

شبه‌سازی عددی روانگرایی خاک ماسه‌ای تحت اثر بارگذاری انفجاری

مهدی خداپرست^{۱*}، مهرداد مقبلی^۲

۱- دانشیار، ۲- کارشناس ارشد، دانشگاه قم، قم، ایران

(دریافت: ۹۸/۰۳/۰۵، پذیرش: ۹۸/۰۷/۰۶)

چکیده

وقوع انفجار در خاک‌های ماسه‌ای اشباع می‌تواند باعث شود تا مقاومت برشی خاک به صفر میل کرده و خاک، رفتاری سیال گونه از خود نشان دهد. در این حالت در واقع فشار آب منفذی آن قدر بالا می‌رود که تماس بین دانه‌های خاک از بین رفته و تنش مؤثر بین دانه‌های خاک برابر صفر می‌گردد. امروزه با توجه به قرارگیری برخی سازه‌ها بر روی خاک‌های روانگرا شناخت رفتار این خاک‌ها اهمیت بسزایی دارد. در این تحقیق به بررسی روانگرایی خاک ماسه‌ای ناشی از انفجار پرداخته شده است. برای این منظور از یک مدل المان محدود سه‌بعدی در نرم‌افزار LS-dyna استفاده شده که در آن ماده منفجره در عمق ۵ متری از خاک ماسه‌ای قرار دارد. در این خصوص تنش‌های ناشی از انفجار در خاک و محدوده روانگرایی خاک، بررسی گردید. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش وزن ماده منفجره H6 از ۷/۵ کیلوگرم به ۷۵ کیلوگرم محدوده روانگرایی خاک یانگ لی از ۴/۵ متر به ۱۶ متر افزایش یافته و همچنین با تغییر ماده منفجره از H6 به TNT محدوده روانگرایی ماسه کاهش یافته است.

کلیدواژه‌ها: روانگرایی، انفجار، مدل‌سازی عددی، LS-DYNA

Numerical Simulation of Blast Induced Soil Liquefaction

M. Khodaparast^{*}, M. Moghbeli

University of Qom

(Received: 26/05/2019; Accepted: 28/09/2019)

Abstract

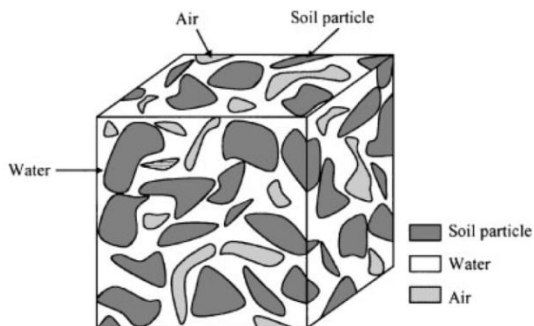
The occurrence of the explosion in the saturated sandy soils can cause the shear resistance of the soil to tend to zero and show the fluidal behavior. In this case, in fact, stress is removed from solid soil particles and exerted on the pore water pressure. Nowadays, considering the multiplicity of construction on the soils prone to the liquefaction and the terrorist and military attacks, the recognition of the behavior of these soils is important. In this research, the liquefaction of sandy soils under the explosion loading has been investigated. For this purpose, a 3D finite element model was employed in the LS-Dyna software, in which the explosive is located at the depth of 5 meters in the sandy soil. In this regard, the stresses induced by the explosion in the soil and the soil liquefaction range were investigated. The results show that by increasing the weight of the H6 explosive from 7.5kg to 75kg, the Yang Li soil liquefaction range, increased from 4.5m to 16m, also by modifying the explosive from H6 to TNT the soil liquefaction range was reduced.

Keywords: Liquefaction, Blast, Numerical Simulation, LS-DYNA

* Corresponding Author E-Mail: Khodaparast@Qom.Ac.Ir

۱. مقدمه

حفره‌ای و وقوع روانگرایی تحت اثر انفجار انجام شده است [۷-۹]. آقای ژانگ و همکاران در این رابطه تحقیقات جامعی انجام داده و در این راستا یک مدل سه فازی از خاک ارائه نمودند و در نرم‌افزار Autodyn به بررسی روانگرایی ناشی از انفجار پرداخته‌اند [۱۰-۱۳]. در مدل ژانگ و همکاران خاک از بخش‌های ذره‌های جامد خاک، آب و هوا تشکیل شده است که در شکل (۲) نمایی کلی از آن نشان داده شده است.

