

H. Moghtadaei

Department of Civil
Engineering, University of
Qom.

e-mail:
H.Moghtadaee@gmail.com

M. Khodaparast*

Professor, Department of Civil
Engineering, University of
Qom.

e-mail:
Khodaparast@qom.ac.ir

**Effect of Explosive Load on the Depth Required
for Geotechnical Identification**

The depths required for drilling in different types of soil vary according to the type of load applied. The possibility of dynamic loading from a blast during a military or terrorist attack or by exploding gas pipelines, along with other types of loading, is essential for the construction of safe structures. It is necessary to consider dynamic loading from a possible explosion when determining the depth of the boreholes. The present study numerically modeled sandy and clay soils under dry and saturated conditions that experience 50 to 300 kg of TNT explosive loading on the surface and at a depth of four meters from the soil surface. For this purpose, Abacus software, Eulerian-Lagrangian coupling, and three-dimensional nonlinear dynamic analysis using the finite element method have been used. Case studies were examined by initially determining the net vertical stress created in the soil under the blast load then, after obtaining the range of impact of the blast for each case, the percentage of increase in the borehole depth was calculated by considering the effect of the blast load. The values calculated for sandy soil was 5% to 92.5%, for clay soil was 7.5% to 185%, for saturated sandy soil was 2.5% to 179% and for saturated clay soil was 4.5% to 113%.

Keywords: Blast, Vertical stress, Borehole depth, Coupled eulerian-lagrangian approach

* Corresponding author

Received 06 November 2021, Revised 28 December 2021, Accepted 17 January 2022.

DOI: 10.22091/cer.2022.7558.1323

بررسی تأثیر بار انفجار بر مقدار عمق لازم در شناسایی‌های ژئوتکنیکی

عمق لازم برای گمانه در خاک‌های مختلف و با توجه به نوع بار اعمال شده متفاوت می‌باشد. در نظر گرفتن بار دینامیکی انفجار به همراه دیگر بارهای وارده با توجه به احتمال گسترش روزافزون حملات نظامی، انفجار خطوط انتقال گاز و غیره از نیازهای ضروری در احداث سازه‌های امن است. بنابراین در نظر گرفتن بار دینامیکی مربوط به انفجار احتمالی در تعیین عمق گمانه‌ها ضروری به نظر می‌رسد. به همین منظور در این پژوهش مدل‌سازی عددی دو نوع خاک ماسه‌ای و رسی در شرایط خشک و اشباع با در نظر گرفتن ماده منفجره تیانتی به جرم‌های ۵۰ تا ۳۰۰ کیلوگرم جهت اعمال بار انفجار در سطح و در عمق چهار متری از سطح خاک انجام شده است. برای این منظور از نرم‌افزار آباکوس و روش کوپل اولبری- لاگرانژی و تحلیل سه بعدی دینامیکی غیرخطی به روش اجزای محدود، استفاده گردید. در این خصوص برای یک مطالعه موردی ابتدا مقادیر تنش‌های قائم خالص ایجاد شده در خاک تحت بار انفجار تعیین شده و سپس ضمن به دست آوردن محدوده تأثیر انفجار در هریک از حالت‌های فوق‌الذکر، درصد افزایش عمق گمانه‌ها با در نظر گرفتن اثر بار انفجار محاسبه گردید. مقادیر محاسبه شده برای خاک ماسه‌ای از ۵ تا ۹۲/۵، برای خاک رسی از ۷/۵ تا ۱۸۵، برای خاک ماسه‌ای اشباع از ۲/۵ تا ۱۷۹ و برای خاک رسی اشباع از ۴/۵ تا ۱۱۳ درصد متغیر بودند.

واژگان کلیدی: انفجار، تنش قائم، عمق گمانه، روش کوپل اولبری- لاگرانژی.

حسین مقتدائی

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه قم.

پست الکترونیک:

H.Moghtadaee@gmail.com

مهدی خداپرست*

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه قم.

پست الکترونیک:

Khodaparast@qom.ac.ir

۱- مقدمه

وسایل نقلیه‌ای مانند ون، سدان، کامیون و غیره بدون جلب توجه تا ۱۸۰۰ کیلوگرم گزارش شده است [۲]. با گسترش سلاح‌های نفوذکننده نیز با جرم‌های مختلف به هر عمقی، اهداف ژئوتکنیکی (به مانند باند فرودگاه، پایه‌های بندری، پناهگاه‌های عمیق و غیره) در هر عمقی از زمین در معرض خسارت ناشی از انفجار قرار دارند [۳]. به همین منظور لحاظ کردن تنش‌های ناشی از بار دینامیکی انفجار در خاک بسیار حائز اهمیت بوده و چه بسا این تنش‌ها موجب بروز مشکلات ژئوتکنیکی از جمله نشست‌های بیش از حد، روانگرایی موضعی و کلی در خاک‌های دانه‌ای و غیره شود. در سال‌های اخیر موضوع

با توجه به احتمال گسترش روزافزون حملات نظامی و تروریستی، انفجار خطوط انتقال گاز و غیره در نظر گرفتن بار دینامیکی انفجار در مطالعات و طراحی پروژه‌های عمرانی مهم و ضروری می‌باشد. در بسیاری از حملات تروریستی مواد منفجره در منهول‌ها و سایر زیرساخت‌های زیرزمینی قرار داده می‌شود [۱]. در برخی موارد مقدار ماده منفجره قابل حمل توسط انسان با

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۰۸/۱۵، بازنگری ۱۴۰۰/۱۰/۰۷، پذیرش ۱۴۰۰/۱۰/۲۷.

(DOI): 10.22091/cer.2022.7558.1323 شناسه دیجیتال

افزایش آن می‌شود، به طوری که در خاک با درصد هوای چهار درصد، کاهش فشار حداکثر ۵۰۰ برابر خاک اشباع می‌باشد. همچنین زمانی که درصد هوا در خاک افزایش یابد، درجه اشباع خاک کاهش پیدا می‌کند و این افزایش درصد هوا موجب کاهش سریع‌تر حداکثر فشار با گذشت زمان و دور شدن از محل انفجار می‌شود [۷]. محققان دیگری در پژوهش خود به بررسی تأثیر توزیع اندازه ذرات بر روی مشخصات فشار انفجار در خاک اشباع شده پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد، هیچ تفاوت اساسی در مکانیزم بارگذاری بین خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده وجود نداشته و تنوع در بارگذاری، بطور کل مرتبط با توزیع اندازه ذرات خاک اطراف می‌باشد [۸]. ادیبی و همکاران در پژوهشی به بررسی پارامتریک اثرات انفجارهای سطحی بر روی خطوط لوله گاز پرفشار پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش عمق مدفون لوله از ۱/۴ تا ۲/۲ متر، تغییر شکل لوله در حدود ۷۱ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با تجزیه و تحلیل پروفیل‌های تغییر شکل لوله مشخص شد که با انفجار یک جرم ثابت ماده منفجره، عمق مدفون تأثیر بیشتری نسبت به ضخامت لوله در کاهش تغییر شکل خطوط لوله دارد [۹]. در پژوهشی دیگر، با مدل‌سازی شمع فولادی توخالی در خاک ماسه‌ای به روش کوپل اویلری- لاگرانژی (CEL^۵) و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس به بررسی تغییر شکل شمع، حداکثر سرعت ذرات خاک و همچنین تنش‌های بوجود آمده تحت بار انفجار در خاک ماسه‌ای پرداخته شد [۱۰]. لیو^۶ با مدل‌سازی انفجار در داخل خاک اشباع ماسه‌ای به روش صریح^۷ و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس به بررسی حالت‌های آسیب و تخریب تونل‌های مترو چدنی و همچنین بررسی تأثیر چندین پارامتر مهم بر روی اندرکنش ساختار دینامیکی خاک و خرابی لاینینگ تونل پرداخت [۱۱]. محققان با

انفجار در مسائل ژئوتکنیکی، مورد توجه محققین قرار گرفته است. چارلی^۱ و همکاران در پژوهشی به بررسی اثر انفجارهای هسته‌ای و شیمیایی زیرزمینی در افزایش فشار آب حفره‌ای موجود در خاک پرداختند [۴]. ما^۲ و همکاران در تحقیق خود مدل‌سازی انتشار امواج ناشی از انفجار زیرزمینی را انجام دادند. در این پژوهش دو سطح انرژی، جهت آسیب غیرقابل برگشت و تغییر شکل‌های دائمی ناشی از شکل‌پذیری در نظر گرفته شد. در این پژوهش که با استفاده از نرم‌افزار اتوداین^۳ و مدل پیشنهادی انتشار موج شوک در توده سنگ بوسیله یک انفجار زیرزمینی انجام گرفت، نتایج عددی به دست آمده بطور مطلوبی با نتایج به دست آمده از آزمایش صحرائی انجام شده، مطابقت داشت. این نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی می‌تواند برای پیش‌بینی ناحیه خسارت دیده، ناحیه پلاستیک و حرکات زمینی تولید شده بوسیله انفجارهای زیرزمینی، استفاده شود [۵]. بررسی عددی مکانیزم تغییر شکل دینامیکی خاک‌ها تحت بار انفجار، موضوع پژوهش وانگ و لو^۴ بود که در آن یک مدل سه‌فازی برای بارگذاری دینامیکی جهت ساده‌سازی یک شبیه‌سازی کامل انفجار و متعاقب آن انتشار امواج تنش در خاک‌ها استفاده شد. در این پژوهش مکانیزم تغییر شکل خاک‌ها تحت بارگذاری انفجار مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت [۶]. در پژوهش دیگری، مدل سه‌فازی جدیدی برای خاک ارائه گردید که در آن به بررسی اثر وجود آب بر پارامترهای موج تنش انفجار پرداخته شد. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل سه‌فازی جهت بررسی گسترش خرابی در اطراف محل انفجار، مقدار پارامترهای موج تنش و پارامترهای کاهش می‌باشد. علاوه بر این، نتایج به دست آمده نشان داد که وجود هوا باعث کاهش شدت گسترش موج انفجار و وجود آب باعث

