نسبت به بار انفجار با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه به صورت تحلیلی به دست آوردند. چن و همکاران [۸] پاسخ یک سازه قوسی شکل مدفون را تحت انفجار به صورت تحلیلی به دست آوردند. آن‌ها با بررسی انواع خاک‌های مختلف به این نتیجه رسیدند که برای ایمنی بیشتر بهتر است سازه مدفون در خاک با امپدانس آکوستیک پایین و ضریب کاهندگی بالا اجرا شود. جایاسینگ و همکاران [۹] رفتار یک شمع مدفون را در خاک ماسه‌ای تحت انفجار مدفون توسط نرم‌افزار مدل‌سازی کردند. آن‌ها نشان دادند که قسمت بالایی شمع آسیب‌پذیرتر است و پاسخ سازه با دور شدن از محل انفجار کاهش می‌یابد. چن و همکاران [۱۰] یک سازه قوسی شکل را تحت بارگذاری مدفون تحت آزمایش قرار دادند و پارامترهایی نظیر تغییر شکل، تنش، کرنش و شتاب را توسط ابزار اندازه‌گیری به دست آوردند. آزمایش نشان داد که سازه پس از تشکیل چهار یا پنج خط مفصل خمیری فرو می‌ریزد. کومار و همکاران [۱۱] به مدل‌سازی یک سازه نیمه مدفون تحت بار انفجار چند زمانه توسط نرم‌افزار ABAQUS پرداختند. چن و همکاران [۱۲] یک سازه قوسی آسیب‌دیده را مورد تعمیر قرار داده و سپس تحت یک انفجار مدفون بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از دیوار بنایی در کنار دیوار داخلی، تعمیر نقاط ترک‌خورده و استفاده از نوارهای فولادی پیچ شده به هم اقدام به مقاوم‌سازی سازه آسیب‌دیده کردند.

## ۲. روش تحقیق

در پژوهش حاضر به مدل‌سازی پدیده انفجار TNT مدفون در خاک و اثر آن بر گسیختگی خاک اطرافش و فشار ناشی از آن بر

بررسی پاسخ سازه‌های مدفون به بار انفجار به منظور طراحی ایمن این سازه‌ها اهمیت بالایی در مهندسی عمران دارد. پاسخ سازه‌های مدفون به بار انفجار در سه زمینه تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی در ادبیات فنی مطرح شده است. روش‌های تحلیلی غالباً بر پایه تحلیل تک درجه آزادی<sup>۱</sup> و صرفاً با در نظر گرفتن مود اصلی ارتعاش انجام یافته‌اند. در این روش‌ها معمولاً اندرکنش خاک-سازه با در نظر گرفتن میراگر در مدل لحاظ می‌شود. اما روش‌های عددی مانند اجزاء محدود<sup>۲</sup> برای مدل‌سازی مسائل همبسته مانند اندرکنش خاک، ماده منفجره و سازه کارایی بالاتری دارند. در پژوهش‌های پیشین، اکثر مدل‌های اجزاء محدود به منظور تحلیل پدیده انفجار مدفون، آن را به صورت یک بار فشاری به مرز خارجی محیط اثر می‌دهند و کل محیط خاک به همراه سازه مدفون با رویکرد لاگرانژی مدل می‌شود. استفاده از این رویکرد برای تحلیل پاسخ حوزه دور انفجار می‌تواند قابل قبول باشد، اما در مواردی که نقطه انفجار فاصله اندکی با سازه مدفون دارد، استفاده از این رویکرد ناکارآمد است. از طرف دیگر، مدل‌سازی منطقه نزدیک نقطه انفجار با رویکرد لاگرانژی اجزاء محدود به دلیل رخ دادن تغییر شکل‌های بسیار بزرگ امکان‌پذیر نیست. تغییر شکل‌های بزرگ نزدیک ماده منفجره باعث اعوجاج و گسیختگی شدید در اجزاء محدود آن ناحیه می‌شود و محاسبات را متوقف می‌کند. به همین منظور برای مدل‌سازی صحیح حوزه نزدیک انفجار و درعین حال بررسی اثر انفجار بر سازه‌های مدفون ترکیب رویکرد اویلری و لاگرانژی برای مدل‌سازی کامل این پدیده پیشنهاد می‌شود. ماده منفجره و خاک اطراف آن با رویکرد اویلری و پاسخ حوزه دور خاک و سازه مدفون با رویکرد لاگرانژی در اجزاء محدود مدل می‌شود. در این روش گودال ناشی از پدیده انفجار در خاک به درستی مدل شده بدون اینکه نیازی باشد نگران اعوجاج شدید اجزاء آن ناحیه باشید.

چن و همکاران [۱] پاسخ دینامیکی سازه‌های استوانه‌ای مدفون در عمق کم را در مقیاس آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند و نتایج خود را با مدل‌سازی اجزاء محدود مقایسه نمودند. یانگ [۲] با مدل کردن یک سازه دو بعدی مدفون در برابر انفجار سطحی با استفاده از روش اجزاء محدود به بررسی اثر میرایی خاک، ابعاد و جنس سازه و فاصله انفجار از سازه پرداخت و نشان داد که روش عددی FEM با روش SDOF در پاسخ طیفی تطابق مناسبی دارد. وانگ و لو [۳] یک مدل جدید سه-فاز (ذرات جامد، آب و هوا) برای شبیه‌سازی کامل رفتار خاک در برابر بار انفجار

<sup>1</sup> Single Degree of Freedom (SDOF)

<sup>2</sup> Finite Element Method (FEM)

می‌دهد:

$$P(R, t) = P_a e^{-\frac{t}{t_a}} = f \beta \rho_c \left( \frac{R}{\frac{1}{W^3}} \right)^{-n} e^{-\frac{t}{t_a}} \quad (2)$$

که در آن،  $\beta = 0.47$  و  $f$  ضریب همبستگی انرژی انفجار (برابر  $1$ )،  $\rho_c$  امپدانس آکوستیک خاک،  $n$  ضریب کاهش دامنه (معمولاً برابر  $2.75$ ) و  $R$  فاصله شعاعی از مرکز ماده منفجره  $W$  وزن ماده منفجره و  $t$  زمان که از لحظه رسیدن موج محاسبه می‌شود و  $t_a = R/c$  مدت زمان رسیدن موج است که در آن،  $c$  سرعت انتشار موج است.

### ۳. نتایج و بحث

در این بخش به شیوه مدل‌سازی و تحلیل نتایج دو مثال عددی که در نرم‌افزار ABAQUS مدل شده‌اند پرداخته شده است. در این مثال‌ها، میزان تأثیر پارامترهای مختلف ماده منفجره، خاک و سازه مدفون بر پاسخ مدل به پدیده انفجار بررسی می‌شود. مثال اول به منظور بیان محدودیت‌های روش لاگرانژی ارائه شده است و در مثال دوم اندرکنش ماده منفجره، خاک و سازه دیده شده است که برای حل آن از روش همبسته اوپلری-لاگرانژی (CEL) استفاده شده است. این روش مزیت‌های فراوانی برای مدل‌سازی حوزه دور و نزدیک پدیده انفجار مدفون دارد که در تحقیقات گذشته کمتر به آن پرداخته شده است.

#### ۳-۱. مثال اول: پاسخ پناهگاه مدفون به بار انفجار در محیط ویسکوالاستیک با استفاده از روش اجزاء محدود لاگرانژی

در این مثال به بررسی رفتار یک سازه مدفون با مقطع مستطیلی در برابر انفجاری که درون خاک اتفاق می‌افتد، پرداخته می‌شود (شکل ۱). ابتدا پاسخ میدان آزاد (Free-Field Motion) محیط خاک به بار انفجار و تأثیر میرایی خاک بر پاسخ آزاد خاک بررسی شده است. همچنین نتایج حاصل از تحلیل عددی با روابط تجربی ارائه شده در دستورالعمل ۱-۸۵۵-۵ TM مقایسه شده است. سپس، اثر وجود سازه بر افزایش پاسخ میدان آزاد به دلیل انعکاس موج از سطح سازه بررسی شده است و در نهایت به تأثیر صلبیت سازه، ضخامت دیوارها، جنس بتن سازه بر پاسخ آن نسبت به بار انفجار پرداخته شده است. خاک به صورت یک محیط نیمه بی‌نهایت مدل شده است، بنابراین به منظور اینکه اثر انعکاس امواج در مرزهای خارجی مسئله بر نتایج مدل‌سازی از بین برود، لازم است مرزهای محیط خاک از منبع انفجار فاصله داشته باشند. امکان جداسازی بین سازه و خاک اطراف آن در حین بارگذاری لحاظ نشده است، بنابراین فرض شده است که