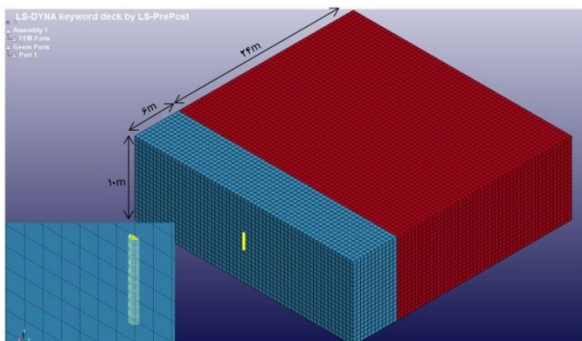


شکل ۲. نمایی از هندسه مدل ژانگ و همکاران [۱۱]

در این مطالعه به بررسی روانگرایی خاک ناشی از انفجار به وسیله شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار المان محدود LS-dyna [۱۴] پرداخته می‌شود. در ادامه ابتدا توضیحاتی در مورد نحوه مدل‌سازی داده شده و سپس نتایج گسترش تنش در خاک ارائه می‌گردد. همچنین نتایج مدل با آزمایش‌های شیم [۳] و مدل‌سازی جایاسینگ و همکاران [۱۵] صحت‌سنجی می‌شود.

۲. روش تحقیق

در این تحقیق در فرآیند مدل‌سازی برای کاهش زمان آنالیز، تقارن محوری در مدل به کار برده شد و نیمی از محیط خاک و ماده انفجاری مدل‌سازی شد. شکل (۳) نمایی از مدل را نمایش می‌دهد.



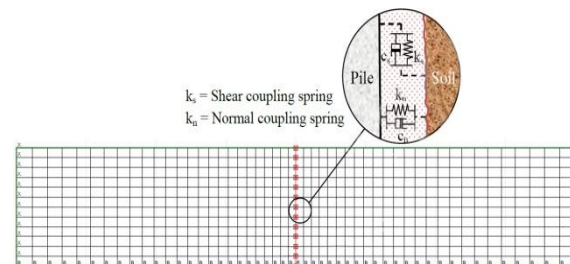
شکل ۳. نمایی از هندسه مدل ساخته شده

برای تمام پارت‌های مدل از المان‌های ۸ گره‌ای استفاده شد. برای خاک‌های نزدیک به ماده منفجره به دلیل کرنش زیاد خاک در این محدوده مش ALE مورد استفاده قرار گرفت. قسمت ماده منفجره نیز به صورت اولری مش‌بندی شد. مابقی المان‌های خاک

روانگرایی خاک پدیده‌ای است که خاک تحت اثر بارگذاری دینامیکی مقاومت برشی خود را برای مدت کوتاهی از دست داده و رفتاری سیال گونه خواهد داشت. این پدیده در خاک‌های ماسه‌ای اشباع به وقوع می‌پیوندد. بارهای دینامیکی وارده به خاک را می‌توان در دو دسته بار زلزله و بار انفجار تقسیم‌بندی کرد. بارگذاری زلزله عموماً دارای شدت کمتری نسبت به بار انفجار است و در مقابل در بازه زمان بیشتری اعمال می‌شود که این موضوع رفتار خاک روانگرا تحت این دو بارگذاری را متفاوت می‌کند.

انجام آزمایش‌های انفجار میدانی در مقیاس بزرگ برای بررسی روانگرایی، هزینه زیاد و محدودیت‌های خاصی را دارا است. از سوی دیگر روابط تجربی موجود در این زمینه، وابستگی زیادی به شرایط سایت و نحوه انجام آزمایش دارد. از این رو روش‌های عددی گزینه مناسبی برای شناخت و پیش‌بینی رفتار خاک‌های روانگرا تحت بارگذاری انفجاری است.

تاکنون مطالعات زیادی در مورد بهسازی و کاهش پتانسیل روانگرایی انجام گرفته است [۱-۲]. یاسودا و هاشیموتو به بررسی جلوگیری از روانگرایی به وسیله کاهش سطح آب زیرزمینی و استفاده از زهکشی پرداختند. هوانگ و ون نیز روش‌های مختلف کاهش روانگرایی را بررسی و دسته‌بندی کردند و روش‌های جدیدتری از جمله بیوگاز، تزریق هوا، گروت سوسپانسیون بنتونیت و غیره را ارائه و پیشنهاد دادند. شیم [۳] به مطالعه پاسخ شمع مدفون در خاک روانگرا تحت بارگذاری انفجار به روش سانتریفیوژ پرداخت. همچنین برن [۴] نیز به شبیه‌سازی روانگرایی به وسیله سانتریفیوژ پرداخته است. با پیشرفت نرم‌افزارهای کامپیوتری، مطالعه عددی و شبیه‌سازی پدیده روانگرایی توسعه فراوانی یافت. خدپرست و حسینی [۵] تأثیر فاصله بین شمع‌ها در گروه شمع تحت بارگذاری انفجار را مورد بررسی قرار دادند. اسعدی و شریفی‌پور [۶] به مدل‌سازی روانگرایی خاک ناشی از زلزله با وجود شمع در خاک بر اساس شکل (۱) پرداختند.



