

شبیه‌سازی و محاسبه فشار انفجار مدفون در خاک‌های ماسه‌ای و ارائه روابط فشار با روش RSM

سید احمد حسینی^{۱*}، نوید منافی^۲

۱- استادیار، ۲- کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی پدافند غیرعامل

(دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۴؛ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۴)

چکیده

امروزه با توجه به گسترش تهدیدات امنیتی لزوم توجه به الزامات پدافند غیرعامل بیش از پیش احساس می‌گردد. از آنجایی که سازه‌های مهم و حساس معمولاً به صورت زیرزمینی طراحی و اجرا می‌گردند، جهت طراحی ایمن و اقتصادی این سازه‌ها، لازم است تا برآورد کمی مناسبی از میزان فشار انفجار مدفون در انواع محیط‌های زیرزمینی حاصل شود. به همین منظور، در این پژوهش به بررسی میزان فشار انفجار مدفون در انواع خاک‌های ماسه‌ای پرداخته شده است. مدل عددی پیشنهادی در نرم‌افزار اجزای محدود اتوداین ساخته شده و پس از صحت‌سنجی این مدل پیشنهادی با تست‌های آزمایشگاهی، فشار حاصل از انفجار مدفون در انواع خاک‌های ماسه‌ای استخراج شده است. در ادامه، با مقایسه خروجی‌های این تحقیق با نتایج روابط دستورالعمل ۱-۸۵۵-۵ TM، ارزیابی دقت روابط TM انجام شده است. در انتها، با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM)، روابطی با دقت مناسب جهت محاسبه فشار در خاک‌های ماسه‌ای ارائه شده است.

کلیدواژه‌ها: بار انفجار مدفون، خاک ماسه‌ای، دستورالعمل ۱-۸۵۵-۵ TM، نرم‌افزار اتوداین، رابطه محاسبه فشار، RSM

The Simulation and Calculation of Buried Blast Pressure in Sandy Soils and the Presentation of Pressure Relationships by RSM Methodology

S. A. Hosseini, N. Manafi

Malek Ashtar University of Technology
(Received: 23/01/2021; Accepted: 26/10/2021)

Abstract

Today, with the spread of security threats, considering passive defense requirements has become more tangible. Since important and sensitive structures are usually designed and executed underground, for a safe and economical design of such structures, it is necessary to obtain a good quantitative estimation of the amount of buried explosion pressure in a variety of underground environments. For this purpose, in this study, the amount of blast pressure buried in different types of sandy soils has been investigated. The proposed numerical model has been made in Ansys- Autodyn finite element software and after verification of this proposed model with laboratory tests, the pressure from the buried explosion in various sandy soils has been extracted. Then, by comparing the outputs of this research with the results of the relations of TM 5-855-1 instruction, the accuracy of TM relations has been evaluated. Finally, to calculate the pressure in sandy soils with appropriate accuracy, several relationships have been presented using the response surface methodology (RSM).

Keywords: Buried Blast Load, Sandy Soil, TM 5-855-1 Instruction, Ansys- Autodyn Software, RSM

۱- مقدمه

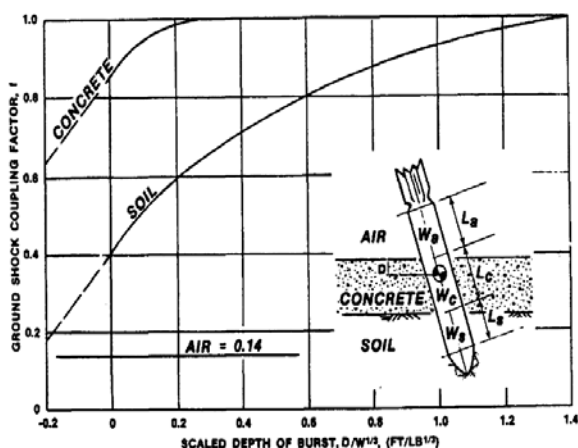
خاک‌های ماسه‌ای به صورت عددی پرداخته می‌شود. در ادامه، با مقایسه خروجی‌های این تحقیق با نتایج روابط دستورالعمل ۱-۸۵۵-۵ TM، دقت روابط TM ارزیابی می‌شود.

همان‌طور که اشاره شد دستورالعمل ۱-۸۵۵-۵ TM [۱]، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مراجع جهت محاسبه فشار انفجار مدفون در انواع خاک‌ها به کار می‌رود. انتشار امواج ناشی از انفجار در خاک به دو صورت موج‌های حجمی (فشاری، عرضی) و موج سطحی (رایلی) هست که مخرب‌ترین آن برای سازه مدفون نزدیک به محل انفجار، موج حجمی فشاری است. انتشار این موج در محیط‌های پیوسته و آزاد از روابط زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$P = 48.8 \rho C f_c \left(2.52R / W^{1/3} \right)^{-n} \quad (1)$$

در روابط فوق P فشار انفجار مدفون (پاسکال)، f_c ضریب تأثیر عمق، W وزن ماده منفجره (کیلوگرم)، R فاصله از محل انفجار (متر)، ρ چگالی خاک (کیلوگرم بر مترمکعب)، n ضریب کاهندگی خاک و C سرعت موج بارگذاری (متر بر ثانیه) پارامترهای مربوط به خاک هستند.

در شکل (۱) منحنی ضریب تأثیرات عمق برحسب عمق مقیاس شده نشان داده شده است.



US Army Corps of Engineers

شکل ۱. ضریب تأثیر عمق در خاک و بتن [۱]

مقادیر C و n پارامترهای مربوط به خاک هستند که به صورت زیر تعریف می‌گردند:

n : توانایی خاک در میرا نمودن انرژی موج انفجار (جدول ۱)

C : سرعت موج بارگذاری است که تابع سرعت لرزه‌ای است. مقدار این ضریب در انواع خاک با روابط زیر به دست می‌آید:

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

که در این رابطه c_s سرعت لرزه‌ای، E مدول الاستیسیته و ρ چگالی خاک است. با افزایش درجه اشباع خاک و کوچک‌تر شدن اندازه دانه‌بندی این پارامتر افزایش می‌یابد.