¹- Charlie

²- G. W. Ma

³- Autodyn

⁴- Wang & Lu

⁵- Coupled Eulerian Lagrangian

⁶- Liu

⁷- Explicit

اشباع و خاک رسی در شرایط خشک $28 \times 28 \times 18$ متر و برای خاک رسی در شرایط اشباع به علت گسترش موج انفجار در فواصل بیشتری از خاک و در نظر گرفتن عدم انعکاس موج از مرزهای مدل به داخل خاک (بررسی تنها یک موج پیشرونده) به ابعاد $40 \times 40 \times 22$ متر در نظر گرفته شده است. در بخش ۳-۲ نحوه به دست آوردن ابعاد مناسب مدل سه بعدی خاک آورده شده است. در شکل ۱ فضای خاک و فضای اوپلری، ماده منفجره و همچنین شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای مدل نشان داده شده است. انتهای مدل (پایین ترین تراز) در هر سه جهت طول، عرض و ارتفاع و برای هر دو حرکت انتقالی و دورانی مقید شده است ($U_x=U_y=U_z=U_{Rx}=U_{Ry}=U_{Rz}=0$) تا از هر حرکتی در این مرز جلوگیری شده و شرایط سنگ بستر برای مدل سازی ایجاد شود. تأکید می گردد که منظور از سنگ بستر، مرزی در مدل سازی بوده که هیچ حرکت و هیچ تغییرشکلی تحت اعمال بار نداشته باشد. در اطراف مدل نیز حرکت انتقالی در راستای عمود بر آن صفحه و کلیه حرکات دورانی مقید شده اند ($U_x=U_y=U_z=U_{Rx}=U_{Ry}=U_{Rz}=0$) تا هیچ حرکت جانبی در اطراف مدل ایجاد نشود. لازم به ذکر است که با توجه به زمان تحلیل (که در این پژوهش ۲۵ میلی ثانیه است) فاصله مرزها از مرکز انفجار به اندازه ای در نظر گرفته شد که موج ایجاد شده ناشی از انفجار در زمان در نظر گرفته شده برای تحلیل به مرزهای مدل نرسد و تأثیری در مرزهای مدل ایجاد نکنند و همچنین برگشتی به درون مدل نیز نداشته باشند. همچنین مش بندی مدل اجزای محدود خاک با استفاده از المان هشت گره ای C3D8R و به روش انتگرال کاهش یافته^۹ ایجاد شده است [۱۰].

۲-۲- مدل سازی اجزای محدود فضای اوپلری

مدل سازی خاک رسی در نرم افزار آباکوس به بررسی اثرات انفجار سطحی بر روی سازه مسلح بتنی مدفون پرداختند [۱۲]. خدایپرست و مقبللی نیز با مدل سازی خاک ماسه ای در نرم افزار ال اس دینا^۸ به بررسی روانگرایی ناشی از انفجار در خاک های ماسه ای پرداختند [۱۳].

با توجه به بررسی پژوهش های پیشین در زمینه انفجار در مسائل ژئوتکنیکی، می توان دریافت که تاکنون تحقیقات کافی در خصوص بررسی تأثیر افزایش تنش های قائم خاک در اثر انفجار بر مقدار عمق لازم در شناسایی های ژئوتکنیکی و افزایش مقدار عمق لازم برای گمانه ها در تحقیقات صحرایی صورت نگرفته است. بر این اساس در این پژوهش برای یک مطالعه موردی با استفاده از روش عددی اجزای محدود، بررسی اثر انفجار در سطح و در عمق چهارمتری در دو نوع خاک ماسه ای و رسی، در دو شرایط خشک و اشباع در افزایش تنش های قائم خاک انجام و در ادامه میزان افزایش مقدار عمق لازم برای گمانه ها در شناسایی های ژئوتکنیکی تعیین شده است.

۲- مدل سازی سه بعدی اجزای محدود

مدل سازی عددی پژوهش حاضر با استفاده از نرم افزار اجزای محدود آباکوس و به روش CEL و تحلیل دینامیکی غیرخطی به روش صریح انجام شده است. همچنین جهت مقایسه تنش های ایجاد شده در خاک های مختلف از دو نوع خاک ماسه ای و رسی در دو شرایط رطوبتی خشک و اشباع استفاده گردیده است. در ادامه توضیحات مربوط به مدل سازی عددی اجزای به کار برده شده در پژوهش آورده شده است.

۲-۱- مدل سازی اجزای محدود خاک

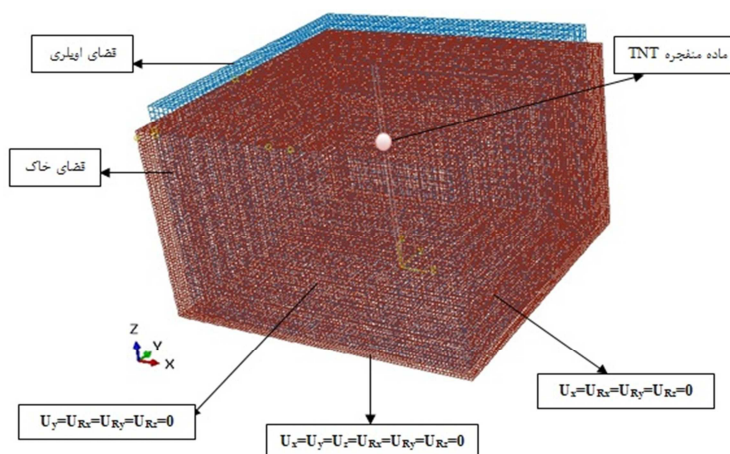
مدل سازی سه بعدی اجزای محدود خاک توسط المان های لاگرانژی در نرم افزار آباکوس انجام شده است. ابعاد فضای خاک برای خاک ماسه ای در شرایط خشک و

^۹- Reduced Integration

^۸- LS-Dyna

سه بعدی هشت‌گروهی EC3D8R به روش انتگرال کاهش یافته استفاده گردیده است.

مدل سه بعدی فضای اویلری با استفاده از روش مدل‌سازی المان‌های اویلری در آباکوس مدل‌سازی شده است. جهت مدل‌سازی ماده منفجره از المان‌های اویلری



شکل ۱- مدل اجزای محدود مش بندی شده خاک، فضای اویلری و شرایط مرزی خاک

$$P = A(1 - \frac{\omega}{R_1 \bar{\rho}})e^{-R_1 \bar{\rho}} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 \bar{\rho}})e^{-R_2 \bar{\rho}} + \omega \rho e_{int} \quad (1)$$

در این رابطه A ، B ، R_1 ، R_2 و ω ثابت‌های ماده منفجره TNT می‌باشند. پارامترهای A و B نمایانگر دامنه فشار، $\bar{\rho}$ حجم نسبی یعنی نسبت حجم محصولات انفجار ρ به حجم مواد منفجره اولیه ρ_0 و انرژی درونی e_{int} در بخش اول در سمت راست رابطه (۱) نشان‌دهنده تولید فشار زیاد در طول زمان انفجار و بخش آخر آن نشان‌دهنده فشار کم با توجه به حجم بالا در اثر انفجار می‌باشد. مشخصات ماده منفجره TNT مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۳- مدل رفتاری خاک

در این پژوهش جهت بررسی تأثیر انفجار در رفتار تنش- کرنش خاک‌های ماسه‌ای و رسی به ترتیب از مدل‌های رفتاری پلاستیسیته دراگر- دراگر و دراگر- پراگر با کلاک^{۱۵} استفاده شده است.

در آنالیز اویلری، مصالح بوسیله مفهوم قسمتی از حجم اویلری (EVF^{10}) در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین EVF نشان‌دهنده نسبت پرشدگی المان‌های اویلری توسط ماده منفجره می‌باشد. برای مثال $EVF=1$ نشان‌دهنده پر بودن کامل المان‌های اویلری از ماده منفجره و $EVF=0$ خالی بودن المان‌های اویلری از ماده منفجره را نشان می‌دهد [۱۰].