سازه‌های مدفون پرداخته شده است. به منظور مدل‌سازی دقیق و درست انفجار TNT، لازم است تا از معادله حالت<sup>۱</sup> JWL در نرم‌افزار ABAQUS استفاده شود. این معادله حالت رابطه‌ای بین فشار ماده منفجره و چگالی آن در هر لحظه برقرار می‌کند که پارامترهای آن از آزمایش به دست می‌آید. معادله حالت JWL یک ماده منفجره جامد به صورت رابطه زیر است:

$$P = A \left( 1 - \frac{\omega \rho}{R_1 \rho_0} \right) e^{\left( -\frac{R_1 \rho_0}{\rho} \right)} + B \left( 1 - \frac{\omega \rho}{R_2 \rho_0} \right) e^{\left( -\frac{R_2 \rho_0}{\rho} \right)} + \frac{\omega \rho^2}{\rho_0} E_{m0} \quad (1)$$

در این رابطه،  $\rho_0$  چگالی اولیه ماده منفجره،  $\rho$  چگالی محصولات انفجار و مقادیر  $A, B, R_1, R_2$  و  $\omega$  ثابت‌های معادله JWL هستند.  $E_{m0}$  انرژی اولیه بر واحد جرم است که در این معادله حالت، فشار تولیدشده ( $P$ ) ناشی از آزاد شدن انرژی شیمیایی ماده منفجره است. از آنجایی که انفجار ماده منفجره باعث ایجاد تغییر شکل‌های بسیار بزرگ در خاک پیرامون خود می‌شود، استفاده از رویکرد لاگرانژی (که حرکت گره‌ها متناظر با حرکت مصالح است) به منظور مدل‌سازی ماده منفجره و خاک اطراف آن مناسب ناست. تغییر شکل‌های بزرگ و ایجاد اعوجاج شدید در اجزاء محدود مسئله از معایب روش لاگرانژی است که محاسبات را متوقف می‌کند. بدین منظور استفاده از روش همبسته اوپلری-لاگرانژی (CEL)<sup>۲</sup> در حل این مثال پیشنهاد می‌شود. بدین ترتیب که نواحی نزدیک ماده منفجره با رویکرد اوپلری (که گره‌ها علی‌رغم حرکت مصالح، ثابت می‌مانند) و نواحی دورتر و سازه مدفون با رویکرد لاگرانژی مدل می‌شوند و اندرکنش بین این دو محیط با اعمال قید تماس در نرم‌افزار میسر می‌شود. در رویکرد اوپلری به راحتی می‌توان ناحیه تحت تأثیر ماده منفجره و پخش خاک اطراف آن را بررسی نمود اما تنش‌ها و تغییر شکل‌های خاک قابل بررسی نخواهد بود. برای شبیه‌سازی خاک از مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده شده است.

در پدیده انفجار، امواجی در محیط خاک تولید می‌کند که به صورت کروی انتشار می‌یابند. در صورتی که سازه‌ای در خاک مدفون نباشد، فشار حاصل از این امواج را فشار میدان آزاد می‌نامند. زمانی که موج به یک سازه برخورد کند، تغییراتی در مقادیرش اتفاق می‌افتد. در رویکردهای متداول طراحی، بار فشاری وارد بر دیوار روبه جبهه موج از طریق ضرب فشار میدان آزاد در یک ضریب تجربی (افزاینده) حاصل می‌شود. دستورالعمل طراحی ۱-۸۵۵-۵ TM بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی، رابطه تجربی زیر را برای توزیع فشار میدان آزاد بر حسب فاصله و زمان ارائه

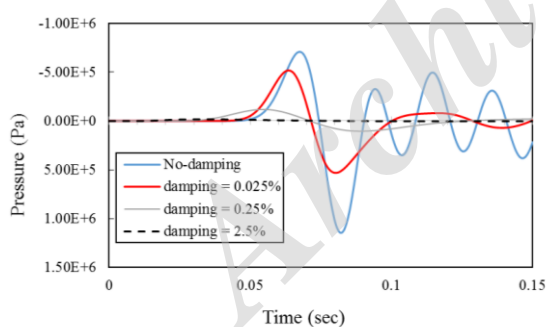
<sup>1</sup> Jones-Wilkins-Lee

<sup>2</sup> Coupled Eulerian Lagrangian

است:

$$P(t) = P_a e^{-\frac{t}{t_a}} = 10^7 e^{-165t}$$

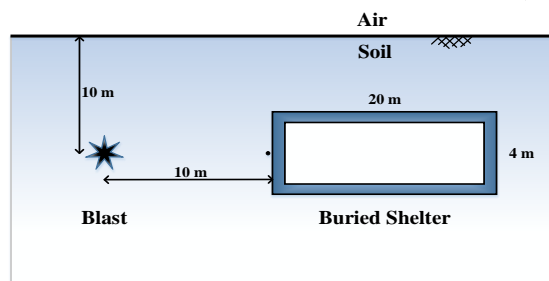
شکل (۲) نشان می‌دهد که درصد میرایی خاک چه تأثیری بر پاسخ میدان-آزاد آن در فاصله  $R = 9.81$  m از منبع انفجار دارد. اگر میرایی نباشد و خاک صرفاً رفتار الاستیک داشته باشد، مقدار فشار نوسان زیادی خواهد داشت و مقدار فشار نیز بیشتر خواهد بود. در این مثال فرض شده است که محیط خاک قادر به تحمل تنش‌های کششی است. نتایج حاصل از این تحلیل مطابقت خوبی با نتایج ارائه‌شده توسط یانگ [۲] دارد. در شکل (۳) نتایج مدل‌سازی با فرض درصد میرایی برابر  $\xi = 2.5\%$  در فاصله  $9.81$  متر از منبع انفجار با نتایج مدل‌سازی یانگ و رابطه تجربی (۱) مقایسه شده است. منحنی‌های تجربی برای دو سرعت موج طولی متفاوت ترسیم شده است:  $c = 300$  m/s که در مدل‌سازی خاک متداول است و  $c = 165$  m/s که بر اساس مشخصات خاک مفروض محاسبه شده است. میرایی خاک‌ها معمولاً مقداری در حدود  $2\%$ - $20\%$  است. با وجود میرایی  $2.5\%$  در محیط خاک، مقدار تنش حداکثر در مقایسه با ظرفیت تسلیم خاک‌ها عدد کوچکی است. نتایج تحلیل عددی مطابقت خوبی با رابطه تجربی با فرض  $c = 300$  m/s و  $t > 30$  ms دارد. در نتیجه، در نظر گرفتن درصد میرایی  $2.5\%$  و سرعت موج  $300$  متر بر ثانیه می‌تواند برای این نوع خاک مورد استفاده قرار گیرد و در ادامه از همین مقدار میرایی برای محیط خاک استفاده شده است.



شکل ۲. تأثیر میرایی خاک بر فشار میدان-آزاد ( $R = 9.81$  m)

یک محیط نیمه بی‌نهایت خاک را در نظر بگیرید که یک پناهگاه به ابعاد  $20$  در  $4$  متر و با ضخامت دیوار  $t_w = 0.5$  m در آن مدفون است (شکل (۱)). مرکز جرم پناهگاه در عمق  $10$  متری درون خاک قرار دارد و تراز افقی آن با منبع انفجار یکسان است. فاصله منبع انفجار از دیوار پناهگاه  $10$  متر است. محیط خاک و سازه با المان‌های دو بعدی چهار گره‌ای مدل شده‌اند. ابتدا به بررسی اثر مدول یانگ بتن مصرفی در سازه پناهگاه بر پاسخ آن نسبت به بار انفجار پرداخته می‌شود. برای این منظور سازه پناهگاه با دو نوع بتن مختلف مدل شده است: (۱) بتن با مدول یانگ  $26$  GPa (۲) بتن با مدول یانگ  $26000$  GPa. همچنین

سازه و خاک در تمام مدت تحلیل به هم چسبیده‌اند. تحلیل به صورت دو بعدی و با فرض شرایط کرنش مسطح (Plane Strain) انجام یافته است.



شکل ۱. تعریف هندسه سازه و بارگذاری انفجار مثال ۱

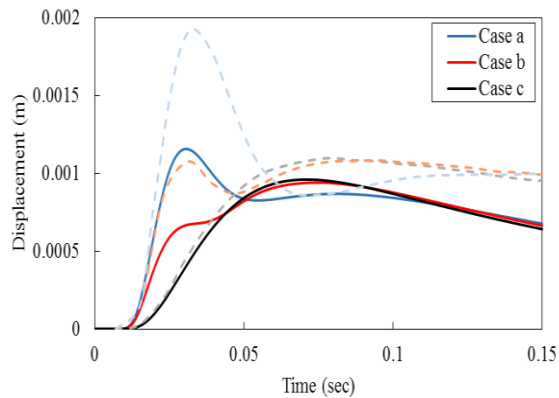
در این مثال خاک به صورت یک محیط ویسکوالاستیک مدل می‌شود تا اثرات میرایی در مدل لحاظ شود. انتخاب مدل رفتاری مناسب برای خاک به هدف مدل‌سازی وابسته است. خاک را می‌توان به صورت یک ماده الاستوپلاستیک نیز مدل نمود. اما باید توجه کرد که تغییر شکل‌های پلاستیک صرفاً به ناحیه نزدیک منبع انفجار محدود می‌شود. اگر هدف بررسی رفتار خاک در نزدیکی سازه مدفون باشد، در نظر گرفتن اثرات میرایی در مدل ویسکوالاستیک کفایت می‌کند. مدل میرایی مورد استفاده در نرم‌افزار میرایی «رایلی» است. ماتریس میرایی رایلی به صورت ترکیب خطی ماتریس جرم و سختی خاک تعریف می‌شود. این میرایی باید به گونه‌ای تعریف شود که پاسخ دینامیکی تمام موده‌های ارتعاشی را به یک اندازه میرا کند. به این منظور درصد میرایی مطلوب را باید برای موده‌های ارتعاشی اول و سوم تنظیم نمود. سازه مدفون از مصالح بتنی ساخته می‌شود که مشخصات الاستیک آن در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات مصالح مثال ۱