بی‌شک طراحی یک سازه روزمینی در برابر انفجار دارای هزینه‌های اجرایی بسیار بالایی خواهد بود. برای غلبه بر این مشکل سازه‌های پناهگاهی و زیرزمینی مدفون مورد توجه قرار گرفته‌اند. دلیل انتخاب چنین سازه‌هایی، علاوه بر محصور شدن سازه، مربوط به استفاده از خاصیت میرایی و ویسکوالاستیک خاک است که دامنه موج شوک ناشی از انفجار سطحی را به حداقل می‌رساند. در این موارد امکان صرفه‌جویی در زمینه طراحی و اجرای سازه مقاوم در برابر انفجار وجود خواهد داشت.

جهت طراحی ایمن و اقتصادی این سازه‌ها، لازم است تا برآورد کمی مناسبی از میزان فشار انفجار مدفون در انواع محیط‌های زیرزمینی حاصل شود. در زمینه محاسبه فشار انفجار مدفون در انواع خاک‌ها، تاکنون تحقیقات مختلفی صورت گرفته است.

اهمیت بررسی اثرات انفجار بر روی سازه‌ها سبب شده است تا دستورالعمل‌هایی در زمینه طراحی ساختمان‌ها و فضاهای شهری در برابر انفجار تدوین گردد. دستورالعمل ۱-۸۵۵-۵ TM [۱] که در سال ۱۹۸۶ توسط دپارتمان نیروی زمینی ارتش آمریکا برای سازه‌های مقاوم در برابر انفجار تهیه شد را می‌توان به‌عنوان یکی از اولین دستورالعمل‌هایی دانست که از اوایل دهه ۵۰ میلادی به بعد تهیه و تکمیل شده است. لیانگ و همکاران [۲]، به بررسی فشار انفجار مدفون در انواع خاک‌های ماسه‌ای به روش آزمایشگاهی و مقایسه با روابط دستورالعمل ۱-۸۵۵-۵ TM پرداخته‌اند. امبروسینی و همکاران [۳] طی مجموعه آزمایش‌های سعی نموده‌اند تا میزان فشار انفجار به دست آمده در نرم‌افزار اتوداین را با روش آزمایشگاهی موردسنجش و بررسی قرار دهند.

تحقیقی نیز با عنوان مطالعه مکانیسم تغییر شکل دینامیکی خاک، تحت بارگذاری انفجار توسط وانگ و لو [۴] صورت گرفته است. همچنین وانگ و همکاران [۵] مطالعه‌ای با عنوان شبیه‌سازی عددی روان‌گرایی خاک بر اثر انفجار و اثرات آن بر سازه‌های سطحی انجام دادند. مطالعاتی با محوریت شبیه‌سازی عددی انفجار سطحی بر روی خاک خشک و غیر چسبنده توسط دی [۶] صورت گرفته که در آن رفتار خاک خشک و غیر چسبنده در صورت وقوع یک انفجار سطحی بررسی شده است. فریسنهان و وستین [۷] نیز روابطی برای تعیین بیشینه فشار میدان آزاد در خاک اشباع و غیراشباع پیشنهاد کردند.

قلی زاد و همکاران [۸] به بررسی معادله حالت خاک ماسه‌ای در نرم‌افزار اتوداین پرداخته و روابط اصلاحی ارائه نمودند. مطالعات دیگری نیز در زمینه تأثیر انفجار مدفون در خاک به روش‌های آزمایشگاهی [۹-۱۲] و عددی [۱۳-۱۶] صورت گرفته‌اند.

در این تحقیق، به بررسی میزان فشار انفجار مدفون در انواع

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V'} \right) e^{-R_1 V'} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V'} \right) e^{R_2 V'} + \frac{\omega}{V'} E \quad (۸)$$

در این معادله R_1 ، R_2 ، A ، B و ω ثابت‌های مواد انفجاری خاص هستند، V' حجم وابسته و E انرژی داخلی وابسته است. بنابراین در تحلیل انجام گرفته برای شبیه‌سازی هوا از معادله حالت گاز ایده آل و برای مواد منفجره از معادله حالت JWL استفاده گردیده است.

خاک ماسه‌ای: معادله حالت فشردگی برای موادی همچون خاک کاربرد دارد. در این معادله، اطلاعات مربوط به تغییرات مدول حجمی نسبت به چگالی مورد نیاز است.

این معادله به صورت زیر تعریف می‌گردد [۱۹]:

$$\frac{\partial P}{\partial \rho} = C^2(\rho) \quad (۹)$$

در این رابطه $\frac{\partial P}{\partial \rho}$ تغییرات فشار نسبت به چگالی و C سرعت موج بارگذاری است که نشان می‌دهد رابطه فشار و چگالی به صورت خطی نیست و سرعت موج بارگذاری در ماسه، تابعی از چگالی آن است.

برای تعریف مدول مقاومتی خاک ماسه‌ای از مدل Mo-Granular استفاده شده است. این مدل بسط مدول دراگر- پراگر است، به نحوی که اثرات مرتبط با مواد دانه‌ای را در نظر می‌گیرد.

$$\sigma_y = \sigma_p + \sigma_\rho \quad (۱۰)$$

که در این رابطه σ_y تنش تسلیم کل، σ_p تنش تسلیم وابسته به فشار^۱ و σ_ρ تنش تسلیم وابسته به چگالی^۲ است. در این مدل ماده مقادیر فشار نسبت به تنش تسلیم، چگالی به تنش تسلیم و چگالی نسبت به مدول برشی خاک‌های ماسه‌ای مورد نیاز است.