اندرکنش المان‌های اویلری و لاگرانژی به روش گزینه تماس کلی^{۱۱} با زیر شاخه تماس سخت در جهت نرمال و تماس اصطکاکی در جهت مماس ایجاد می‌شود. همچنین شرایط مرزی جریان خروج آزاد^{۱۲} برای محیط اویلری انتخاب می‌شود که مانع از عدم انعکاس موج انفجار به داخل محیط اویلری می‌شود. در این پژوهش از ماده منفجره تی‌ان‌تی (TNT) در مدل‌سازی استفاده شده است. برای مدل‌سازی TNT در نرم‌افزار از معادله حالت (EoS^{13}) جونز-ویکنز-لی (JWL^{14}) استفاده شده است. این معادله در رابطه (۱) نشان داده شده است [۱۰]:

¹⁰- Eulerian Volume Fraction

¹¹- General Contact

¹²- Outflow Free

¹³- Equation of State

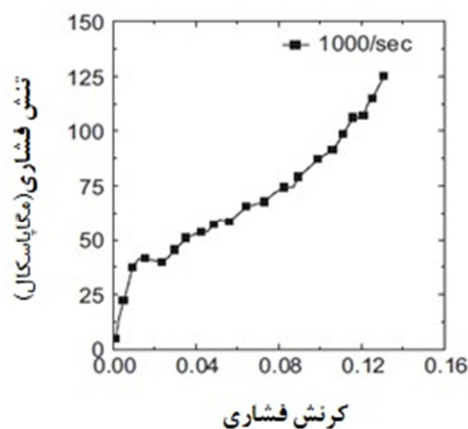
¹⁴- Jones-Wilkens-Lee

¹⁵- Cap Model

است [۱۵].

جدول ۲- مشخصات خاک ماسه‌ای مورد استفاده در این تحقیق [۱۰]

پارامتر	واحد	مقدار
مدول یانگ (E)	MPa	۲۸
ضریب پواسون (ν)	-	۰/۲
چگالی (ρ)	Kg/m ³	۱۵۶۰
چسبندگی (d)	Pa	۰
زاویه اصطکاک (φ)	Degree	۳۰
زاویه اتساع (ψ)	Degree	۵



شکل ۲- منحنی رابطه تنش-کرنش ماسه اتاوا در نرخ کرنش ۱۰۰۰/s [۱۰]

۲-۳-۲- مدل رفتاری خاک رسی

در این پژوهش از مدل رفتاری الاستو-پلاستیک دراگر-پراگر با کلاهدک جهت مدل‌سازی خاک رسی استفاده گردیده است. این مدل به دلیل قابلیت در نظر گرفتن اثر تاریخچه تنش، مسیر تنش، زاویه اتساع و اثر تنش اصلی متوسط، در بررسی رفتار خاک‌های چسبنده عملکرد مناسب‌تری از خود نشان می‌دهد. مشخصات خاک رسی استفاده شده در مدل‌سازی مطابق جدول ۳ می‌باشد [۱۲]. مشابه با خاک ماسه‌ای جهت در نظر گرفتن شرایط اشباع خاک، از مقدار ۰/۴۹ برای ضریب پواسون و بدون تغییر در سایر پارامترها استفاده گردیده است [۱۰ و ۱۱]. همچنین به علت سرعت بالای بارگذاری انفجاری، اثر دمپینگ در شبیه‌سازی عددی نادیده گرفته می‌شود [۱۵].

جدول ۱- پارامترهای ماده منفجره TNT [۱۰]

پارامتر	واحد	مقدار
چگالی (ρ)	Kg/m ³	۱۶۳۰
سرعت موج انفجار (v)	m/s	۶۹۳۰
A	MPa	۳۷۳۸۰۰
B	MPa	۳۷۴۷
ثابت ω	-	۰/۳۵
ثابت R ₁	-	۴/۱۵
ثابت R ₂	-	۰/۹
انرژی درونی e _{int}	KJ/K	۳۶۸۰

۲-۳-۱- مدل رفتاری خاک ماسه‌ای

جهت به‌دست آوردن پاسخ تنش-کرنش خاک ماسه‌ای، از مدل رفتاری دراگر-پراگر در نرم‌افزار استفاده شده است. این مدل برای مصالح خاکی دانه‌ای به‌کار می‌رود. سطح تسلیم این مدل می‌تواند به شکل هایپربولیک و یا توانی باشد. مدل خطی دراگر-پراگر امکان سطح تسلیم غیر منحنی در صفحه انحرافی جهت تطبیق مقادیر مختلف تسلیم در فشار و کشش سه محوری، همچنین همراه‌سازی جریان غیرالاستیک در صفحه انحرافی و تفکیک زوایای اصطکاک داخلی و اتساع را فراهم می‌سازد [۱۴]. مشخصات خاک ماسه‌ای مورد استفاده در این پژوهش که از نوع ماسه اتاوا می‌باشد، در جدول ۲ آمده است.

مقاومت تسلیم استاتیکی ماسه ۰/۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. منحنی تنش-کرنش ماسه اتاوا در نرخ ۱۰۰۰/s نیز در شکل ۲ آورده شده است [۱۰]. با توجه به زمان کم تحلیل و همچنین در نظر نگرفتن تغییرات فشار آب منفذی توسط نرم‌افزار و با فرض ثابت بودن فشار آب منفذی در زمان کم تحلیل، جهت در نظر گرفتن شرایط اشباع خاک، از مقدار ۰/۴۷۷۵ برای ضریب پواسون و بدون تغییر در سایر پارامترها استفاده گردیده است [۱۰ و ۱۱]. همچنین به علت سرعت بالای بارگذاری انفجار، اثر دمپینگ در شبیه‌سازی نادیده گرفته شده

جدول ۳- مشخصات خاک رسی مورد استفاده در این تحقیق [۱۲]

پارامتر	واحد	مقدار
مدول یانگ (E)	MPa	۵۱/۷
ضریب پواسون (ν)	-	۰/۴۵
چگالی (ρ)	Kg/m ³	۱۹۲۰
چسبندگی (d)	MPa	۰/۰۳۶
زاویه اصطکاک (β)	Degree	۲۴
خروج از مرکزیت کلاهدک (R)	-	۰/۳
موقعیت سطح تسلیم اولیه کلاهدک (ε _v)	-	۰/۰۲
پارامتر انتقال شعاع سطحی (α)	-	۰
رفتار سخت شوندگی کلاهدک (تنش- کرنش حجمی پلاستیک)	تنش (MPa)	کرنش (-)
	۲/۷۵	۰
	۴/۸۳	۰/۰۲
	۵/۱۵	۰/۰۴
	۶/۲۰	۰/۰۸

۲-۴- روش تحلیل مسئله در نرم‌افزار

در این پژوهش تحلیل دینامیکی غیرخطی به روش صریح با استفاده از روش CEL و در یک مرحله اجرای نرم‌افزار استفاده گردیده است. روش تحلیل دینامیکی صریح مبتنی بر انجام یک قانون انتگرال‌گیری صریح می‌باشد. این روش از یک افزایش زمان Δt که یک واحد زمانی بسیار کوچک است استفاده کرده که در آن $\Delta t \leq \frac{L}{c}$ می‌باشد، به طوری که L کوچکترین بعد المان و c سرعت موج صوت پخش شده در محیط است [۱۰ و ۱۶]. برای اینکه موج شوک ناشی از انفجار بتواند در محدوده‌ای از فضای خاک که انتشار می‌یابد، تنش‌های حداکثر ناشی از انفجار را در المان‌های خاک ایجاد کند، زمان کل تحلیل ۲۵ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است.

۳- صحت‌سنجی مدل اجزای محدود

در این پژوهش صحت‌سنجی مدل عددی در دو قسمت مورد بررسی قرار گرفته است. در قسمت اول نتایج مدل عددی تحت بار انفجاری با داده‌های پژوهش چاکرابورتی و همچنین داده‌های پژوهش آمبروزینی و

نگی مورد مقایسه قرار گرفت [۱۰، ۱۷ و ۱۸]. از آنجا که موضوع این دو تحقیق در ارتباط با بررسی اثر انفجار در خاک‌های مورد استفاده شده در این پژوهش است، لذا مقایسه و صحت‌سنجی داده‌های مدل‌سازی انجام شده با داده‌های آورده شده در این دو تحقیق، اعتبار مدل‌سازی انجام شده را نشان می‌کند. در قسمت دوم نیز ابعاد مدل و همچنین ابعاد المان‌های اجزای مدل با استفاده از روابط آیین‌نامه ارتش آمریکا (TM5-855-1) مورد بررسی قرار گرفت. در مواردی که مطالعات میدانی در مقیاس واقعی جهت صحت‌سنجی پژوهش‌های عددی در دسترس نباشد، می‌توان در برخی موضوعات از اطلاعات و روابط آیین‌نامه‌های معتبر از جمله آیین‌نامه TM5-855-1 استفاده کرد. این موضوع می‌تواند منجر به به‌دست آوردن اطلاعات مناسب و مفید اولیه در ارتباط با موضوع پژوهش شود.