مشخصات مصالح بتن		
مدول یانگ (بتن ۱)	GPa	۲۶
مدول یانگ (بتن ۲)	GPa	۲۶۰۰۰
ضریب پواسون		۰/۲
چگالی	kg/m <sup>3</sup>	۲۳۰۰
مشخصات مصالح خاک		
مدول یانگ	MPa	۳۴/۵
ضریب پواسون		۰/۳
چگالی	kg/m <sup>3</sup>	۱۷۰۰
امپدانس	Pa.s/m	$5 \times 10^5$

وزن ماده منفجره  $W = 6$  kg فرض شده است و انفجار در عمق  $10$  متری خاک اتفاق می‌افتد. انفجار به صورت یک بار فشاری بر محیط دایره‌ای به شعاع  $R_0 = 1$  m که هم مرکز با ماده منفجره است، لحاظ شده است. بر اساس رابطه (۲) بار وارد بر محیط دایره برابر است با  $P_a = 10^7$  Pa و تابع زمانی آن به شرح زیر

به نظر می‌رسد تنها دلیل تفاوت دو مدل، تفاوت در مدل‌سازی مرز سازه و خاک است. همان‌طور که در شکل (۶) مشخص است، هر چه ضخامت و صلبیت دیوار کمتر باشد شاهد تغییر مکان‌های بزرگ‌تری هستید. نمودار تغییر مکان وسط دیوار در نهایت به تغییر مکان کل سازه پناهگاه که تقریباً ۰٫۶ میلی‌متر است، میل می‌کند.



شکل ۶. تأثیر ضخامت دیوار بر جابه‌جایی وسط دهانه دیوار

۲-۳. مثال دوم: پاسخ مخزن مدفون به بار انفجار در محیط الاستوپلاستیک با استفاده از روش همبسته اویلری-لاگرانژی

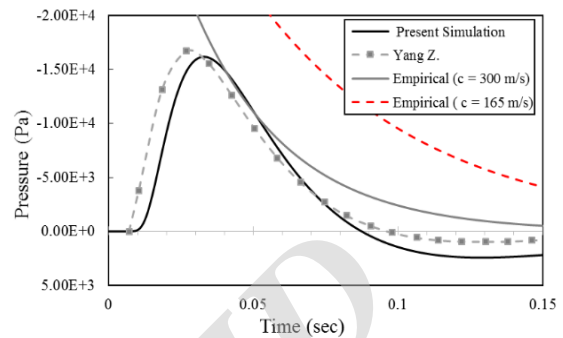
۳-۲-۱. بررسی انفجار TNT مدفون در خاک و تأثیر پارامترهای خاک بر پاسخ میدان آزاد:

در ابتدا مدل را بدون حضور سازه مدفون حل کرده و پاسخ میدان آزاد خاک را به انفجار TNT مدفون از جنبه‌های مختلف بررسی می‌شود و در نهایت نتایج حاصل‌شده را با روابط آیین‌نامه‌ای و تجربی مقایسه می‌شود. در این بخش تمرکز اصلی بر روی بررسی تأثیر پارامترهای خاک (مانند مدول یانگ، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی) و جرم ماده منفجره بر پاسخ میدان آزاد است. بنابراین تمام مدل‌سازی‌ها بر اساس چهار نوع خاک: ماسه متراکم، ماسه متراکم چسبیده، ماسه شل و ماسه شل چسبیده انجام گرفته است که مشخصات آن‌ها در جدول (۲) آمده است.

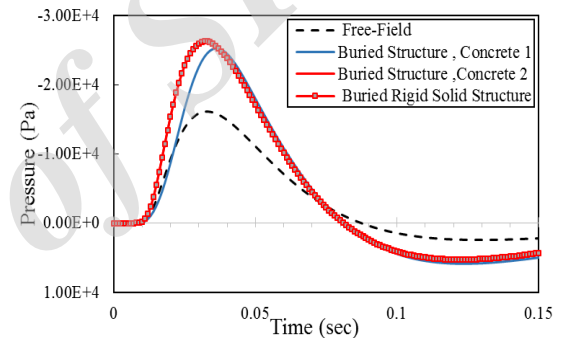
جدول ۲. مشخصات خاک در مثال ۲

نوع خاک	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	مدول یانگ (MPa)	زاویه اصطکاک	چسبندگی (kPa)
۱- ماسه متراکم چسبیده	۱۸۱۰	۱۲۴	۴۲	۲۵
۲- ماسه متراکم	۱۸۱۰	۱۲۴	۴۲	۰
۳- ماسه شل چسبیده	۱۶۹۰	۵۰	۳۰	۲۵
۴- ماسه شل	۱۶۹۰	۵۰	۳۰	۰

پاسخ سازه با فرض رفتار کاملاً صلب پناهگاه نیز بررسی شده است. فشار ایجادشده بر دیوار رو به جبهه موج برای سه حالت مختلف با مقدار پاسخ میدان-آزاد، در شکل (۴) مقایسه شده است.



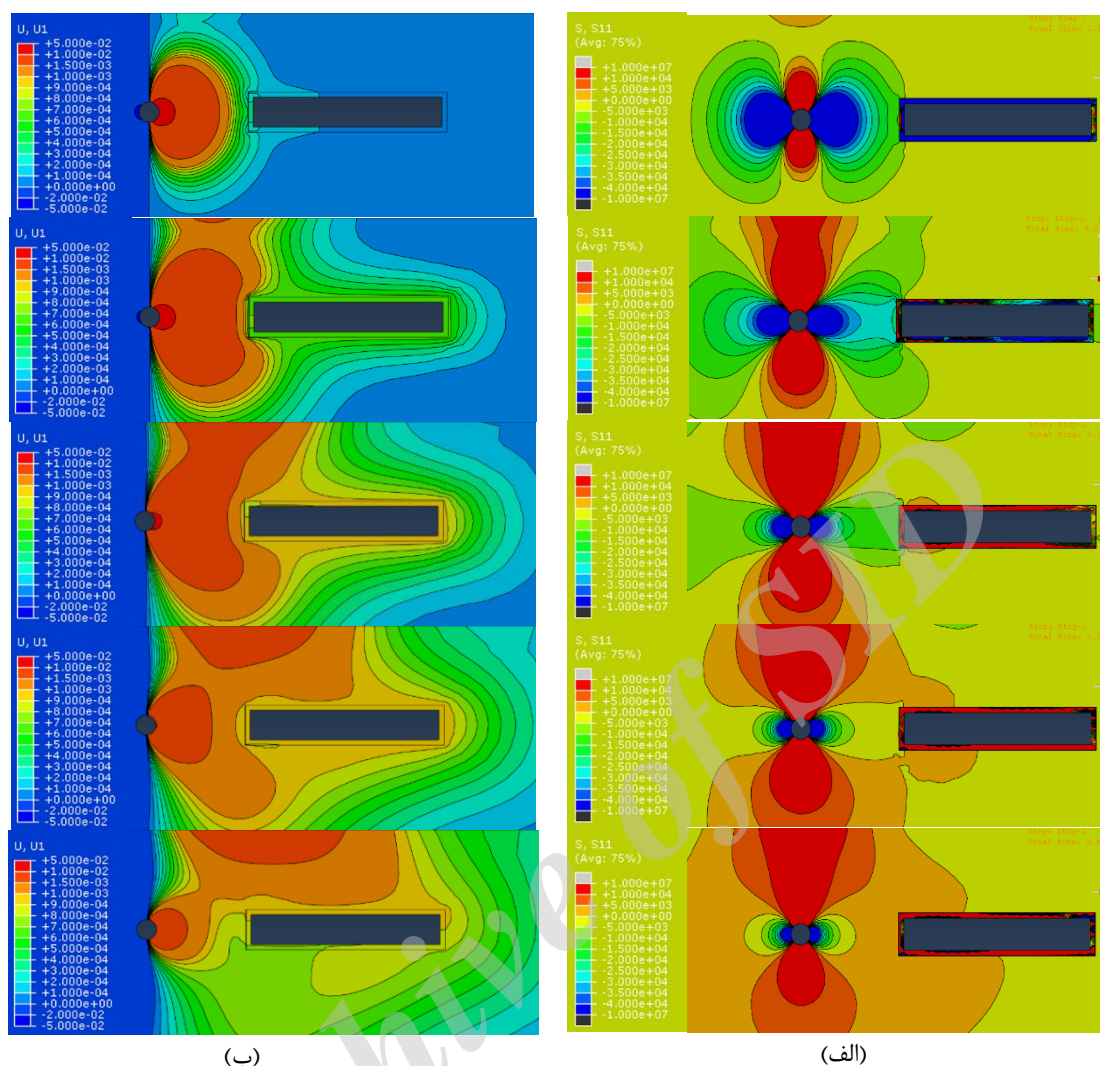
شکل ۳. مقایسه تنش میدان-آزاد در فاصله (R= ۹٫۸۱ m)



شکل ۴. تأثیر سازه پناهگاه بر میدان فشار موج (R= ۹٫۸۱ m)

سازه با بتن خیلی سخت (بتن ۲) همانند یک سازه صلب رفتار می‌کند. حداکثر فشار برای سازه صلب تقریباً ۱٫۶ برابر فشار میدان-آزاد است. این مقدار اندکی از ضریب پیشنهادشده توسط ۱-۸۵۵-۵ TM (یعنی ۱٫۵) بیشتر است و از مقدار نظری آن (یعنی ۲) کمتر است. کانتور تنش افقی و تغییر مکان افقی در زمان‌های مختلف برای سازه با بتن نوع (۱) در شکل (۵) ترسیم شده است.