۱-۲- روش RSM

روش RSM مجموعه‌ای از ابزارهای آماری برای طراحی آزمایش‌ها، تولید مدل‌های ریاضی و ارزیابی تأثیرات عوامل آزمایش و بهینه‌سازی روند است [۲۰]. داده‌های حاصل از آزمون‌های تجربی، برای توسعه مدل‌های ریاضی از طریق تکنیک‌های آماری استفاده می‌شود. فاکتوری به نام F تعیین‌کننده اهمیت پارامترها است. تناسب مدل با ضریب رگرسیون (R^2) و تأثیر عوامل آزمایش توسط تحلیل واریانس ارزیابی می‌شود. معادلات زیر به ترتیب نمونه‌های ساده‌ای از مدل‌های خطی، برهم‌کنش دومتغیره و درجه دوم برای ۲ متغیر مستقل است [۲۱]:

$$Y = C_0 + C_1 X_1 + C_2 X_2 \quad (۱۱)$$

$$Y = C_0 + C_1 X_1 + C_2 X_2 + C_{12} X_1 X_2 \quad (۱۲)$$

برای رس فوق اشباع:

$$C = c_s \quad (۳)$$

برای رس اشباع:

$$C = 0.6c_s + \left(\frac{n+1}{n-2} \right) V_0 > c_s \quad (۴)$$

برای ماسه:

$$C = 0.6c_s + \left(\frac{n+1}{n-2} \right) V_0 > c_s \quad (۵)$$

حداکثر سرعت ذره‌ای خاک:

$$V_0 = 48.8 f_c \left(\frac{2.52R}{w^{1/3}} \right)^{-n} \quad (۶)$$

مقادیر C_s و n برای انواع خاک‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. تعریف پارامترهای C_s و n در خاک‌های مختلف [۱]

n	C_s (m/s)	ρ (kg/m ³)	نوع خاک
۱/۵	<۱۵۲۴	۲۰۲۸-۱۹۹۲	رس به شدت اشباع
۲/۲۵ - ۲/۵	۱۵۲۴	۱۹۸۴-۱۷۶۰	رس اشباع
۲/۵	۵۴۸/۶۴	۱۷۶۴	رس شنی بسیار مرطوب
۲/۵	۴۸۷/۶۸	۲۰۰۲-۱۹۲۲	شن و ماسه متراکم
۲/۷۵	۳۰۴/۸	۱۹۸۶	ماسه خشک تراکم متوسط
۳ - ۳/۲۵	۱۸۲/۸۸	۱۶۰۱-۱۴۸۹	ماسه خشک تراکم پایین

۱-۱- مدل مصالح

در فرایند شبیه‌سازی، از سه نوع ماده هوا، ماده منفجره و خاک ماسه‌ای استفاده شده است که نحوه تعریف این مصالح در ادامه آورده شده است.

هوا: برای مدل‌سازی هوا از معادله حالت گاز ایده‌آل که یکی از ساده‌ترین شکل‌های معادله حالت است، استفاده می‌گردد. این معادله حالت در بسیاری از کاربردهای مربوط به گازها استفاده می‌شود. این معادله از قانون بویل و گیلوساک نتیجه‌گیری می‌شود [۱۷]:

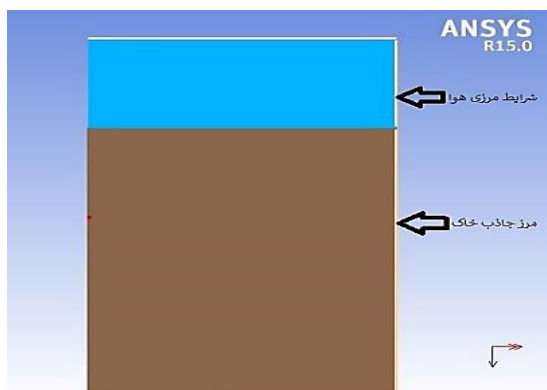
$$P = (\gamma - 1)\rho e \quad (۷)$$

که در این رابطه P فشار گاز ایده‌آل (پاسکال)، γ توان آدیاباتیک، ρ چگالی هوا (کیلوگرم بر متر مکعب) و e انرژی داخلی (ژول) است.

ماده منفجره: معادله حالت JWL برای تشریح محصولات حاصل از انفجار مواد منفجره سرعت‌بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. این معادله حالت، ارتباط بین فشار، حجم متغیر و انرژی داخلی را بیان می‌کند و به صورت رابطه (۸) تعریف می‌شود [۱۸].

^۱ Pressure yield stress

^۲ Density yield stress



شکل ۲. شرایط مرزی برای مدل ایجاد شده در اتوداین

با انجام تحلیل حساسیت مش، ابعاد مش بهینه ۲۵ میلی‌متر به دست آمد؛ منتها با توجه به تمرکز بالای تنش در مجاورت ماده منفجره، ابعاد مش‌ها در این نواحی ۱۰ میلی‌متر اعمال شد.

۲-۱-۲- تعریف مصالح

مشخصات هوا: همان‌طور که در بخش ۱-۲-۲ اشاره شد برای شبیه‌سازی هوا از معادله حالت گاز ایده آل و مطابق جدول (۲) استفاده شده است [۱۷].

جدول ۲. مشخصات هوا [۱۷]

مقادیر	ضرایب مربوط معادله حالت هوا
۱/۴۱	γ
۱/۲۲۵ (kg/m ³)	ρ
۲۰۶۸۰۰ (Kj)	e

مشخصات ماده منفجره: با توجه به بخش ۱-۲-۲، معادله حالت JWL برای تعریف رفتار ماده منفجره TNT به‌کار می‌رود (جدول ۳) [۱۸].

جدول ۳. ضرایب مربوط به معادله حالت ماده منفجره TNT [۱۸]

مقادیر	ضرایب مربوط به ماده منفجره TNT
$3/73 \times 10^{11}$	A
$3/74 \times 10^9$	B
۴/۲۰	R1
۰/۹	R2
۰/۳۴	ω
۶۹۳۰	سرعت بارگذاری (m/s)
۱۶۳۰	چگالی (Kg/m ³)

مشخصات خاک ماسه‌ای: همان‌طور که گفته شد، برای شبیه‌سازی خاک ماسه‌ای در اتوداین از مدل مصالح Compaction-Granular استفاده می‌گردد. ضرایب این مدل برای خاک ماسه تحقیق لاین از شکل‌های (۴-۶) به دست می‌آید [۱۹].