۳-۱- صحت‌سنجی مدل عددی تحت بار انفجار

با توجه به آنکه مهمترین پارامتر مورد نظر جهت رسیدن به اهداف این تحقیق مقدار تنش ایجاد شده در خاک می‌باشد، از داده‌های پژوهش چاکرابورتی برای

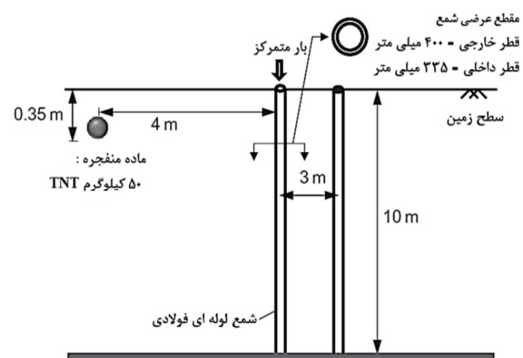
مشخصات ماده منفجره و فولاد شمع به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۴ آورده شده است. همچنین خصوصیات خاک ماسه‌ای در جدول ۲ و پاسخ تنش- کرنش آن در نرخ کرنش $1000/s$ در شکل ۲ آورده شده است.

جدول ۴- مشخصات فولاد شمع در مدل صحت‌سنجی [۱۰]

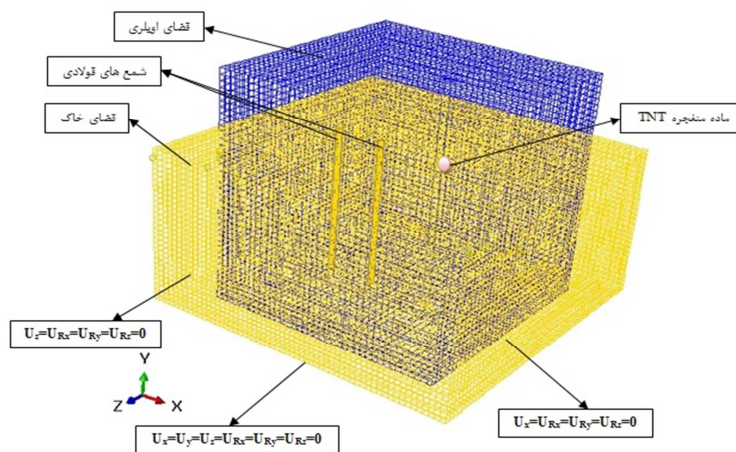
پارامتر	واحد	مقدار
مدول یانگ (E_s)	GPa	۲۰۰
مقاومت تسلیم (f_s)	MPa	۳۵۰
چگالی (ρ_s)	Kg/m ³	۷۸۰۰
ضریب پواسون (ν)	-	۰/۳
A	MPa	۳۶۰
B	MPa	۶۳۵
n	-	۰/۱۱۴
C	-	۰/۰۷۵

شکل ۴ نیز مدل اجزای محدود تهیه شده در این تحقیق جهت صحت‌سنجی را نشان می‌دهد. به همین منظور مقدار تنش متوسط در یک المان در فاصله ۶۴ سانتی‌متری از مرکز ماده منفجره نسبت به زمان بارگذاری با داده‌های پژوهش چاکرابورتی مقایسه شده است [۱۰].

صحت‌سنجی مدل عددی تحت بار انفجار استفاده شده است [۱۰]. در پژوهش مذکور با استفاده از روش CEL دو شمع فولادی جدار نازک مدفون در خاک مدل‌سازی شده است به‌گونه‌ای که فاصله شمع اول از مرکز ماده منفجره چهار متر می‌باشد. ماده منفجره استوانه‌ای به وزن ۵۰ کیلوگرم و در فاصله ۳۵ سانتی‌متری از سطح زمین و در عمق خاک قرار گرفته است. ابعاد فضای خاک $10 \times 20 \times 20$ متر بوده که عمق در نظر گرفته شده برای آن ۱۰ متر می‌باشد. شکل ۳ مشخصات مدل پژوهش چاکرابورتی را نشان می‌دهد [۱۰].



شکل ۳- مشخصات مدل چاکرابورتی در صحت‌سنجی [۱۰]

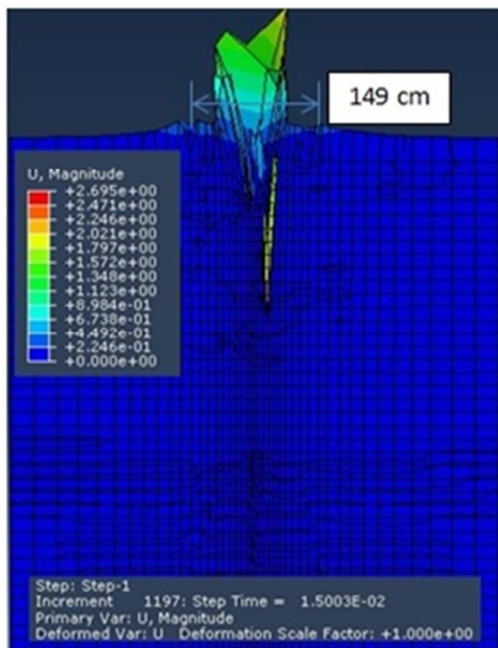


شکل ۴- مدل اجزا محدود صحت‌سنجی شده

این مطلب بیانگر آن است که مدل تهیه شده با دقت قابل قبولی صحت‌سنجی شده است. همچنین در ادامه جهت بررسی دهانه ایجاد شده در سطح خاک (D) در اثر انفجار، از داده‌های پژوهش آمبروزینی که شکل دهانه ایجاد شده در اثر انفجار در یک نمونه خاک رسی را مورد بررسی قرار داد، استفاده شده است [۱۷]. ابعاد مدل $12/5 \times 6 \times 6$ متر

نتایج این صحت‌سنجی در شکل ۵ آورده شده است. با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود که میان نمودار مدل تهیه شده در این تحقیق و نمودار ارائه شده در تحقیق چاکرابورتی اختلاف چندانی وجود ندارد. با مقایسه دو نمودار اختلاف میان نقاط مهم دو نمودار به‌خصوص در نقطه ماکزیمم در محدوده پنج تا ده درصد قرار می‌گیرد.

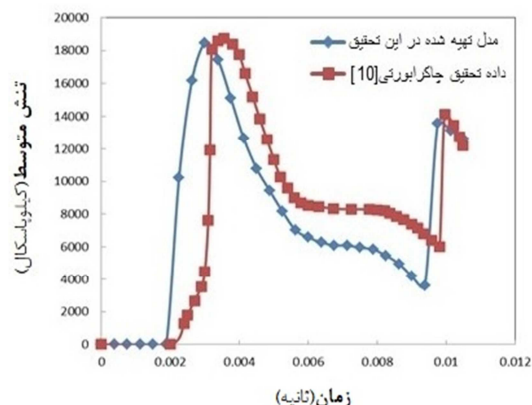
مقطع عمودی خاک و اندازه دهانه ایجاد شده در سطح خاک بر اثر انفجار (D) در شکل ۷ و مقایسه اندازه دهانه ایجاد شده با داده‌های پژوهش آمبروزینی و نگی در جدول ۵ آورده شده است [۱۷ و ۱۸].



شکل ۷- دهانه ایجاد شده در سطح خاک بر اثر انفجار TNT به جرم ۱۰ کیلوگرم در مدل صحت‌سنجی

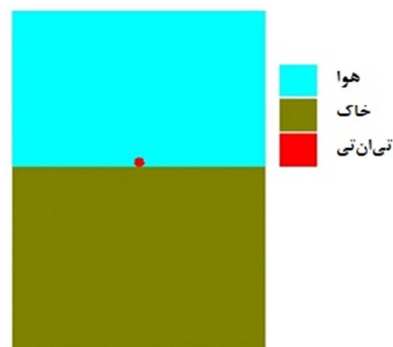
با توجه به جدول ۵ مشاهده می‌شود که میان عدد به‌دست آمده برای دهانه ایجاد شده در اثر انفجار در سطح خاک در این پژوهش (۱۴۹ سانتیمتر) و داده پژوهش آمبروزینی (۱۵۶ سانتیمتر) اختلاف چندانی وجود نداشته (۴/۵ درصد) و این مطلب بیانگر آن است که مدل عددی تهیه شده برای این پژوهش با دقت قابل قبولی صحت‌سنجی شده است.

بوده که ابعاد سطح خاک ۶×۶ متر و ارتفاع آن ۶/۲۵ متر می‌باشد.



شکل ۵- مقدار تنش متوسط در یک المان در فاصله ۶۴ سانتی‌متری از ماده منفجره نسبت به زمان بارگذاری در مدل چاکرابورتی [۱۰] و مدل تهیه شده در این تحقیق

ماده منفجره TNT به جرم ۱۰ کیلوگرم و به شکل کروی در سطح خاک مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۶ محل قرارگیری ماده منفجره، هوا و خاک را در مدل نشان می‌دهد. برای مشخصات خاک، هوا و ماده منفجره TNT مورد استفاده در مدل‌سازی عددی در این بخش از مقطع داده‌های پژوهش نگی و محمد استفاده شده است [۱۸].