جابه‌جایی وسط دیوار نسبت به تکیه‌گاه‌های آن بستگی به سختی دیوار و ضخامت آن دارد. اثر صلبیت دیوار با تغییر مصالح و ضخامت آن در سه حالت بررسی شده است: حالت (الف) ضخامت دیوار ۰٫۲۵ m و بتن نوع (۱). حالت (ب) ضخامت دیوار ۰٫۵ m و بتن نوع (۱). حالت (ج) ضخامت دیوار ۱ m و بتن نوع (۲). تغییر مکان افقی وسط دیوار برای این سه حالت در شکل (۶) نشان داده شده است. در این شکل نتایج مدل‌سازی حاضر با خط پر و نتایج یانگ با خط چین (رنگ مشابه) نشان داده شده است. مکان وقوع حداکثر تغییر مکان و روند کلی تغییر شکل در هر دو مدل یکسان است اما یانگ مقدار تغییر مکان بیشتری را گزارش کرده است. که با توجه به یکسان بودن فشار وارد بر دیوار



شکل ۵. کانتور متغیرهای مثال (۱) در بازه زمانی ۰٫۲ تا ۰٫۱ ثانیه (الف) تنش افقی (Pa) و (ب) تغییر مکان افقی (m)

### جدول ۳. پارامترهای معادله حالت JWL برای ماده منفجره TNT

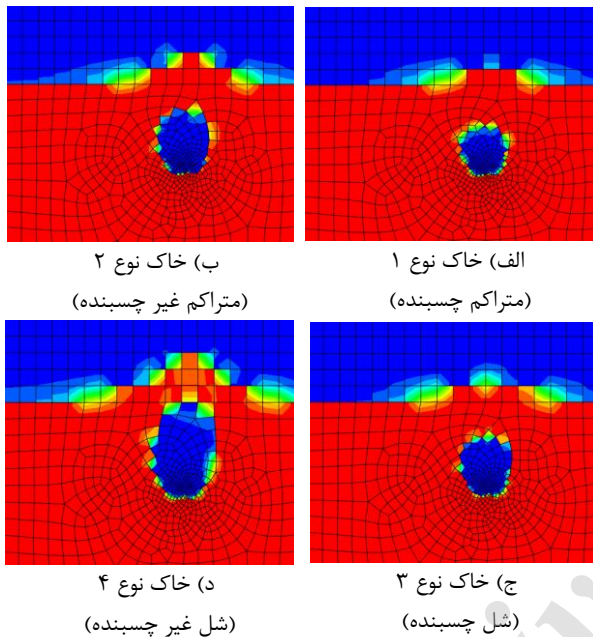
A (Pa)	B (Pa)	$\epsilon_0$ (J/kg)	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$V_{det}$ (m/s)
$3/788 \times 10^9$	$3/787 \times 10^9$	$3/6 \times 10^6$	۴/۱۵	۰٫۹	۰٫۳۵	۱۶۰۰	۵۹۰

ابعاد هندسه مدل مورد نظر در شکل (۷) مشخص شده است. عمق ماده منفجره ۵ متر است و فرض شده است که یک سنگ بستر در عمق ۱۲ متر نیز وجود دارد. نیمه سمت چپ مدل که ماده منفجره در آن واقع شده است با استفاده از رویکرد اولبری مدل شده است و پخش خاک و TNT پس از انفجار در آن قابل بررسی است (حوزه نزدیک) و نیمه سمت راست که تحت تأثیر این انفجار تغییر شکل می‌دهد با رویکرد لاگرانژی مدل شده است (حوزه دور). پاسخ حوزه دور در نقطه P که به فاصله ۱۰ متر از

خاک ماسه‌ای متراکم دارای مدول یانگ (سختی) و زاویه اصطکاک داخلی بیشتری نسبت به خاک ماسه‌ای شل است. خاک‌های تیپ (۱) و (۳) چسبندگی ندارند، درحالی‌که خاک‌های تیپ (۲) و (۴) مقداری چسبندگی به دلیل ریزدانه‌های رسی دارند. در این مدل اثرات میرایی ذاتی خاک به صورت تسلیم شدن خاک و ورود آن به ناحیه پلاستیک طبق مدل موه‌ر-کولمب در پاسخ‌ها دیده خواهد شد و برخلاف مثال (۱) از رفتار میرایی ویسکوز در استهلاک انرژی انفجار استفاده نشده است. یکی از اهداف حل این مثال یافتن ضریب کاهندگی و امپدانس آکوستیک برای تیپ خاک‌های مختلف است. پارامترهای معادله حالت JWL که برای ماده منفجره TNT استفاده شده است به شرح جدول (۳) است.

به منظور بررسی اثر جرم اولیه ماده منفجره بر رفتار خاک پیرامون و پاسخ میدان دور خاک، تمام مدل‌سازی‌ها با سه نوع جرم ماده منفجره متفاوت ۱۰، ۲۰ و ۴۰ کیلوگرم انجام گرفته است.

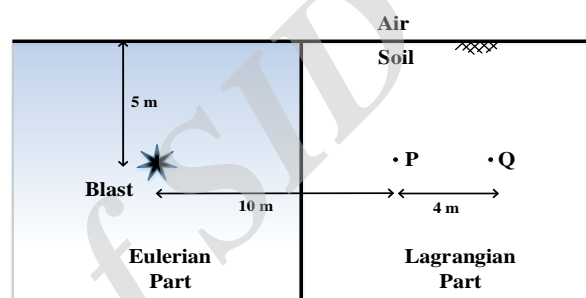
چسبندگی در انواع خاک‌ها است، یک نوع نیروی مقاوم در برابر از هم گسیختگی خاک محسوب می‌شود و انسجام خاک را در حین انفجار حفظ می‌کند. از طرفی ماسه‌های متراکم‌تر مدول یانگ و زاویه اصطکاک بیشتری دارند. مدول یانگ بالا باعث می‌شود که خاک تغییر شکل‌های کوچک‌تری بدهد و از طرفی زاویه اصطکاک بالا به معنای درگیری فیزیکی سنگدانه‌های ماسه باهم است که نیروی مقاوم در برابر انفجار ایجاد می‌کند.



شکل ۸. کانتور وضعیت خاک پس از ۱ ثانیه از شروع انفجار ۱۰ کیلوگرم TNT برای انواع خاک

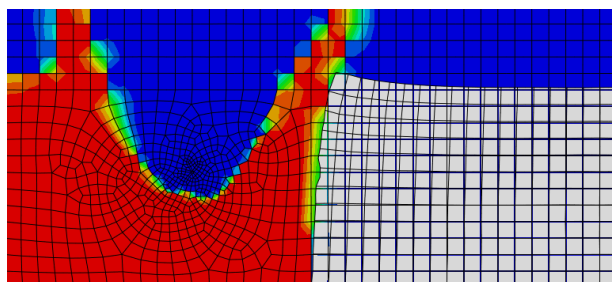
در ادامه مقدار ماده منفجره را ۲ برابر افزایش داده و به بررسی تغییرات در وضعیت خاک پس از انفجار پرداخته می‌شود. شکل (۹) کانتور وضعیت خاک را در زمان یک ثانیه پس از انفجار ۲۰ کیلوگرم ماده منفجره TNT نشان می‌دهد. با مقایسه اجمالی نمودارهای شکل‌های (۸) و (۹) می‌توان نتیجه گرفت که افزایش جرم اولیه ماده منفجره وضعیت از هم گسیختگی خاک را بغرنج‌تر کرده است و چسبندگی و اصطکاک داخلی سنگدانه‌های خاک توان کافی برای مقاومت در برابر انفجار را ندارند. در کانتورهای شکل (۹)، پس از اتمام انفجار صرفاً شاهد بالازدگی خاک در سطح زمین نیستید بلکه خاک کاملاً گسیخته شده و به اطراف پرتاب می‌شود و در نهایت گودالی در سطح زمین نمایان می‌شود. هر چه خاک شل‌تر و چسبندگی کمتر باشد، قطر این گودال بیشتر است. به طور مثال حداکثر قطر گودال در حالت (د) تقریباً برابر ۷ متر و حداقل قطر در حالت (الف) تقریباً برابر ۲٫۵ متر ایجاد شده است. شکل (۱۰) کانتور وضعیت خاک در زمان یک ثانیه پس از انفجار ۴۰ کیلوگرم ماده TNT را برای خاک شل نشان می‌دهد. در این شکل، تغییر شکل‌های بخش لاگرانژی مدل

نقطه انفجار در قسمت لاگرانژی واقع شده است، بررسی خواهد شد. نقطه P در مکانی واقع شده است که خاک در این ناحیه دچار گسیختگی شدید نمی‌شود و صرفاً فشاری ناشی از موج انفجار را تجربه می‌کند، از این جهت نام حوزه دور بر آن گذاشته شده است. طبیعتاً پاسخ حوزه دور خاک (بخش لاگرانژی) با پاسخ حوزه نزدیک آن (بخش اوپلری) نسبت به پدیده انفجار متفاوت خواهد بود. تعیین مرز بین ناحیه لاگرانژی و اوپلری کاملاً وابسته به شرایط خاک و ماده منفجره است. این مرز باید به گونه‌ای تعیین شود که اعوجاج شدید المان‌های لاگرانژی باعث توقف حل مسئله نشود.