در این تحقیق، از ۱۶ مدل خاک ماسه‌ای با درجات مختلف اشباع و از منابع معتبر علمی استفاده شده است [۲۲-۲۵]. مشخصات این خاک‌ها به‌طور خلاصه در جدول (۴) ارائه شده است.

$$Y = C_0 + C_1 X_1 + C_2 X_2 + C_{12} X_1 X_2 + C_{11} X_{12} + C_{22} X_{22} \quad (13)$$

در روابط بالا Y پاسخ، X_1 و X_2 متغیرهای وابسته و C_0 ، C_i ، C_{ij} و C_{ij} به ترتیب عرض از مبدأ، ضرایب خطی، درجه دوم و برهم‌کنش است.

۲- روش تحقیق

همان‌طور که اشاره شد در این پژوهش، هدف این است که میزان فشار انفجار مدفون در انواع خاک‌های دانه‌ای با دقت مناسب مورد ارزیابی قرار گیرد و سپس نتایج حاصل، با روابط ۱-۸۸-۵ TM مقایسه شود. با توجه به اینکه در این تحقیق، دقت محاسبه فشار انفجار مدفون مورد تأکید است بنابراین لازم است تا از روش‌های با دقت بالا استفاده شود. برای این منظور، یک مدل عددی پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود اتوداین مورد بهره قرار گرفته است.

ابعاد محیط ایجاد شده به طول و عرض ۸ متر بوده که برای تحلیل آسان‌تر از تقارن محوری استفاده شده است (طول ۸ متر و عرض ۴ متر). از طول مذکور مقدار ۶ متر به بخش خاک اختصاص یافته است. در این تحقیق، میزان فشار انفجار مدفون، در ۳ وزن ماده منفجره (۲، ۳ و ۴ کیلوگرم)، در ۸ فاصله مختلف و برای ۱۶ خاک متفاوت ماسه‌ای با استفاده از مدل پیشنهادی محاسبه شد (۳۸۴ خروجی مختلف).

۲-۱-۲- مدل عددی پیشنهادی

۲-۱-۱-۲- شبیه‌سازی در نرم‌افزار اتوداین

همان‌طور که اشاره شد در این تحقیق، از نرم‌افزار اجزای محدود اتوداین جهت مدل‌سازی انفجار مدفون در خاک ماسه‌ای استفاده شده است. با توجه به تغییر شکل‌های بزرگ نزدیک ماده منفجره که باعث اعوجاج و گسیختگی شدید در آن ناحیه می‌شود، استفاده از مدل با رویکرد لاگرانژی مقدور ناست. 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. فلذا در این تحقیق، محیط هوا به‌صورت اویلری و بخش‌های مربوط به خاک و ماده منفجره به‌صورت لاگرانژی مدل می‌شوند. جهت کاهش حجم محاسبات، تحلیل به‌صورت دوبعدی و تقارن محوری انجام می‌گیرد.

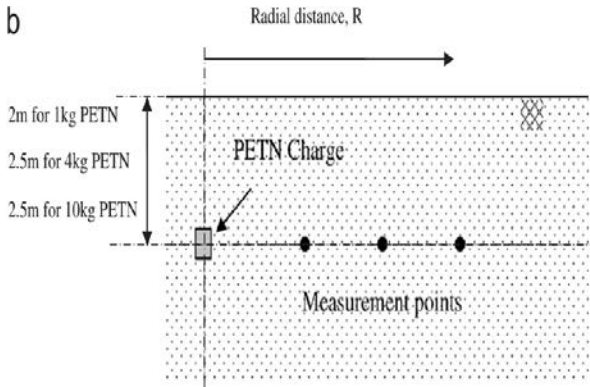
در مدل پیشنهادی، از گزینه flowout برای اعمال شرایط مرزی هوا و از گزینه Transmit برای اعمال شرایط مرزی خاک (مرز جاذب یا مرز نیمه بی‌نهایت) استفاده می‌گردد (شکل ۲).

جدول ۴. مشخصات خاک‌های ماسه‌ای [۲۲-۲۵]

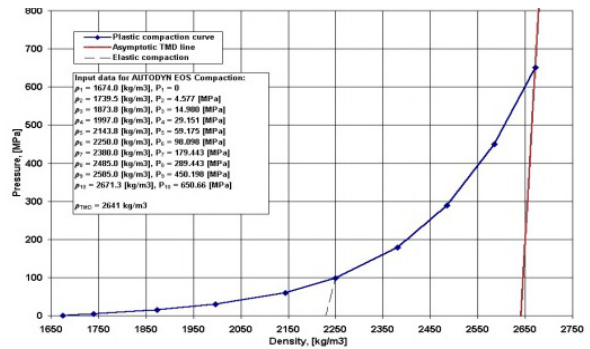
شماره خاک	نوع خاک	چگالی ρ (kg/m ³)	سرعت بارگذاری موج C (m/s)	ضریب کاهندگی n
S1	ماسه لاین	۱۶۷۴	۲۶۵/۲	۳
S2	ماسه خشک	۱۶۹۰	۴۰۰	۲/۷۵
S3	ماسه خشک با ۱۵ درصد رس	۱۶۳۷	۵۲۸/۲	۲/۵
S4	ماسه خشک با ۳۰ درصد شن	۱۹۱۳	۲۱۸/۱۸	۳/۲۵
S5	ماسه نوادا	۱۶۰۰	۳۰۱	۲/۷۵
S6	ماسه رسی خشک	۱۴۶۸	۸۵۹	۲/۵
S7	ماسه با ۵۰ درصد رس	۱۸۳۰	۸۲۷	۲/۵
S8	ماسه با درصد بالای رس	۱۹۱۰	۱۵۰۰	۱/۵
S9	ماسه لاین نیمه اشباع	۱۸۵۷	۳۵۰/۸۶	۲/۷۵
S10	ماسه لاین اشباع	۲۰۵۰	۳۸۳۷	۱/۵
S11	ماسه اشباع با ۱۵ درصد رس	۱۹۹۳	۳۵۵۵	۱/۵
S12	ماسه اشباع با ۳۰ درصد شن	۲۰۶۲	۵۰۱۶	۱/۵
S13	ماسه اشباع	۲۰۴۶	۳۸۱۲	۱/۵
S14	ماسه رسی نیمه اشباع	۱۶۱۳	۲۴۲۶/۴	۱/۵
S15	ماسه رسی اشباع	۱۷۵۸	۳۱۸۹	۱/۵
S16	ماسه با درصد پایین رس	۱۷۵۲	۴۷۲/۸	۱/۵