شکل ۶- جانمایی هوا، خاک و ماده منفجره در مدل صحت‌سنجی

جدول ۵- مقایسه اندازه دهانه ایجاد شده (D) در مدل با داده‌های پژوهش آمبروزینی و نگی [۱۷ و ۱۸]

پژوهش	آمبروزینی (exp)	مدل عددی نگی	مدل این پژوهش	نسبت D مدل به D _{exp}
D (cm)	۱۵۶	۱۴۵	۱۴۹	۰/۹۵۵

جهت عدم بازگشت امواج حاصل از انفجار در مرزهای مدل به داخل محیط خاک و بررسی تنش‌های

۳-۲- بررسی ابعاد مناسب برای مدل و المان‌ها

بررسی این موضوع از روابط (۲) تا (۴) و همچنین روابط زیر استفاده شده است [۱۹]:

$$V_0 = 48.8 f \left(\frac{2.52 R}{W^{1/3}} \right)^{-n} \quad (۵)$$

$$C = c + \left(\frac{n+1}{n-2} \right) V_0 \quad (۶)$$

$$P_0 = \rho.C.V_0 \quad (۷)$$

$$P_{(t)} = P_0.e^{-\alpha t} \quad (۸)$$

در روابط (۵) تا (۸)، V_0 ، f ، n ، C ، W ، P_0 و P_t به ترتیب حداکثر سرعت ذرات، ضریب اتصال، ضریب میرایی، جرم ماده منفجره، سرعت بارگذاری موج انفجار، زمان کل انفجار، حداکثر فشار ناشی از انفجار و فشار در زمان کل انفجار می‌باشد. ضرایب n و f به ترتیب از جدول ۶ و شکل ۸ به دست می‌آیند و ضریب α برابر با یک در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۶- ضریب کاهندگی (n) [۱۹]

ضریب کاهندگی (n)	نوع خاک
۱/۵	رس اشباع
۲/۵	لای و رس نیمه اشباع
۲/۵	ماسه خیلی متراکم، خشک و مرطوب
۲/۷۵	ماسه متراکم، خشک و مرطوب
۳/۰	ماسه سست، خشک و مرطوب
۳/۲۵	ماسه خیلی سست، خشک و مرطوب

با توجه به شرایط گفته شده، برای جرم ماده منفجره ۵۰ کیلوگرم و خاک ماسه‌ای در حالت خشک با اندازه بعد المان ۲۸ سانتی‌متر، مقدار P_t با استفاده از روابط آیین‌نامه TM5-855-1 در زمان ۲۵ میلی‌ثانیه برابر با ۰/۷۶۲ مگاپاسکال محاسبه شد و از مدل عددی ۰/۷۵۴ مگاپاسکال به دست آمد (شکل ۹). این موضوع بیانگر مناسب بودن ابعاد المان‌های مدل اجزای محدود

حاصل از تنها یک موج پیش‌رونده در زمان اجرای نرم‌افزار و تحلیل مدل (۲۵ میلی‌ثانیه) انتخاب ابعاد اولیه مناسب برای مدل توسط روابط زیر صورت گرفته است [۱۹]:

$$M = \frac{E(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)} \quad (۲)$$

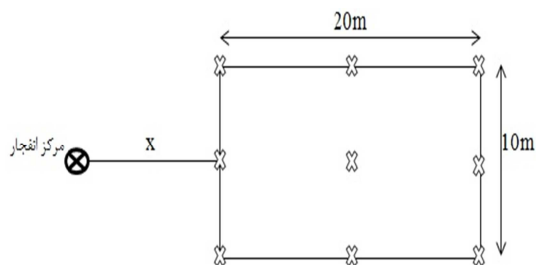
$$c = \sqrt{\frac{M}{\rho}} \quad (۳)$$

$$t_a = \frac{R}{c} \quad (۴)$$

در روابط (۲) تا (۴)، E ، M ، ν و ρ به ترتیب سختی، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و چگالی خاک، c سرعت موج طولی، t_a زمان پیشروی موج و R مسافتی است که موج در زمان مورد نظر طی می‌کند. بر این اساس طول پیشروی موج در خاک ماسه‌ای در شرایط خشک و اشباع و در خاک رسی در شرایط خشک به ترتیب ۳/۵، ۹/۵ و ۸ متر می‌باشد. از آنجا که ماده منفجره در مرکز مدل در نظر گرفته شده و همچنین در نظر گرفتن مقدار طول بیشتر در جهت اطمینان از نرسیدن موج به مرزهای مدل، بنابراین در این حالت ابعاد $28 \times 28 \times 18$ متر جهت مدل‌سازی فضای خاک در نظر گرفته شد. همچنین مسافت طی شده موج پیش‌رونده در خاک رسی در حالت اشباع ۱۷ متر می‌باشد. در این حالت با توجه به نکات گفته شده ابعاد مدل $40 \times 40 \times 22$ متر در نظر گرفته شد. به عبارت دیگر تفاوت ابعادی مدل برای دو خاک به این علت است که موج حاصل از انفجار در زمان ۲۵ میلی‌ثانیه در خاک رسی طول بیشتری را طی می‌کند. به همین علت برای نرسیدن موج به مرزهای مدل در خاک رسی اشباع ابعاد مدل بیشتر در نظر گرفته شد. جهت بررسی مناسب بودن ابعاد المان‌ها، فشار ایجاد شده توسط موج انفجار در یک المان در فاصله دو متری از مرکز ماده منفجره (در ابعاد مختلف المان) از نرم‌افزار به عنوان خروجی گرفته شد و این فشار با روابط موجود در آیین‌نامه TM5-855-1 صحت‌سنجی گردید [۱۹]. برای

ابعاد زمین مطالعه موردی مورد نظر جهت به دست آوردن عمق گمانه 20×10 متر بوده و تعداد طبقات مورد نظر جهت احداث ساختمان، پنج طبقه می‌باشد. شکل ۱۰ موقعیت قرارگیری زمین مورد نظر در این مطالعه، نقاط مورد بررسی و فاصله آنها را تا مرکز انفجار (X) نشان می‌دهد.

لازم به توضیح است که در خاک‌های ماسه‌ای اشباع، در اثر انفجار احتمال وقوع روانگرایی وجود دارد و لذا لازم است در این نوع خاک‌ها ابتدا مسئله احتمال وقوع روانگرایی مورد بررسی قرار گیرد. جزئیات نحوه این بررسی در تحقیق خدایرست و مقبلی آمده است [۱۳].

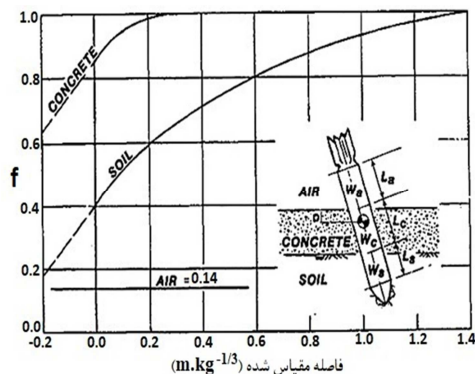


شکل ۱۰- وضعیت قرارگیری زمین مورد نظر در این مطالعه نسبت به مرکز انفجار و نقاط مورد بررسی

۴-۱- تعیین محدوده تأثیر بار انفجار

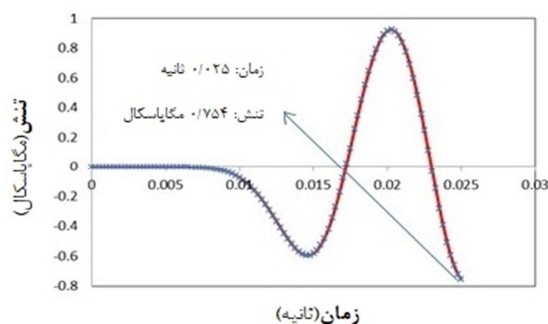
در انجام این پژوهش در بررسی محدوده تأثیر بار ناشی از انفجار سه نکته مورد توجه قرار گرفت. اولین نکته توجه به فاصله ایمن بوده به گونه‌ای که اعمال بار انفجار موجب ایجاد خسارت به سازه پس از ساخت در زمین مورد نظر در آینده نشود. به عبارت دیگر حداقل فاصله محل انفجار تا زمین مورد نظر با فرض عدم بروز آسیب و گسیختگی به سازه تعیین شده است. دومین موضوع اندازه‌گیری حداکثر اضافه تنش قائمی است که در اثر انفجار در خاک ایجاد می‌شود تا بتوان از این مقدار تنش به عنوان مبنای اصلی در روابط تعیین عمق گمانه استفاده کرد. نکته آخر اینکه محدوده تأثیر بار انفجار به گونه‌ای تعیین شود که در بیرون از این محدوده اضافه تنش ایجاد شده در اثر انفجار در هیچ نقطه از زمین مورد نظر در اعماق مختلف بیش از ۱۰ درصد تنش مؤثر در آن

می‌باشد. برای خاک رسی بعد امان ۳۰ سانتی‌متر محاسبه گردید.