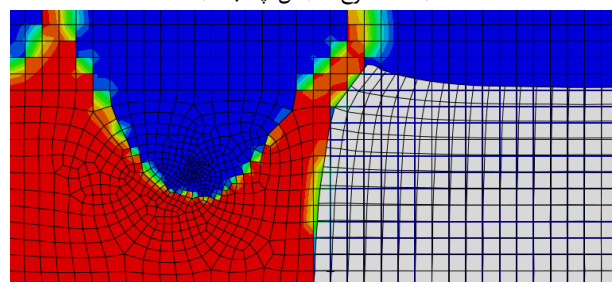


شکل ۷. ابعاد و هندسه مدل میدان آزاد مثال ۲

در ابتدا به بررسی تأثیر نوع خاک و جرم ماده منفجره بر پاسخ حوزه نزدیک پرداخته می‌شود و قطر و عمق گودال ایجادشده در خاک پس از انفجار TNT را در حالت‌های مختلف مقایسه می‌شود. در شکل (۸) کانتور وضعیت خاک در بخش اوپلری مدل، تحت انفجار ۱۰ کیلوگرم ماده TNT نشان داده شده است. تمام کانتورها وضعیت خاک را در زمان ۱ ثانیه پس از شروع انفجار نشان می‌دهند، چرا که در زمان ۱ ثانیه تقریباً وضعیت خاک به یک حالت پایدار می‌رسد و بعد از آن تغییر چندانی نمی‌کند. بخش‌های قرمز رنگ نواحی از مدل هستند که نسبت حجمی خاک در آن نقاط صد در صد بوده و نواحی آبی رنگ نواحی خالی از خاک هستند. به منظور اینکه حجم محاسبات را کاهش داده شود، از المان‌هایی به بعد ۱ متر برای مدل خود استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (۸) مشخص است، انفجار ماده منفجره در انواع خاک باعث ایجاد یک حفره تقریباً با قطر متوسط ۳ متر درون خاک و مقداری بالازدگی در سطح زمین شده است که میزان بالازدگی سطح زمین متفاوت است. با مقایسه نمودارهای شکل (۸) می‌توان نتیجه گرفت که در حالت کلی، هر چه خاک متراکم‌تر و چسبنده‌تر باشد، بالا زدگی سطح زمین (و متعاقباً حجم حفره ایجادشده درون زمین) کمتر است. به همین علت میزان بالازدگی سطح زمین در حالت (الف) حداقل (تقریباً برابر ۱ متر) و در حالت (د) حداکثر (تقریباً برابر ۳ متر) است. وجود ریزدانه‌های رسی درون خاک که علت اصلی ایجاد



شکل ۱۰ الف) خاک نوع ۳ (شل چسبنده)



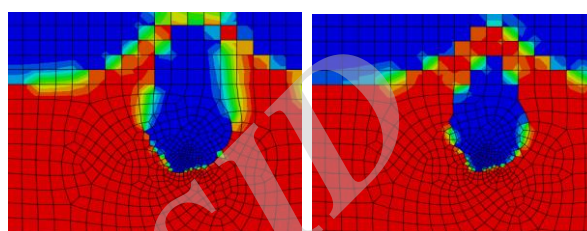
شکل ۱۰ ب) خاک نوع ۴ (شل غیر چسبنده)

شکل ۱۰. کانتور وضعیت خاک و تغییر شکل بخش لاگرانژی پس از ۱ ثانیه از شروع انفجار ۴۰ کیلوگرم TNT

شکل (۱۱) تغییرات زمانی مؤلفه افقی تنش خاک را در نقطه P به فاصله ۱۰ متر از نقطه انفجار و در نقطه Q به فاصله ۱۴ متر از نقطه انفجار برای خاک‌های مختلف و انفجار ۱۰ کیلوگرم TNT نشان می‌دهد. با بررسی این نمودارها می‌توان رفتار خاک‌های مختلف در برابر موج انفجار را بررسی کرد. اولین نکته قابل توجه در این نمودارها این است که وجود چسبندگی در خاک رفتار ماسه‌ای بدون چسبندگی و با چسبندگی متفاوتی با هم ندارند. اما تراکم خاک که وابسته به مدول یانگ و چگالی آن است در رفتار حوزه دور خاک در برابر موج انفجار کاملاً تأثیرگذار است. شکل (۱۱) واضح است که پاسخ دینامیکی خاک ماسه‌ای متراکم در مقایسه با خاک ماسه‌ای شل متفاوت است. اولین تفاوت بین خاک ماسه‌ای متراکم و شل در مقدار حداکثر دامنه موج ( $P_{max}$ ) است. حداکثر دامنه موج خاک متراکم ۰٫۶۲ MPa و حداکثر دامنه موج خاک شل ۰٫۵۲ MPa در نقطه P است. دامنه حداکثر موج در نقطه Q به ترتیب به مقادیر ۰٫۵ MPa در خاک متراکم و ۰٫۴۲ MPa در خاک شل کاهش می‌یابند. همان‌طور که در نمودارها دیده می‌شود، شکل موج ثابت می‌ماند و صرفاً دامنه آن با فاصله گرفتن از نقطه انفجار کاهش می‌یابد. بر اساس مقادیر حداکثر دامنه موج در نقاط P و Q می‌توان ضریب کاهندگی ( $n$ ) را برای دو نوع خاک ماسه‌ای متراکم و شل محاسبه نمود.

$$n = \frac{\log\left(\frac{P_1}{P_2}\right)}{\log\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} = \frac{\log\left(\frac{0.62}{0.5}\right)}{\log\left(\frac{14}{10}\right)} \approx \frac{\log\left(\frac{0.52}{0.42}\right)}{\log\left(\frac{14}{10}\right)} \approx 0.64$$

نیز نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است تغییر شکل‌های بزرگ در بخش لاگرانژی سبب اعوجاج شدید در برخی المان‌ها شده است و در نتیجه از این رویکرد نمی‌توان در نزدیکی ماده منفجره استفاده کرد. حتی در صورتی که مقدار ماده منفجره بیشتر از ۴۰ کیلوگرم باشد، احتمالاً بخش لاگرانژی مدل حاضر نیز دیگر جوابگو نباشد. نکته قابل توجه دیگر این است که حتی در انفجارهای شدید باز هم چسبندگی خاک، قطر گودال ایجادشده در سطح زمین را کنترل می‌کند، به طوری که قطر گودال در خاک چسبنده ۲ متر کمتر از خاک غیر چسبنده است.