جدول ۵. مشخصات خاک‌های آزمایش شده لیانگ و همکاران [۲]

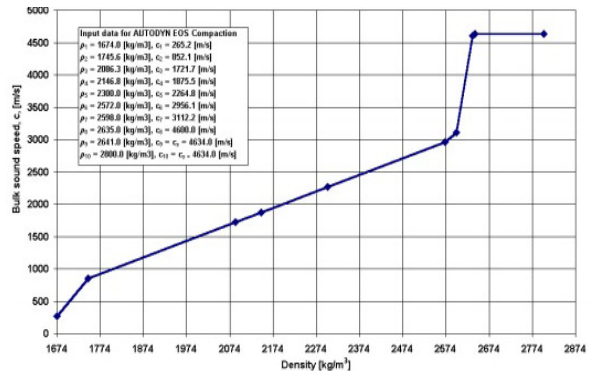
نوع خاک	چگالی (kg/m ³)	سرعت موج بارگذاری (m/s)
خاک ماسه‌ای	۱۶۵۰	۲۲۵
خاک رسی	۱۹۰۰	۱۳۸۰



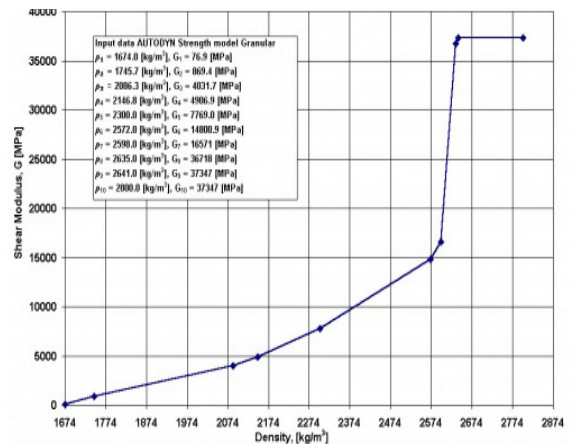
شکل ۷. نحوه قرارگیری مواد منفجره در خاک ماسه‌ای [۲]



شکل ۴. نمودار فشار- چگالی خاک ماسه‌ای [۱۹]



شکل ۵. نمودار چگالی- سرعت بارگذاری خاک ماسه‌ای [۱۹]



شکل ۶. نمودار چگالی- مدول برشی خاک ماسه‌ای [۱۹]

۲-۲- صحت‌سنجی روش عددی پیشنهادی

به‌منظور اطمینان از صحت مدل عددی پیشنهادی، از تحقیق لیانگ و همکاران [۲]، با موضوع بررسی آزمایشگاهی فشار انفجار مدفون در دو نوع خاک و مقایسه آن با نتایج ۱-۸۵۵-۵ TM، استفاده شده است. در این تحقیق دو نوع خاک مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته‌اند. در جدول (۵) مشخصات این دو نوع خاک آورده شده است.

ماده منفجره PETN در سه وزن مختلف ۱، ۴ و ۱۰ کیلوگرم در فواصل ۲ و ۲/۵ متری از سطح خاک قرار گرفته و پس از انفجار مقدار فشار ناشی از انفجار مدفون در فواصل ۱، ۲ و ۳ متری از ماده منفجره توسط دستگاه فشارسنج اندازه‌گیری شده است. در شکل (۷) نحوه قرارگیری ماده منفجره و نقاط اندازه‌گیری فشار در خاک نشان داده شده است.

از آنجایی که در شبیه‌سازی صورت گرفته خاک در محیط هوا جایگذاری شده است، فشار هوای محیط برابر یک اتمسفر (۱۰۰ کیلوپاسکال) از مقادیر فشار به‌دست‌آمده کسر می‌شود. مقایسه خروجی‌های فشار از انفجار یک کیلوگرم ماده منفجره PETN در عمق ۲ متری خاک ماسه‌ای در فواصل ۲/۱ و ۳ متری در آزمایش، مدل پیشنهادی و رابطه ۱-۸۵۵-۵ TM طبق جدول (۶) به‌دست‌آمده است.

جدول ۶. مقایسه فشار به‌دست‌آمده از انفجار یک کیلوگرم ماده منفجره PETN در عمق ۲ متری خاک ماسه‌ای در انواع روش‌ها

فاصله از ماده منفجره (m)	فشار اندازه‌گیری شده (Mpa)	
	رابطه ۱-۸۵۵-۵ TM پیشنهادی	آزمایش لیانگ و همکاران
۱	۵/۱۳	۱/۳۴
۲	۰/۹۱	۰/۱۶
۳	۰/۳۳	۰/۰۴

طبق نتایج به‌دست‌آمده از جدول فوق، نتایج شبیه‌سازی عددی پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی تطابق قابل قبولی دارند؛ همچنین، خطای زیاد رابطه ۱-۸۵۵-۵ TM در محاسبه فشار مشهود است و ضرورت بازنگری در این رابطه احساس می‌شود.