شکل ۸- ضریب اتصال متناسب با مقدار فاصله مقیاس شده

انفجار [۱۹]



شکل ۹- تغییرات مقدار تنش بر حسب زمان در خاک در

فاصله دو متری از مرکز انفجار به دست آمده از مدل عددی این تحقیق.

۴- بررسی مدل‌سازی و تحلیل نتایج

با توجه به هدف پژوهش حاضر که بررسی تأثیر بار دینامیکی ناشی از انفجار در به دست آوردن عمق گمانه در مطالعات ژئوتکنیک می‌باشد، در ادامه ابتدا سعی می‌شود محدوده تأثیر انفجار با توجه به جرم و عمق ماده منفجره و نوع خاک تعیین شود. سپس با توجه به مقدار اضافه تنش ناشی از بار انفجار در هر حالت، تأثیر آن در عمق لازم برای حفر گمانه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور جهت بررسی تأثیر مقدار ماده منفجره از TNT در جرم‌های ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوگرم در مدل‌سازی استفاده شد. همچنین جهت بررسی انفجار در ترازهای مختلف خاک، بررسی انفجار هم در سطح خاک و هم در عمق چهار متری خاک مورد بررسی قرار گرفت.

مشاهده می‌شود محدوده تأثیر بار انفجاری در خاک ماسه‌ای نسبت به خاک رسی مورد مطالعه در این تحقیق کوچکتر می‌باشد. بیشترین مقدار محدوده تأثیر در خاک ماسه‌ای پنج متر می‌باشد در حالی که در خاک رسی این مقدار به عدد نه می‌رسد.

عمق نگردد. در این مطالعه جهت به‌دست آوردن فاصله ایمن، از نتایج به‌دست آمده در مطالعه حسینی و خدایپرست استفاده شده است [۲۰ و ۲۱]. بر این اساس محدوده تأثیر بار دینامیکی ناشی از انفجار برای دو نوع خاک ماسه‌ای و رسی مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۷ آمده است. با توجه به جدول ۷ همانطور که

جدول ۷- محدوده تأثیر بار دینامیکی انفجار در خاک ماسه‌ای و رسی خشک مورد مطالعه در این تحقیق

نوع خاک	جرم تی‌ان‌تی (kg)	عمق انفجار (m)	محدوده تأثیر انفجار (m)
خاک ماسه‌ای خشک	۵۰	۴ و صفر	۲-۳
	۱۰۰ و ۲۰۰	۴ و صفر	۲-۴
	۳۰۰	۴ و صفر	۲-۵
خاک رسی خشک	۵۰ و ۱۰۰	۴ و صفر	۲-۸
	۲۰۰	صفر	۳-۸
	۲۰۰	۴	۳-۹
	۳۰۰	۴ و صفر	۴-۹

کیلوگرم TNT در خاک ماسه‌ای خشک در دو زمان ۱۵ و ۲۵ میلی‌ثانیه را نشان می‌دهد. پس از آن تنش حالت ژئواستاتیک از آنها کسر شده تا مقادیر اضافه تنش قائم خالص ناشی از انفجار به‌دست آید. در نهایت میانگین اعداد به‌دست آمده تعیین شد. این روند برای تمامی جرم‌های مختلف TNT و برای هر دو انفجار سطحی و انفجار در عمق چهار متری و همچنین در فواصل مختلف ماده منفجره از زمین مورد مطالعه (فاصله X در شکل ۱۰) انجام شد که نتایج آن در شکل ۱۲ برای خاک‌های ماسه‌ای و رسی در حالت خشک آمده است.

با توجه به شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که در شرایط یکسان اضافه تنش‌های بیشتری ناشی از انفجار در خاک رسی مورد مطالعه در این تحقیق نسبت به خاک ماسه‌ای ایجاد شده است. همچنین می‌توان دریافت که خاک ماسه‌ای در حالت خشک رفتار بهتری در عدم انتقال موج

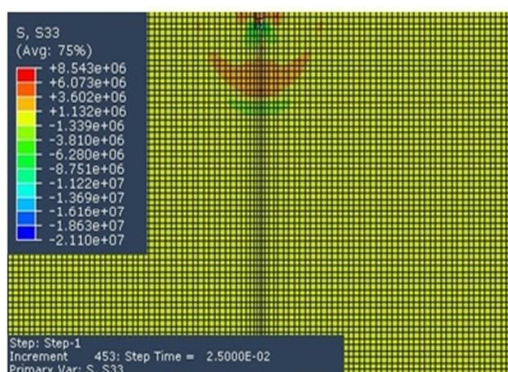
به این ترتیب می‌توان دریافت که خاک ماسه‌ای اثر مناسب‌تری در عدم انتقال امواج حاصل از انفجار نسبت به خاک رسی (دو نوع خاک مورد بررسی در این پژوهش) دارد. این موضوع ارتباط مستقیمی با پارامترهای مشخصات خاک از جمله ضریب پواسون، مدول الاستیسیته و چگالی خاک دارد (روابط (۲) تا (۴)).

۲-۴- میانگین اضافه تنش‌های قائم ایجاد شده در اثر بار انفجار

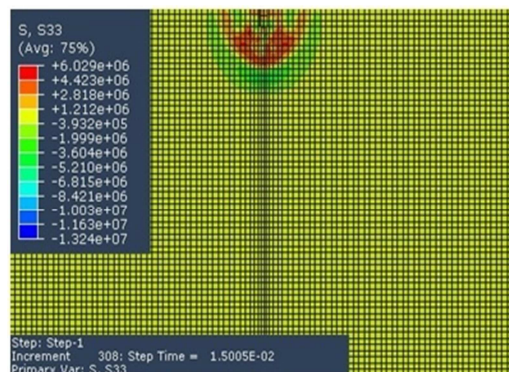
در این مطالعه جهت به‌دست آوردن میانگین اضافه تنش‌های قائم ایجاد شده در زمین مطالعه موردی مورد نظر در اثر انفجار (Q^*)، براساس نتایج تحلیل عددی نسبت به تعیین مقادیر تنش‌های قائم بوجود آمده در نه نقطه در اعماق مختلف خاک (که در شکل ۱۰ با علامت ضربدر مشخص شده‌اند) اقدام گردید. شکل ۱۱ نمونه‌ای از گسترش تنش‌های قائم ایجاد شده در اثر انفجار ۳۰۰

فاز هوا در بین ذرات خاک ماسه‌ای خشک باشد [۷].

ناشی از انفجار دارد. این موضوع می‌تواند به دلیل وجود

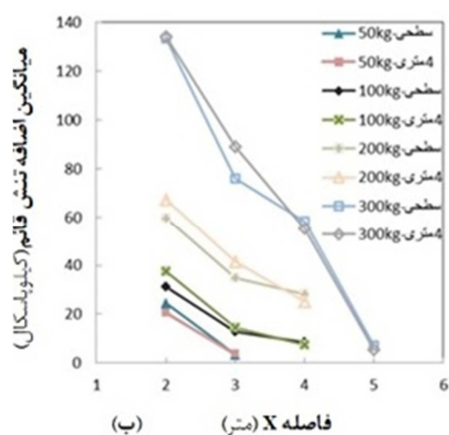


(ب)

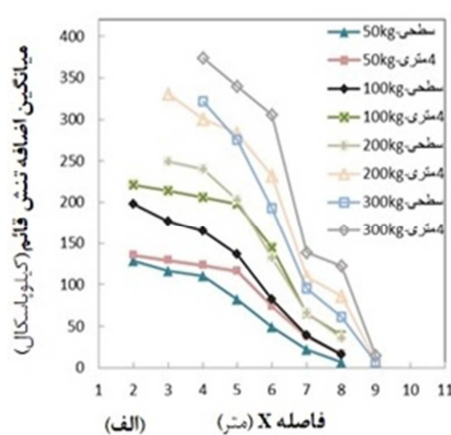


(الف)

شکل ۱۱- تنش‌های قائم ایجاد شده در اثر انفجار ۳۰۰ کیلوگرم TNT در خاک ماسه‌ای خشک، (الف) زمان ۱۵ میلی ثانیه و (ب) زمان ۲۵ میلی ثانیه



(ب) فاصله X (متر)



(الف) فاصله X (متر)

شکل ۱۲- میانگین اضافه تنش قائم ایجاد شده (q^*) در زمین مورد مطالعه در اثر انفجار، (الف) خاک رسی خشک و (ب) خاک ماسه‌ای خشک

می‌باشد. بنابراین عمق گمانه در حالت بارگذاری استاتیکی با توجه به ابعاد زمین مورد نظر در این مطالعه و تعداد طبقات جهت احداث ساختمان (پنج طبقه) برای خاک ماسه‌ای در حالت خشک ۱۰/۴ متر و برای خاک رسی در حالت ذکر شده ۹/۳ متر محاسبه گردید. جهت لحاظ کردن تأثیر بار انفجار در مقدار عمق لازم برای گمانه‌ها مقدار اضافه تنش ناشی از اجرای سازه (سمت چپ رابطه (۹)) با مقدار اضافه تنش‌های قائم ایجاد شده در اثر انفجار جمع شده است. بر این اساس مقدار عمق گمانه‌ها به گونه‌ای تعیین شد که این مجموع از ۱۰ درصد تنش موثر خاک در آن عمق کمتر باشد. نتایج این محاسبات در جدول‌های ۸ و ۹ به ترتیب برای خاک‌های ماسه‌ای خشک و رسی خشک آورده شده است. با توجه به