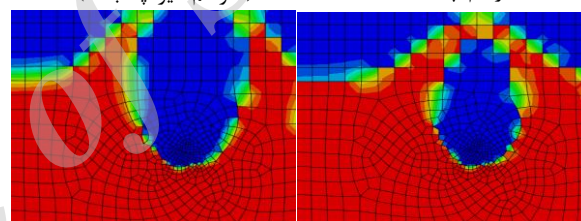


شکل ۹ الف) خاک نوع ۱

شکل ۹ ب) خاک نوع ۲

شکل ۹ ج) متراکم غیر چسبنده

شکل ۹ د) متراکم چسبنده



شکل ۹ د) خاک نوع ۴

شکل ۹ ج) خاک نوع ۳

شکل ۹ د) شل غیر چسبنده

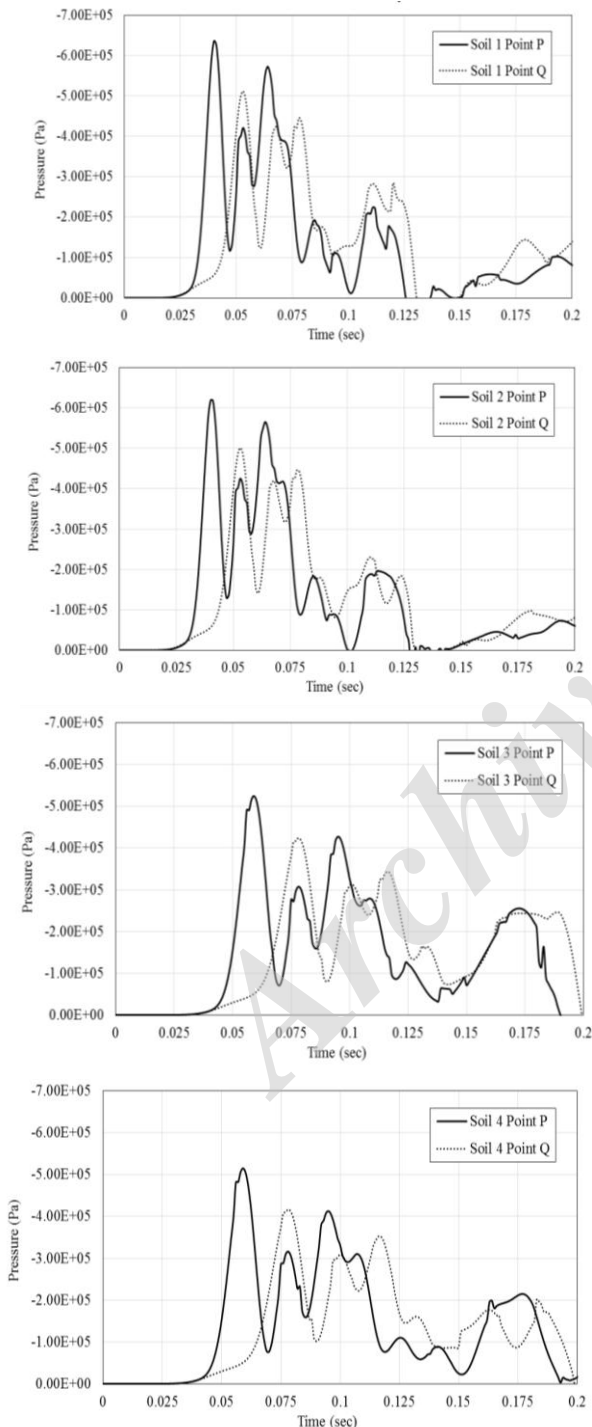
شکل ۹ ج) شل چسبنده

شکل ۹. کانتور وضعیت خاک پس از ۱ ثانیه از شروع انفجار ۲۰ کیلوگرم TNT برای انواع خاک

اکنون به بررسی موج فشار ناشی از انفجار ماده منفجره مدفون در نقاطی دورتر از ناحیه گسیختگی خاک پرداخته می‌شود تا بعداً بتوان اثر فشار حوزه دور انفجار را بر سازه‌های مدفون مانند مخازن آب بررسی کرد. موج فشار ناشی از پدیده انفجار مدفون سه ویژگی اصلی دارد: (۱) دامنه حداکثر موج (متناسب با امپدانس خاک)، (۲) میرایی دامنه موج (متناسب با ضریب کاهندگی) و (۳) سرعت انتشار موج فشاری. هر سه ویژگی تابعی از محیط انتقال موج انفجار (خاک) و ماده منفجره است. در این مدل به بررسی این سه ویژگی برای خاک‌های مختلف پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که رفتار خاک با مدل موهر-کولمب در تمام شبیه‌سازی‌ها لحاظ شده است و طبیعتاً برخی از این سه ویژگی‌ها نه تنها به پارامترهای الاستیک خاک (مانند مدول یانگ و چگالی) بلکه به پارامترهای گسیختگی خاک (مانند زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی) نیز وابسته است. مثلاً در صورتی که خاک کاملاً الاستیک مدل شود، در دامنه موج میرایی مشاهده نخواهد شد.



است. مقدار ضریب کاهندگی برای انفجار ۴۰ کیلوگرم ماده منفجره TNT نیز تقریباً برابر ۰٫۹۱ به دست می‌آید. پس می‌توان نتیجه گرفت ضریب کاهندگی دامنه موج با افزایش جرم ماده منفجره افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱. تاریخچه زمانی فشار در نقاط P و Q برای خاک‌های مختلف تحت انفجار ۱۰ کیلوگرم TNT

محاسبات نشان می‌دهد که مقدار ضریب کاهندگی دامنه موج به متراکم یا شل بودن خاک وابسته نبوده و برای انواع خاک تقریباً برابر ۰٫۶۴ است. در مدل‌سازی حاضر وجود حفرات داخل خاک و تغییر شکل‌های ناشی از فاز هوای درون خاک که عامل اصلی ایجاد میرایی و استهلاک انرژی موج انفجار در خاک‌های دامنه‌ای است، در نظر گرفته نشده است. بنابراین مقادیر به دست آمده برای ضریب کاهندگی با مقادیر تجربی آیین‌نامه متفاوت است. ذکر این نکته لازم است که عامل اصلی استهلاک انرژی در این مثال ورود مصالح خاک به ناحیه پلاستیک و وقوع تغییر شکل‌های برگشت‌ناپذیر در خاک است. این سازوکار در حوزه نزدیک ماده منفجره اتفاق می‌افتد و در حوزه دور، خاک در ناحیه الاستیک خود باقی می‌ماند و در نتیجه استهلاک انرژی قابل توجهی در حوزه دور اتفاق نمی‌افتد. در ضمن مدل حاضر یک مسئله انتشار موج دو بعدی است و طبیعتاً در انتشار موج سه بعدی مقدار ضریب کاهندگی بیشتری مشاهده خواهد شد. سرعت انتشار موج انفجار پارامتر دیگری است که از نمودارهای شکل (۱۱) قابل استخراج است. سرعت انتشار موج به مدول یانگ و چگالی خاک وابسته است و قاعدتاً در خاک‌های متراکم‌تر، بیشتر است. سرعت انتشار موج با بررسی زمان رسیدن جبهه موج به نقطه P محاسبه می‌شود که برای خاک متراکم تقریباً برابر ۲۵۰ متر بر ثانیه و برای خاک شل برابر ۱۶۶ متر بر ثانیه است. که با سرعت موج طولی در خاک الاستیک قابل مقایسه است. نکته دیگر که با بررسی شکل (۱۱) حاصل می‌شود این است که تعداد نوسانات فشار موج قبل از اینکه کاملاً در محیط میرا شود، در خاک متراکم بیشتر از خاک شل است. البته باید دقت نمود که وجود برخی قله‌ها در نمودار تاریخچه زمانی فشار به دلیل انعکاس موج از سطح زمین یا بستر سنگی است.

شکل (۱۲) تغییرات زمانی مؤلفه افقی تنش در خاک را در نقطه P به فاصله ۱۰ متر از نقطه انفجار و نقطه Q به فاصله ۱۴ متر از نقطه انفجار برای خاک‌های مختلف و انفجار ۲۰ کیلوگرم TNT نشان می‌دهد. طبیعتاً با افزایش مقدار ماده منفجره، دامنه حداکثر موج افزایش می‌یابد.

در انفجار ۲۰ کیلوگرم TNT حداکثر فشار خاک در نقطه P برای خاک متراکم و شل به ترتیب برابر ۱٫۰۱ MPa و ۰٫۸۱ MPa بوده و در نقطه Q به ترتیب برابر ۰٫۷۸ MPa و ۰٫۶۲ MPa است. در ابتدا ضریب کاهندگی خاک متراکم و شل را با استفاده از نمودارهای شکل (۱۲) دوباره محاسبه می‌شود که این بار ضریب کاهندگی تقریباً برابر ۰٫۷۸ برای هر دو خاک به دست می‌آید. در نتیجه می‌توان نتیجه گرفت که ضریب کاهندگی تابع بارگذاری

شکل های (۱۴) و (۱۵) تاریخچه مؤلفه افقی تنش خاک را در نقطه P واقع بر دیواره سمت چپ مخزن برای انفجار (به ترتیب) ۱۰ کیلوگرم TNT و ۲۰ کیلوگرم TNT برای دو نوع خاک ماسه ای متراکم و شل نشان می دهند. دیوار سمت چپ مخزن، ۱۰ متر از نقطه انفجار فاصله دارد. با مقایسه حداکثر فشار در این نقطه با حداکثر فشار میدان آزاد که قبلاً محاسبه شد، می توان ضریب افزایشی موج انفجار را به دست آورد.

مقدار ضریب افزایشی بار انفجار با توجه به نتایج حاصل از شکل های (۱۴) و (۱۵) محاسبه و در جدول (۴) جمع بندی شده است. این ضریب در واقع به صورت نسبت فشار حداکثر نقطه P در صورتی که سازه وجود داشته باشد به فشار همان نقطه زمانی که سازه وجود ندارد، تعریف می شود.