۳- نتایج و بحث

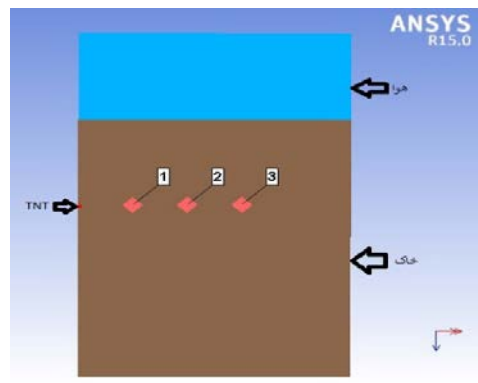
۳-۱- محاسبه فشار انفجار مدفون در انواع خاک‌های ماسه‌ای با استفاده از مدل عددی پیشنهادی

همان‌طور که در بخش ۲-۱ بیان شد، در این تحقیق، میزان فشار انفجار مدفون در ۳ وزن ماده منفجره (۳/۲ و ۴ کیلوگرم)، در ۸ فاصله مختلف و برای ۱۶ خاک متفاوت ماسه‌ای با استفاده از مدل عددی پیشنهادی محاسبه شده است (۳۸۴ خروجی مختلف). به‌عنوان نمونه، در جدول (۷)، فشار انفجار مدفون با ۴ کیلوگرم ماده منفجره TNT و در عمق ۲ متری خاک، در ۴ نوع خاک ماسه‌ای (خاک‌های شماره ۱ الی ۴ جدول (۴)) در فواصل مختلف نشان داده شده است و با مقادیر رابطه ۱-۸۵۵-۵ TM مقایسه شده است.

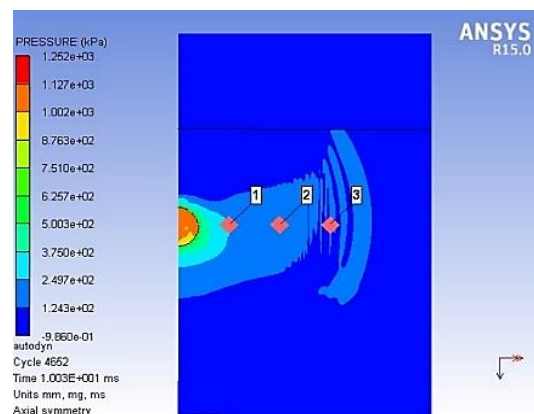
جدول ۷. مقادیر فشار اندازه‌گیری شده در ۴ نوع خاک با مدل عددی

نوع خاک	فشار اندازه‌گیری شده (MPa)			
	فاصله ۱ متری		فاصله ۲ متری	
	رابطه عددی Tm	رابطه عددی Tm	رابطه عددی Tm	رابطه عددی Tm
S1	۵/۴۲	۱/۱۱	۰/۶۷۶	۰/۲۰۱
S2	۹/۲۶	۳/۳۶	۱/۳۸	۰/۴۵۱
S3	۳۲/۷	۲۱/۲	۵/۸۷	۲/۱
S4	۴/۵	۱/۴	۰/۴۷۷	۰/۱۲۸

برای صحت‌سنجی مدل پیشنهادی، آزمایش یک کیلوگرم ماده منفجره PETN در خاک ماسه‌ای با عمق مدفون ۲ متر مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه ماسه لاین نزدیک‌ترین تطابق ساختاری را با خاک تحقیق لیانگ و همکاران داراست، برای شبیه‌سازی از پارامترهای این خاک استفاده می‌شود. در شکل (۸) شبیه‌سازی آزمایش مذکور با استفاده از نرم‌افزار اتوداین و مدل پیشنهادی و در شکل (۹) کانتور فشار انفجار در شبیه‌سازی عددی نشان داده شده است.

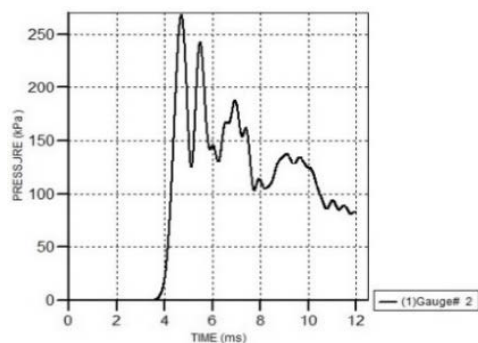


شکل ۸. شبیه‌سازی آزمایش لیانگ و همکاران با مدل پیشنهادی

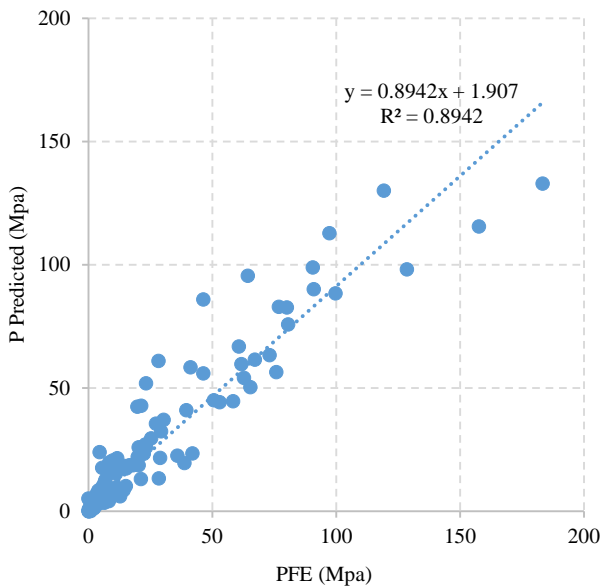


شکل ۹. کانتور فشار شبیه‌سازی عددی در اتوداین

پس از اتمام فرایند شبیه‌سازی، نمودار فشار-زمان در نقاط مشخص شده استخراج شده و با نتایج آزمایش مقایسه می‌شود. به‌عنوان مثال، در شکل (۱۰) نمودار فشار-زمان در نقطه شماره ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۰. خروجی شبیه‌سازی انفجار با اتوداین در فاصله‌ی دو متری از ماده منفجره



شکل ۱۲. عملکرد مدل ساخته‌شده به روش RSM

جدول ۸. رگرسیون مدل RSM

۰/۸۹۴۲	R^2
۰/۸۷۹۲	R^2 تعدیل یافته
۰/۸۵۶۳	R^2 پیش‌بینی شده
۵۹/۱۲	ضریب تغییر (C.V)