۴-۳- محاسبه عمق گمانه‌ها با در نظر گرفتن بار انفجار

جهت به دست آوردن عمق گمانه‌ها در هر دو نوع خاک ماسه‌ای و رسی مورد مطالعه در این تحقیق از معیار رسیدن به ترازوی که اضافه تنش ناشی از بارگذاری کمتر از ۱۰ درصد تنش موثر خاک در آن عمق باشد، استفاده شده است (رابطه (۹)):

$$\frac{q_0 \times B \times L}{(B+z)(L+z)} \leq 0.1 \gamma' z \quad (9)$$

در این رابطه، q_0 بار ناشی از اجرای سازه در سطح زمین، B و L به ترتیب طول و عرض ساختمان مورد نظر، γ' وزن مخصوص غوطه‌وری و Z عمق گمانه به دست آمده

مرکز انفجار (۵ درصد) می‌باشد. لازم به ذکر است که تمامی این نتایج، در مورد خاک‌های مورد استفاده و شرایط در نظر گرفته شده در این مطالعه صحیح بوده و ممکن است با تغییر هریک از موارد مذکور نتایج متفاوتی به دست آید.

جدول‌های ۸ و ۹ می‌توان دریافت که بیشترین مقدار افزایش در عمق گمانه مربوط به انفجار ۳۰۰ کیلوگرم TNT در عمق ۴ متر و فاصله ۴ متری از مرکز انفجار در خاک رسی (۱۸۵ درصد) و کمترین آن مربوط به انفجار ۵۰ کیلوگرم TNT در خاک ماسه‌ای و فاصله ۳ متری از

جدول ۸- درصد افزایش عمق گمانه‌ها در زمین مورد مطالعه تحت تأثیر بار ناشی از انفجار در خاک ماسه‌ای خشک

۴				صفر				عمق انفجار (m)
۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۵۰	۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۵۰	جرم تی‌ان‌تی (kg)
								فاصله X (m)
۹۲/۵	۵۵	۳۳/۵	۲۴	۹۱/۵	۵۰	۲۹	۲۲	۲
۶۸/۵	۳۶/۵	۱۴/۵	۵	۶۰/۵	۳۲/۵	۱۲/۵	۵	۳
۴۷	۲۴	۷/۵	-	۴۹	۲۷	۷/۵	-	۴
۶	-	-	-	۷/۵	-	-	-	۵

جدول ۹- درصد افزایش عمق گمانه‌ها در زمین مورد مطالعه تحت تأثیر بار ناشی از انفجار در خاک رسی خشک

۴				صفر				عمق انفجار (m)
۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۵۰	۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۵۰	جرم تی‌ان‌تی (kg)
								فاصله X (m)
-	-	۱۳۳/۵	۹۵/۵	-	-	۱۲۴/۵	۹۲/۵	۲
-	۱۷۲	۱۳۰	۹۲/۵	-	۱۴۴	۱۱۵	۸۶	۳
۱۸۵	۱۶۲	۱۲۷	۸۹	۱۶۹	۱۴۱	۱۰۹/۵	۸۳	۴
۱۷۴	۱۵۶	۱۲۳/۵	۸۶	۱۵۴	۱۲۶	۹۷	۶۶/۵	۵
۱۶۳	۱۳۷/۵	۱۰۰	۶۱/۵	۱۲۱/۵	۹۴/۵	۶۶/۵	۴۴	۶
۹۸	۸۳	۵۵	۳۵/۵	۷۴	۵۶	۳۶/۵	۲۱/۵	۷
۸۹	۶۹	۳۶/۵	۱۷	۵۲/۵	۳۴/۵	۱۶	۷/۵	۸
۱۵	۹/۵	-	-	۷/۵	-	-	-	۹

در این مطالعه به مانند بخش ۴-۲ مقادیر اضافه تنش قائم خالص ناشی از بار انفجار برای خاک‌های ماسه‌ای و رسی در حالت اشباع در زمین مورد مطالعه تعیین شد. لازم به توضیح است که در حالت اشباع نتایج فقط برای جرم‌های ۱۰۰ و ۳۰۰ کیلوگرم و برای دو انفجار سطحی و انفجار در عمق چهار متری و در فواصل مختلف ماده منفجره از زمین مورد مطالعه (فاصله X در شکل ۱۰) تعیین شد و نتایج آن در شکل ۱۳ برای خاک‌های ماسه‌ای و رسی در حالت اشباع آمده است. با توجه به

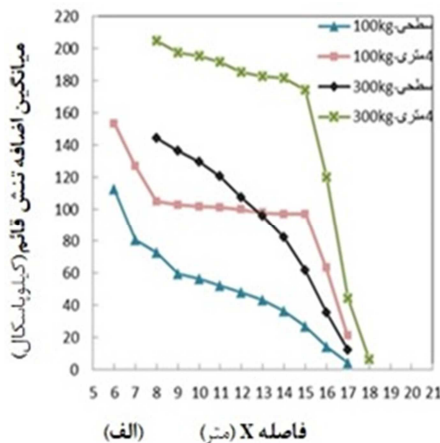
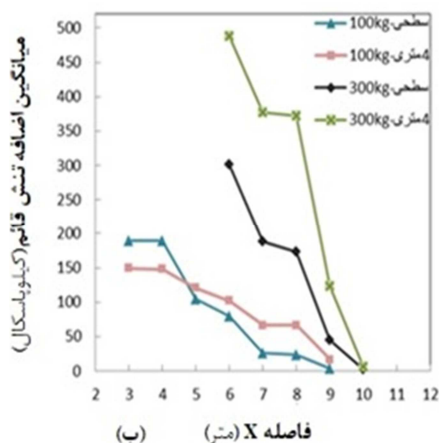
۴-۴- تحلیل نتایج برای خاک‌های ماسه‌ای و رسی در حالت اشباع

در این پژوهش مراحل به دست آوردن میانگین اضافه تنش‌های قائم ایجاد شده در اثر بار انفجاری (q^*) و همچنین به دست آوردن عمق گمانه با در نظر گرفتن بار انفجاری برای حالت اشباع خاک‌های ماسه‌ای و رسی مورد بررسی قرار گرفت که در ادامه آورده شده است.

۴-۴-۱- میانگین اضافه تنش‌های قائم ایجاد شده در اثر بار انفجار

اثر بار انفجار در هر دو خاک نسبت به حالت خشک آنها، در فواصل دورتری از مرکز انفجار گسترش یافته است که مهمترین دلیل آن افزایش ضریب پواسون خاک در حالت اشباع نسبت به حالت خشک می‌باشد (روابط (۲) تا (۴)).

شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که اضافه تنش‌های بیشتری ناشی از انفجار در خاک ماسه‌ای اشباع مورد مطالعه در این تحقیق نسبت به خاک رسی اشباع ایجاد شده است. همچنین با ایجاد شرایط اشباع، تنش‌های ایجاد شده در



شکل ۱۳- میانگین اضافه تنش قائم ایجاد شده (q^*) در زمین مورد مطالعه در اثر انفجار، (الف) خاک رسی اشباع و (ب) خاک ماسه‌ای اشباع

(سمت چپ رابطه (۹)) با مقدار اضافه تنش‌های قائم ایجاد شده در اثر انفجار جمع شده است. بر این اساس مقدار عمق گمانه‌ها به گونه‌ای تعیین شد که این مجموع از ۱۰ درصد تنش موثر خاک در آن عمق کمتر باشد. نتایج این محاسبات در جدول‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب برای خاک‌های ماسه‌ای اشباع و رسی اشباع آورده شده است.