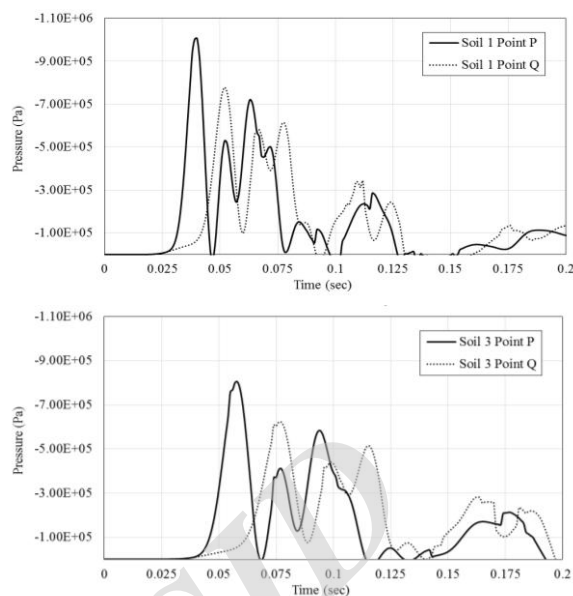
بر اساس روابط نظری، این ضریب همواره بزرگ تر از یک است و در حالتی که سازه کاملاً صلب باشد به مقدار ۲ میل می کند. اما در حالت کلی این ضریب تابع اختلاف امپدانس (چگالی در سرعت موج) مصالح خاک و سازه است. هر چه این اختلاف بیشتر باشد، مقدار این ضریب بیشتر خواهد بود. امیدانس خاک های متراکم همواره بیشتر از خاک های شل است. از آنجایی که امپدانس بتن از هر دو خاک بیشتر است (تقریباً صلب)، بنابراین ضریب افزایشی دامنه موج باید در خاک های شل بیشتر از خاک های متراکم باشد. این قضیه موجب می شود که در حالت میدان آزاد فشار موج در خاک متراکم بیشتر از خاک شل باشد، اما در حالتی که سازه دارید پاسخ خاک متراکم و شل تقریباً برابر هم می شود.

نتیجه دیگری که از بررسی نتایج جدول (۴) استنتاج می شود این است که ضریب افزایشی تابعی از نوع بارگذاری هم است و هر چه شدت انفجار بیشتر باشد این ضریب کمتر خواهد بود اما دامنه تغییرات آن بین ۱ تا ۱٫۴ است. بنابراین استفاده از فرض آیین نامه برای بارگذاری این نوع سازه ها که کاملاً صلب نیستند، محافظه کارانه و در جهت اطمینان است.

جدول ۴. مقدار ضریب افزایشی موج انفجار در مثال ۲

جرم ماده منفجره	نوع خاک	فشار میدان آزاد (MPa)	فشار نهایی (MPa)	ضریب افزایشی
۱۰ کیلوگرم	متراکم	۰٫۶۲	۰٫۶۹	۱٫۱۱
۱۰ کیلوگرم	شل	۰٫۵۲	۰٫۷۲	۱٫۳۸
۲۰ کیلوگرم	متراکم	۱٫۰۱	۱٫۰۴	۱٫۰۳
۲۰ کیلوگرم	شل	۰٫۸۱	۰٫۹۳	۱٫۱۵

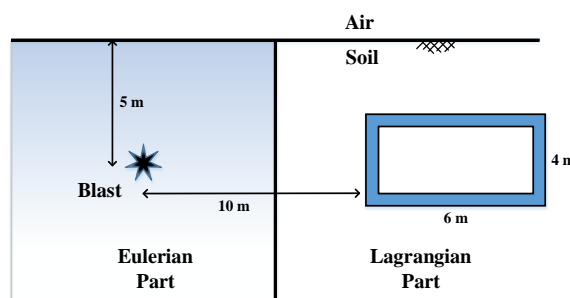
مقدار جابه جایی افقی مخزن در زمان برای دو نوع خاک مختلف (متراکم و شل) و به ازای جرم های مختلف ماده منفجره (۱۰ کیلوگرم و ۲۰ کیلوگرم) در شکل (۱۶) نشان داده شده است.



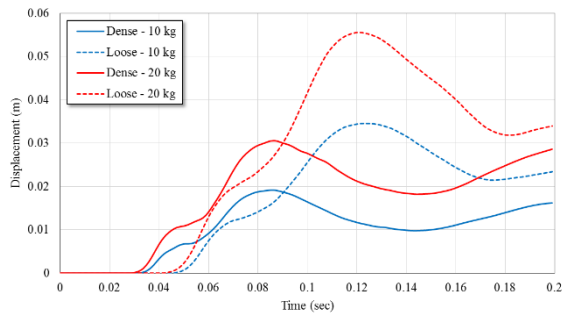
شکل ۱۲. تاریخچه زمانی فشار در نقاط P و Q برای خاک های مختلف تحت انفجار ۲۰ کیلوگرم TNT

### ۳-۲-۲. بررسی اثر انفجار TNT بر مخزن مدفون

در این بخش مسئله انفجار TNT مدفون در کنار یک سازه مدفون و پاسخ این سازه و خاک به انفجار بررسی خواهد شد. ابعاد و هندسه مدل در شکل (۱۳) نشان داده شده است. سازه مدفون یک مخزن به قطر ۶ متر، ارتفاع ۴ متر و ضخامت دیواره و سقف برابر ۰٫۲ متر است که از بتن ساخته شده است. این سازه با رویکرد لاگرانژی به مدل افزوده شده است و اندرکنش آن با خاک اطرافش با ضریب اصطکاک ۰٫۵ لحاظ شده است. مدول یانگ بتن برابر ۲۶ GPa، ضریب پواسون برابر ۰٫۲۱ و چگالی آن برابر ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. به دلیل اینکه مدول یانگ و سختی سازه در مقابل خاک اطراف آن بسیار زیاد است، موج انفجار در برخورد به سازه بازتابیده می شود و مقدار فشار وارد بر سازه (مجموع موج عبوری و موج بازتابیده) از فشار میدان آزاد آن نقطه بیشتر است. این افزایش دامنه موج در آیین نامه ها با یک ضریب افزایشی برابر ۱٫۵ لحاظ می شود. در این بخش مقدار ضریب افزایشی موج انفجار و پارامترهایی از خاک و سازه که بر آن مؤثر هستند، بررسی خواهد شد.



شکل ۱۳. ابعاد و هندسه مخزن در مثال ۲



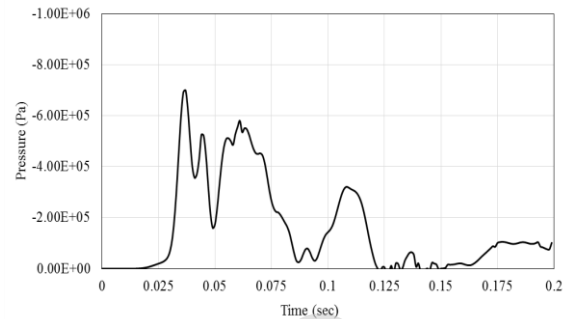
شکل ۱۶. تاریخچه زمانی جابه‌جایی افقی مخزن مدفون برای دو نوع خاک متفاوت و جرم ماده منفجره مختلف

حداکثر جابه‌جایی در حالت خاک شل و انفجار ۲۰ کیلوگرم ماده منفجره و حداقل جابه‌جایی در حالت خاک متراکم و ۱۰ کیلوگرم ماده منفجره اتفاق می‌افتد. به ازای جرم اولیه یکسان از ماده منفجره، مقدار فشار وارد بر مخزن در دو نوع خاک تقریباً با هم برابر است، اما با توجه به شکل (۱۶)، جابه‌جایی مخزن در خاک شل بیشتر است که علت اصلی آن کمتر بودن سختی خاک شل است. با افزایش دو برابری مقدار ماده منفجره، فشار وارد بر سازه (در هر دو نوع خاک) تقریباً ۱٫۴۳ برابر می‌شود اما حداکثر تغییر مکان سازه تقریباً (در هر دو نوع خاک) ۱٫۶ برابر می‌شود. بنابراین رابطه بین فشار وارد بر سازه و تغییر مکان سازه خطی ناست. نکته قابل توجه دیگر این است که خاک شل دیرتر به انفجار ماده منفجره پاسخ داده است که علت آن اختلاف سرعت موج انفجار در خاک متراکم و شل است.

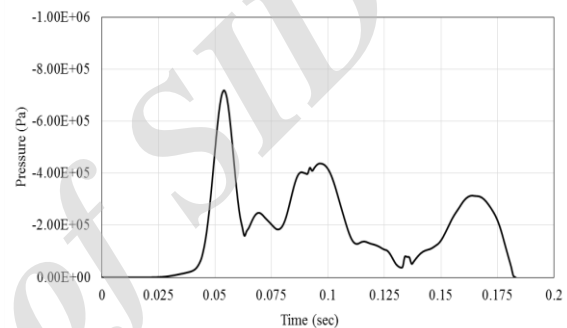
#### ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به مدل‌سازی عددی پدیده انفجار مدفون و بررسی پاسخ خاک و سازه مدفون به این انفجار پرداخته شد. به منظور مدل‌سازی پدیده انفجار از روش همبسته اویلری-لاگرانژی استفاده شد. منطقه نزدیک محل انفجار با رویکرد اویلری به منظور تحلیل پاسخ حوزه نزدیک انفجار، گودال ناشی از انفجار مدل شده است و رویکرد لاگرانژی برای تحلیل پاسخ حوزه دور انفجار، فشار وارد بر سازه مدفون مورد استفاده قرار گرفته است. پس از ساختن مدل عددی، اثر پارامترهای مختلف مانند جرم ماده منفجره، چگالی خاک، مدول یانگ خاک، زاویه اصطکاک داخلی خاک، چسبندگی خاک و هندسه و جنس سازه مدفون بر پاسخ محیط و سازه به انفجار مدفون بررسی شد. حجم و قطر گودال ایجادشده درون زمین ناشی از انفجار، هر چه خاک متراکم‌تر و چسبنده‌تر باشد، کمتر است. وجود ریزدانه‌های رسی درون خاک که علت اصلی ایجاد چسبندگی در انواع خاک‌ها است، یک نوع نیروی مقاوم در برابر از هم گسیختگی خاک محسوب می‌شود و انسجام خاک را در حین انفجار حفظ می‌کند.