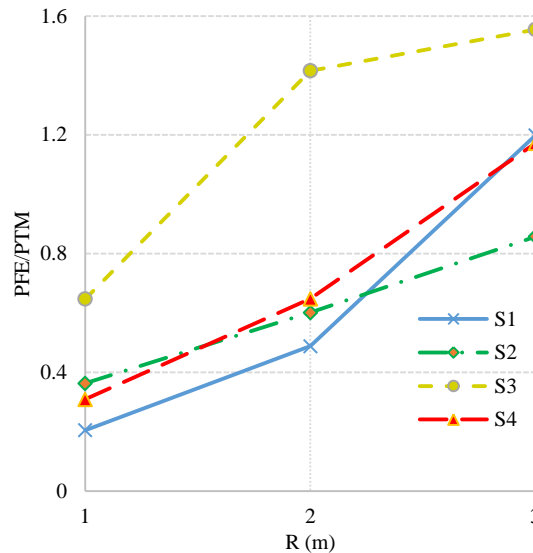
طبق جدول (۸) مقدار R^2 یا همان ضریب همبستگی داده‌ها نزدیک ۰/۹ است که از نظر آماری قابل قبول است. بعد از اطمینان از صحت و دقت قابل قبول روش RSM، رابطه (۱۴) برای محاسبه فشار انفجار مدفون در خاک‌های ماسه‌ای برحسب مگاپاسکال استخراج می‌گردد. ضرایب به کار رفته در این رابطه، همان ضرایب تعریف‌شده در رابطه ۱-۸۵۵-۵ TM که در بخش ۱-۲-۱ معرفی شد، هستند.

برای برآورد صحت و دقت رابطه استخراجی، بخشی از اطلاعات آماری نگه داشته شده و برای استخراج رابطه از آن‌ها استفاده نشده است. این داده‌ها برای ارزیابی میزان دقت رابطه پیشنهادی استفاده شده است.

$$P = [-5.2e^8 + (4.5e^5\rho) + (2.3e^6C) + (6.4e^7n) - (1.58e^6W) + (6.2e^6R) - (2.29e^3\rho C) - (3.24e^4pn) - (7.45e^2\rho R) - (1.16e^5Cn) + (7.09e^3CW) - (1.34e^4CR) + (4.88e^5WR) - (94.2\rho^2) - (4.87C^2) - (1.04e^6R^2) + (51.58\rho Cn) - (4.38\rho CR) - (2.27e^3CWR) + (0.59\rho^2C) + (4.16e^3CR^2) - (1.01e^{-3}C^6)].e^{-6}.f_c \quad (14)$$

با توجه به رابطه ۱۴، مهمترین پارامتر تاثیرگذار در تعیین فشار انفجار مدفون در خاک‌های ماسه‌ای، به ترتیب ضریب کاهندگی (n)، فاصله (R)، سرعت بارگذاری موج (C) و وزن ماده منفجره (W) است.

همان‌طور که از این جدول مشخص است و در بخش صحت‌سنجی نیز مشاهده شد، بین مقادیر رابطه ۱-۸۵۵-۵ TM و مقادیر مدل عددی صحت‌سنجی شده اختلافات فاحشی وجود دارد و لزوم ارتقای رابطه TM احساس می‌شود. در شکل (۱۱)، نسبت فشار محاسبه‌شده با شبیه‌سازی عددی به فشار به‌دست‌آمده از رابطه TM نشان داده شده است.



شکل ۱۱. نسبت فشار محاسبه‌شده با شبیه‌سازی عددی به فشار به‌دست‌آمده از رابطه TM

اختلاف مقادیر شبیه‌سازی عددی با رابطه ۱-۸۵۵-۵ TM در این نمودار نیز مشهود است و لزوم بازنگری در رابطه TM اثبات می‌شود.

۳-۲- استخراج رابطه دقیق محاسبه فشار انفجار مدفون با استفاده از روش RSM

همان‌طور که در بخش مقدمه بیان شد روش RSM از جمله روش‌های موجود برای بهینه‌سازی خروجی‌های حاصل از شبیه‌سازی عددی و به‌دست آوردن رابطه‌ای متناسب با این نتایج استفاده است.

داده‌های ورودی روش RSM، همان ۳۸۴ فشار استخراج‌شده در ۱۶ نوع خاک ماسه‌ای و در مدل عددی پیشنهادی بوده است. به‌منظور ساخت مدل RSM از نسخه ۱۰ نرم‌افزار Design Expert استفاده شده است. این نرم‌افزار امکان برآزش، تحلیل و مقایسه توابع مختلف اعم از خطی، برهمکنش (2FI) و چندجمله‌ای را فراهم می‌آورد. همچنین صحت مدل با استفاده از آزمون فیشر سنجیده شد و دقت عملکرد مدل به‌وسیله ضریب رگرسیون (R^2) مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌علاوه تأثیر متغیرهای ورودی بر روی مقاومت فشاری با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA) بررسی شد. در شکل (۱۲) عملکرد مدل ساخته‌شده به روش RSM و در جدول (۸)، رگرسیون مدل RSM نشان داده شده است.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت محاسبه دقیق فشار وارد بر سازه‌های مدفون و زیرزمینی و عدم دقت مناسب روابط موجود، در این پژوهش به بررسی میزان فشار انفجار مدفون در انواع خاک‌های ماسه‌ای با دقت مناسب پرداخته شد. برای این منظور، از یک مدل عددی پیشنهادی در نرم‌افزار اجزای محدود اتوداین استفاده شد. پس از صحت‌سنجی مدل مذکور با تحقیق آزمایشگاهی لیانگ و همکاران [۲] و اطمینان از صحت و دقت مدل پیشنهادی، فشار حاصل از انفجار مدفون (با مقادیر مختلف ماده منفجره و در فواصل مختلف) در ۱۶ نوع خاک ماسه‌ای استخراج شد. در ادامه، با مقایسه فشارهای محاسبه شده توسط رابطه ۱- ۸۵۵- ۵ TM با نتایج آزمایش لیانگ و همکاران و همچنین نتایج مدل اجزای محدود پیشنهادی، مشخص شد که رابطه TM، در طیف وسیعی از انفجارها و خاک‌های مختلف، از دقت کافی برخوردار نیست. فلذا، جهت ارتقای دقت رابطه TM برای خاک‌های ماسه‌ای، ۳۸۴ خروجی فشار در انواع مختلف خاک‌ها، ماده منفجره و فاصله از انفجار با استفاده از مدل اجزای محدود به دست آمد. در انتها، با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) و نرم‌افزار Design Expert، رابطه‌ای با دقت مناسب جهت محاسبه فشار در این خاک‌ها ارائه شده است. ضریب رگرسیون این رابطه برابر ۰/۸۹ به‌دست آمد که نشان از دقت مناسب رابطه استخراج‌شده با روش RSM است.