۴-۴-۲- محاسبه عمق گمانه‌ها با در نظر گرفتن بار انفجار با استفاده از رابطه (۹) عمق گمانه در حالت بارگذاری استاتیکی با توجه به ابعاد زمین مورد نظر در این مطالعه و تعداد طبقات جهت احداث ساختمان (پنج طبقه) برای خاک ماسه‌ای در حالت اشباع ۱۷/۴ متر و برای خاک رسی در حالت ذکر شده ۱۳/۷ متر به دست می‌آید. جهت لحاظ کردن تأثیر بار انفجار در مقدار عمق لازم برای گمانه‌ها مقدار اضافه تنش ناشی از اجرای سازه

جدول ۱۰- درصد افزایش عمق گمانه‌ها در زمین مورد مطالعه تحت تأثیر بار ناشی از انفجار در خاک ماسه‌ای اشباع

۴		صفر		عمق انفجار (m)
				جرم تی‌ان‌تی (kg)
۳۰۰	۱۰۰	۳۰۰	۱۰۰	فاصله X (m)
-	۸۸	-	۱۰۱	۳
-	۸۶	-	۱۰۰	۴
-	۷۴/۵	-	۶۷	۵
۱۷۹	۶۶	۱۳۶	۵۵	۶
۱۵۵	۴۷/۵	۱۰۰/۵	۲۲	۷
۱۵۳	۴۶/۵	۹۵/۵	۲۰	۸
۷۵/۵	۱۴/۵	۳۵	۴	۹
۶/۵	-	۲/۵	-	۱۰

جدول ۱۱- درصد افزایش عمق گمانه ها در زمین مورد مطالعه تحت تأثیر بار ناشی از انفجار در خاک رسی اشباع

۴		صفر		عمق انفجار (m)
				جرم تی‌ان‌تی (kg)
۳۰۰	۱۰۰	۳۰۰	۱۰۰	فاصله X (m)
-	۹۳/۵	-	۷۵	۶
-	۸۲/۵	-	۵۸/۵	۷
۱۱۳	۷۱/۵	۸۹	۵۳/۵	۸
۱۱۰	۷۰	۸۶	۴۶	۹
۱۰۹/۵	۷۰	۸۲/۵	۴۴	۱۰
۱۰۸	۶۹/۵	۷۹	۴۱/۵	۱۱
۱۰۶	۶۸/۵	۷۲	۳۸/۵	۱۲
۱۰۵	۶۸	۶۷	۳۶	۱۳
۱۰۴/۵	۶۷	۵۹	۳۰/۵	۱۴
۱۰۲	۶۵	۴۷/۵	۲۳/۵	۱۵
۷۹	۴۸	۳۰	۱۳	۱۶
۳۷	۱۹	۱۱/۵	۴/۵	۱۷
۶	-	-	-	۱۸

غیرخطی به روش اجزای محدود انجام شد. پس از آن درصد افزایش عمق لازم برای گمانه‌ها برای زمین مورد مطالعه و مشخصات در نظر گرفته شده برای سازه آن تحت تأثیر بار دینامیکی ناشی از انفجار تعیین گردید. این پژوهش با تغییر پارامترهای مختلفی از جمله فاصله ماده منفجره از زمین مورد مطالعه، جرم ماده منفجره، عمق مدفون ماده منفجره و تغییر شرایط رطوبتی خاک‌ها انجام شد. درصد افزایش عمق گمانه در خاک‌های ماسه‌ای و رسی به ترتیب از ۵ (انفجار سطحی تی‌ان‌تی به جرم ۵۰ کیلوگرم در فاصله ۳ متری) تا ۹۲/۵ درصد (انفجار تی‌ان‌تی به جرم ۳۰۰ کیلوگرم در عمق ۴ متری و در فاصله ۲ متری) و ۷/۵ (انفجار سطحی تی‌ان‌تی به جرم ۵۰ کیلوگرم در فاصله ۸ متری) تا ۱۸۵ درصد (انفجار تی‌ان‌تی به جرم ۳۰۰ کیلوگرم در عمق ۴ متری و در فاصله ۴ متری) متغیر بودند. این تغییرات برای خاک ماسه‌ای اشباع از ۲/۵ (انفجار سطحی تی‌ان‌تی به جرم ۱۰۰ کیلوگرم در فاصله ۱۰ متری) تا ۱۷۹ درصد (انفجار

با توجه به جدول‌های ۱۰ و ۱۱ می‌توان دریافت که بیشترین مقدار افزایش در عمق گمانه مربوط به انفجار ۳۰۰ کیلوگرم TNT در عمق ۴ متر و فاصله ۶ متری از مرکز انفجار در خاک ماسه‌ای (۱۷۹ درصد) و کمترین آن مربوط به انفجار ۳۰۰ کیلوگرم TNT در خاک ماسه‌ای و فاصله ۱۰ متری از مرکز انفجار (۲/۵ درصد) می‌باشد. لازم به ذکر است که تمامی این نتایج مربوط به خاک‌های مورد استفاده و شرایط در نظر گرفته شده در این مطالعه بوده و ممکن است با تغییر هریک از موارد مذکور نتایج متفاوتی به دست آید.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش مدل‌سازی عددی اعمال بار انفجار در دو نوع خاک ماسه‌ای و رسی و در دو شرایط خشک و اشباع جهت بررسی اضافه تنش‌های قائم ایجاد شده در اثر بارگذاری انفجار، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و روش کوپل اولیری-لاگرانژی و تحلیل سه‌بعدی دینامیکی

در افزایش مقدار اضافه تنش ایجاد شده در خاک و به دنبال آن درصد افزایش عمق گمانه دارد. همچنین در شرایط یکسان، اضافه تنش و عمق گمانه بیشتری برای خاک رسی مورد مطالعه در این تحقیق نسبت به خاک ماسه‌ای محاسبه گردید.

تی‌ان‌تی به جرم ۳۰۰ کیلوگرم در عمق ۴ متری و در فاصله ۶ متری) و برای خاک رسی اشباع از ۴/۵ (انفجار سطحی تی‌ان‌تی به جرم ۱۰۰ کیلوگرم در فاصله ۱۷ متری) تا ۱۱۳ درصد (انفجار تی‌ان‌تی به جرم ۳۰۰ کیلوگرم در عمق ۴ متری و در فاصله ۸ متری) بود. نتایج بررسی‌ها نشان داد که اشباع شدن خاک تأثیر چشمگیری

مراجع

- [1] Ambrosini, D. & Luccioni, B. (2019). "Effects of underground explosions on soil and structures". *Underground Space*, 1-15.
- [2] Yang, G., Wang, G., Lu, W., Zhao, X., Yan, P. & Chen, M. (2018). "Numerical modelling of surface explosion effects on shallow-buried box culvert behavior during the water diversion". *Thin-Walled Structures*, 133, 153-168.
- [3] Wang, M. & Qiu, Y. (2017). "Similitude laws and modeling experiments of explosion cratering in multi-layered geotechnical media". *Impact engineering*, 1-41.
- [4] Charlie, W. A., Veyera, G. E., Durnford, D. S. & Doehring D. O. (1996). "Porewater pressure increases in soil and rock from underground chemical and nuclear explosions". *Engineering Geology*, 43, 225-236.
- [5] Ma, G. W., Hao, H. & Zhou Y. X. (1998). "Modeling of wave propagation induced by underground explosion". *Computers and Geotechnics*, 22(3/4), 283-303.
- [6] Wang, Z. & Lu, Y. (2003). "Numerical analysis on dynamic deformation mechanism of soils under blast loading". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23, 705-714.
- [7] Wang, Z. (2004). "Numerical investigation of effects of water saturation on blast wave propagation in soil mass". *Journal of Engineering Mechanics*. 551-560.
- [8] Rigby, S. E., Fay, S. D., Tyas, A., Clarke, S. D., Reay, J. J., Warren, J. A., Gant, M. & Elgy, I. (2018). "Influence of particle size distribution on the blast pressure profile from explosives buried in saturated soils". *Journal of Shock Waves*, 28, 613-628.
- [9] Adibi, O., Azadi, A., Farhanieh, B. & Afshin, H. (2017). "A parametric study on the effects of surface explosions on buried high pressure gas pipelines". *Journal of Engineering Solid Mechanics*, 5, 225-244.
- [10] Chakraborty, T. (2016). "Analysis of hollow steel piles subjected to buried blast loading". *Computers and Geotechnics*, 78, 194-202.
- [11] Liu, H. (2012). "Soil-structure interaction and failure of cast-iron subway tunnels subjected to medium internal blast loading". *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 26, 691-701.
- [12] Nagy, N., Mohamed, M. & Boot, J. C. (2010). "Nonlinear numerical modeling for the effects of surface explosions on buried reinforced concrete structures". *Geomechanics and Engineering*, 2(1), 1-18.
- [13] Khodaparast, M. & Moghbeli, M. (2019). "Numerical simulation of blast induced soil liquefaction". *Modern Defense Science and Technology*, 11(2), 205-210.
- [14] Abaqus V6.13 users guide. (2013). Providence, R1, USA: *Abaqus Inc.*, DS SIMULIA.
- [15] Chengqing, W. & Hong, H. (2005). "Numerical study of characteristics of underground blast induced surface ground motion and their effect on above-ground structures". Part I. Ground motion characteristics. *Soil Dynamic and Earthquake Engineeng*, 25, 27-38.
- [16] Abaqus/Explicit V6.13 user manual. (2013). Providence, R1, USA: *Abaqus Inc.*, DS SIMULIA.
- [17] Ambrosini, R. D. & Luccioni, B. M. (2006). "Craters produced by explosions on the soil surface". *Journal of Applied Mechanics*, 73, 890-900.
- [18] Nagy, N., Mohamed, M. & Boot, J. (2007). "Numerical Investigation of Surface Explosion Effects on Clay Soils". *4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, 73, 41206.
- [19] TM5-855-1. (1986). *Fundamental of protective design for conventional weapons*. US Army technical manual.
- [20] Hoseini, S. H. (2017). "Passive defense considerations in the design of piles by examining the effects of explosion loading on their behavior". Master's Thesis University of Qom.
- [21] Khodaparast, M. & Hoseini, S. H. (2018). "Effect of Pile Space in Pile Group under Explosive Loading". *Modern Defense Science and Technology*, 9(4), 393-404.