تاریخچه زمانی جابه‌جایی به مقدار فشار وارد بر مخزن، سختی خاک و جرم مخزن وابسته است.

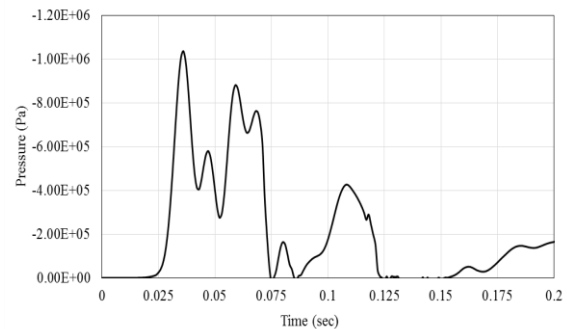


الف) خاک متراکم ( $P_{max} = 0.69 \text{ MPa}$ )

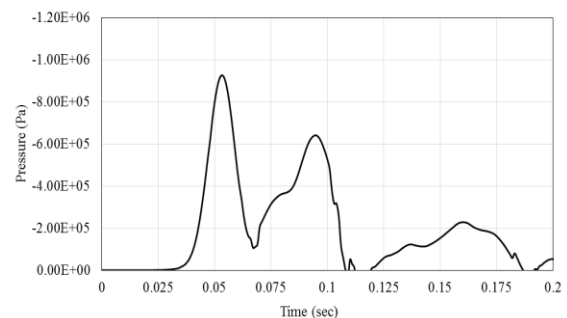


ب) خاک شل ( $P_{max} = 0.72 \text{ MPa}$ )

شکل ۱۴. تاریخچه زمانی فشار وارد بر دیوار سمت چپ مخزن در انفجار ۱۰ کیلوگرم TNT



الف) خاک متراکم ( $P_{max} = 1.04 \text{ MPa}$ )



ب) خاک شل ( $P_{max} = 0.93 \text{ MPa}$ )

شکل ۱۵. تاریخچه زمانی فشار وارد بر دیوار سمت چپ مخزن در انفجار ۲۰ کیلوگرم TNT

پلاستیک مواد به تنهایی نمی تواند پدیده استهلاک انرژی به ویژه در حوزه دور انفجار را مدل کند. به منظور مدل نمودن دقیق تر رفتار خاک در برابر پدیده انفجار استفاده از مدل های چند فازی محیط متخلخل توصیه می شود.

## ۵. مراجع ها

- [1] Chen, H. L.; Shah, S. P.; Keer, L. M. "Dynamic Response of Shallow-Buried Cylindrical Structures"; J. Eng. Mech. ASCE. 1990, 116, 152-171.
- [2] Yang, Z. "Finite Element Simulation of Response of Buried Shelters to Blast Loadings"; Finite Elem. Anal. Des. 1997, 24, 113-132.
- [3] Wang, Z.; Lu, Y. "Numerical Analysis on Dynamic Deformation Mechanism of Soils under Blast Loading"; Soil Dyn. Earthq. Eng. 2003, 23, 705-714.
- [4] Gui, M.; Chein, M. "Blast-resistant Analysis for a Tunnel Passing beneath Tapei Shongsan Airport- A Parametric Study"; Geotech. Geol. Eng. 2004, 24, 227-248.
- [5] Lu, Y.; Wang, Z.; Chong, K. "A Comparative Study of Buried Structure in Soil Subjected to Blast Load using 2D and 3D Numerical Simulations"; Soil Dyn. Earthq. Eng. 2005, 25, 275-288.
- [6] Yankelevsky, D.; Feldgun, V.; Karinski, Y. "Underground Explosion of a Cylindrical Charge Near a Buried Wall"; Int. J. Impact Eng. 2008, 35, 905-919.
- [7] Ma, G.; Zhou, H.; Lu, Y.; Chong, K. "In-Structure Shock of Underground Structures: A Theoretical Approach"; Eng. Struct. 2010, 32, 3836-3844.
- [8] Chen, H.; Xia, Z.; Zhou, J.; Fan, H.; Jin, F. "Dynamic Responses of Underground Arch Structures Subjected to Conventional Blast Loads: Curvature Effects"; Arch. Civil Mech. Eng. 2013, 13, 322-333.
- [9] Jayasinghe, L.; Thambiratnam, D.; Perera, N.; Jayasooriya, J. "Computer Simulation of Underground Blast Response of Pile in Saturated Soil"; Comput. Struct. 2013, 120, 86-95.
- [10] Chen, H.; Zhou, J.; Fan, H.; Jin, F.; Xu, Y.; Qiu, Y.; Wang, P.; Xie, W. "Dynamic Responses of Buried Arch Structure Subjected to Subsurface Localized Impulsive Loading: Experimental Study"; Int. J. Impact Eng. 2014, 65, 89-101.
- [11] Kumar, M.; Geol, M. D.; Matsagar, V. A.; Rao, K. S. "Response of Semi-buried Structures Subjected to Multiple Blast Loading Considering Soil-Structure Interaction"; Indian Geotech. J. 2015, 45, 243-253.
- [12] Chen, H.; Xie, W.; Jiang, M.; Wang, P.; Zhou, J.; Fan, H.; Zheng, Q. "Blast-loaded Behaviors of Severely Damaged Buried Arch Repaired by Anchored CFRP Strips"; Compos. Struct. 2015, 122, 92-103.

از طرفی ماسه های متراکم تر مدول یانگ و زاویه اصطکاک بیشتری دارند. مدول یانگ بالا باعث می شود که خاک تغییر شکل های کوچک تری بدهد و از طرفی زاویه اصطکاک بالا به معنای درگیری فیزیکی سنگدانه های ماسه باهم است که نیروی مقاوم در برابر انفجار ایجاد می کند. افزایش جرم اولیه ماده منفجره وضعیت از هم گسیختگی خاک را به حدی بغرنج کند که چسبندگی و اصطکاک داخلی سنگدانه های خاک توان کافی برای مقاومت در برابر انفجار را نداشته باشند. اما در انفجارهای شدید هم چسبندگی خاک، قطر گودال را کنترل می کند. وجود چسبندگی در خاک رفتار حوزه دور آن را دچار تغییر نمی کند. اما تراکم خاک که وابسته به مدول یانگ و چگالی آن است در رفتار حوزه دور خاک در برابر موج انفجار کاملاً تأثیرگذار است. فشار میدان آزاد موج انفجار در خاک های متراکم بیشتر از خاک های شل به دست آمد. محاسبات نشان می دهد که مقدار ضریب کاهندگی دامنه موج به متراکم یا شل بودن خاک وابسته ناست، اما با افزایش جرم ماده منفجره افزایش می یابد. سرعت انتشار موج به مدول یانگ و چگالی خاک وابسته است و قاعدتاً در خاک های متراکم تر بیشتر است. در حالتی که سازه کاملاً صلب باشد ضریب بازتاب موج به مقدار ۲ میل می کند. اما در حالت کلی این ضریب تابع اختلاف امپدانس مصالح خاک و سازه است. هر چه این اختلاف بیشتر باشد، مقدار این ضریب بیشتر خواهد بود. امپدانس خاک های متراکم همواره بیشتر از خاک های شل است. از آنجایی که امپدانس بتن از هر دو خاک بیشتر است (تقریباً صلب)، بنابراین ضریب بازتاب دامنه موج باید در خاک های شل بیشتر از خاک های متراکم باشد. ضریب بازتاب تابعی از نوع بارگذاری هم است و دامنه تغییرات آن تقریباً بین ۱ تا ۱/۴ است. تغییر شکل های بزرگ و ایجاد اعوجاج شدید المان ها در روش اجزاء محدود لاگرانژی محاسبات را متوقف می کند و همین قضیه باعث می شود که این روش صرفاً در بررسی رفتار حوزه دور انفجار مدفون کاربرد داشته باشد. در نظر گرفتن میرایی ذاتی خاک با مدل ویسکوالاستیک می تواند سازوکار استهلاک انرژی در پدیده انفجار را که به دلیل وجود حفرات داخل خاک و تغییر شکل های ناشی از فاز هوای درون خاک است، به درستی مدل کند. در نظر گرفتن میرایی ناشی از رفتار