۵- مراجع‌ها

- [9] Feldgun, V.; Karinski, Y.; Yankelevsky, D. "The Effect of an Explosion in a Tunnel on a Neighboring Buried Structure"; Tunnel. Underground Space Technol. 2014, 44, 42-55.
- [10] Jiang, N.; Zhou, C. "Blasting Vibration Safety Criterion for a Tunnel Liner Structure"; Tunnel. Underground Space Technol. 2012, 32, 52-57.
- [11] Papanikolaou, V. K.; Kappos, A. J. "Practical Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Tunnel Linings"; Tunnel. Underground Space Technol. 2014, 40, 127-140.
- [12] Blanchat, T. K.; Davie, N. T.; Calderone, J. J. "Development of Explosive Event Scale Model Testing Capability at Sandia's Large Scale Centrifuge Facility"; No. SAND-98-0270. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM (United States), 1998.
- [13] Ohno, T. "Study on Structural Response to Explosion of Explosives and Blast Resistance Design"; National Defense Academy of Japan, 2008.
- [14] Nagy, N.; Mohamed, M.; Boot, J. C. "Nonlinear Numerical Modeling for the Effects of Surface Explosions on Buried Reinforced Concrete Structures"; Geomechanics Eng. 2010, 2, 1-18.
- [15] Yang, Z. "Finite Element Simulation of Response of Buried Shelters to Blast Loadings"; Finite Elem. Anal. Des. 1997, 24, 3, 113-132.
- [16] Castro, J. S.; Bryson, L. S.; Gamber, N. K.; Lusk, B. T. "Numerical Modeling of Subsurface Blasting"; Pan-Am CGS, Geotechnical Conference, 2011.
- [17] Rogers, G. F. C.; Mayhew, Y. R. "Thermodynamic and Transport Properties of Fluids"; John Wiley & Sons, 1995.
- [18] Lee, E.; Finger, M.; Collins, W. "JWL Equation of State Coefficients for High Explosives"; No. UCID-16189. Lawrence Livermore National Lab.(LLNL), Livermore, CA (United States), 1973.
- [19] Laine, L.; Sandvik, A. "Derivation of Mechanical Properties for Sand"; Proc. 4th Asia-Pacific Conf. Shock and Impact Loads on Structures 2001, 361, 368.
- [20] Gunst, R. F. "Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments"; Technometrics 1996, 38, 284-286.
- [21] Hosseini, S. A.; Tavana, A.; Abdolahi, S. M.; Darvishmaslak, S. "Prediction of Blast-induced Ground Vibrations in Quarry Sites: a Comparison of GP, RSM and MARS"; J. Soil Dyn. 2019, 119, 118-129.
- [22] Laine, L. "Study of Planar Ground Shock in Different Soils and Its Propagation around a Rigid Block"; 77th Shock and Vibration Symposium, 2006.
- [23] Gruzicic, M.; Bell, W. C. "A Computational Analysis of Survivability of a Pick-up Truck Subjected to Mine Detonation Loads"; Multidiscip. Model. Mater. Struct. 2011, 7, 386-423.
- [24] Gruzicic, M.; Pandurangan, B.; Coutris, N.; Cheeseman, B. A.; Roy, W. N.; Skaggs, R. R. "Derivation, Parameterization and Validation of a Sandy-Clay Material Model for Use in Landmine Detonation Computational Analyses"; J. Mater. Eng. Perform. 2010, 19, 434-450.
- [25] Gruzicic, M.; Pandurangan, B.; Summers, J. D.; Cheeseman, B. A.; Roy, W. N.; Skaggs, R. R. "Application of the Modified Compaction Material Model to the Analysis of Landmine Detonation in Soil with Various Degrees of Water Saturation"; Shock Vib. 2007, 14, 1-21.
- [1] "Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons"; US Department of the Army, Technical Manual, TM. 1986, 1, 5-855.
- [2] Leong, E. C.; Anand, S.; Cheong, H. K.; Lim, C. H. "Re-examination of Peak Stress and Scaled Distance due to Ground Shock"; Int. J. Impact Eng. 2007, 34, 1487-1499.
- [3] Ambrosini, D.; Luccioni, B. "Effect of Underground Explosions on Soil and Structures"; Undergr. Space. 2019, 5, 324-338.
- [4] Wang, Z.; Lu, Y. "Numerical Analysis on Dynamic Deformation Mechanism of Soils under Blast Loading"; Soil Dyn. Earthq. Eng. 2003, 23, 705-714.
- [5] Wang, Z.; Lu, Y.; Bai, Ch. "Numerical Simulation of Explosion-Induced Soil Liquefaction"; Finite Elem. Anal. Des. 2011, 47, 1079-1090.
- [6] De, A. "Numerical Simulation of Surface Explosion over Dry Cohesionless Soil"; Comput. Geotech. 2012, 43, 72-79.
- [7] Westine, P. S.; Friesenhahn, G. J. "Free-field Ground Shock Pressures from Buried Detonations in Saturated and Unsaturated Soils"; Southwest Foundation for Research and Education San Antonio Tx, 1983.
- [8] Gholizad, A.; Rajabi, M.; Yazdan, H. "Simulation of Subsurface Explosion in Sandy Soil by Modifying the Sand Density Equation Equation"; 2nd National Conference on Structure-Earthquake, 2012. (In Persian).