شکل ۱. نمایی از هندسه مدل و اندرکنش خاک و شمع [۶]

همچنین مطالعات متعددی با موضوع مدل‌سازی افزایش فشار آب

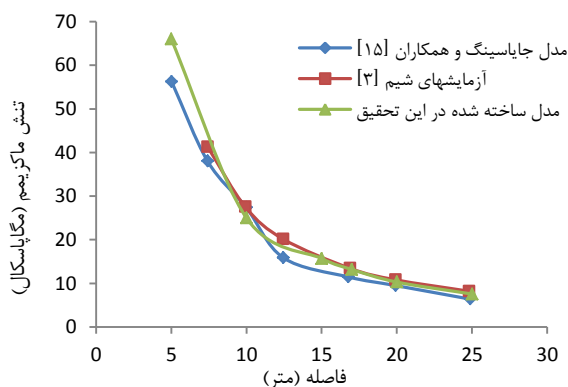
در این شبه‌سازی از روش پارت مجازی^۱ برای مدل‌سازی ماده منفجره استفاده شده است. به کمک این روش، پارت انفجاری بر روی مش‌های خاک قرار می‌گیرد. این روش کمک شایانی به سهولت مدل‌سازی و کاهش زمان مدل‌سازی می‌کند. ابعاد مدل و مش‌بندی به‌گونه‌ای انتخاب شد تا تأثیری در دقت نتایج نداشته باشد. طول و عرض مدل ۳۰ متر و ارتفاع خاک ۱۰ متر مدل‌سازی شد و ماده منفجره استوانه‌اس شکل در عمق ۵ متری خاک قرار گرفت. شرایط مرزی نیز به‌گونه‌ای تنظیم شد تا از انعکاس موج انفجار به داخل مدل جلوگیری شود.

۱-۲. نتایج صحت‌سنجی

در این مطالعه، شبه‌سازی در دو مرحله مختلف انجام گرفت. ابتدا بارگذاری گرانش به مدل وارد شد و سپس انفجار شبه‌سازی شد. برای این منظور از روش initial stress depth استفاده شد تا تنش‌های ژئواستاتیکی خاک ایجاد شود

در تصویر (۴) مقدار تنش بیشینه در فاصله‌های مختلف از ماده منفجره نشان داده شده است. بدین صورت که پس از انفجار، در فواصل مختلف از ماده منفجره میزان تنش بیشینه خاک قرائت شده و به صورت گراف ترسیم گردیده است.

نتایج حاصله با مقادیر به‌دست‌آمده از آزمایش‌های شیم و همچنین مدل‌های جایاسینگ و همکاران مقایسه شده است. همان‌طور که در تصویر (۴) مشخص است نتایج به‌دست‌آمده مطابقت خوبی با آزمایش‌های قبلی دارد.



شکل ۴. مقایسه نتایج صحت‌سنجی با مدل جایاسینگ و همکاران [۱۵] و آزمایش‌های شیم [۳]

۲-۲. مدل‌سازی روانگرایی

همین‌طور که قبلاً مطرح شد روانگرایی در ماسه‌های شل اشباع، اتفاق می‌افتد. برای شبه‌سازی پدیده روانگرایی از پارامترهای مربوط به دو خاک ماسه‌ای اشباع استفاده شد که پارامترهای این دو خاک به شرح جدول (۳) است.

به صورت لاگرانژی مش‌بندی گردید.

برای بارگذاری و اعمال فشار بار انفجاری از معادله حالت JWL موجود در نرم‌افزار استفاده شد که شمای کلی این معادله به صورت رابطه (۱) است [۱۵]:

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

که ضرایب A, B, R₁, R₂ و ω ثوابت معادله فوق هستند و P به‌عنوان فشار، V حجم نسبی و E انرژی در واحد حجم تعریف می‌شود. جدول (۱) نشان‌دهنده پارامترهای ماده منفجره H6 و TNT است. مدل رفتاری MAT-FHWA-SOIL به‌عنوان یک مدل رفتاری مناسب برای خاک ماسه‌ای اشباع که قادر به بررسی و در نظر گرفتن تغییرات فشار آب حفره‌ای باشد به کار گرفته شد. پارامترهای این مدل رفتاری در نرم‌افزار LS-dyna و در مدل ماده شماره ۱۴۷ به شرح جدول (۲) وارد گردید.

جدول ۱. مشخصات ماده انفجاری H6 و TNT [۱۵]

پارامتر	مقدار		واحد
	TNT	H6	
چگالی (ρ)	۱/۶۳	۱/۷۶	gr/cm ³
سرعت موج انفجار (V)	۰/۶۹۳	۰/۷۴۷	cm/μsec
Pc _j	۲/۱ × ۱۰ ^{-۴}	۲/۴ × ۱۰ ^{-۴}	Mbar
A	۳/۷۳۸	۷/۵۸۰۷	Mbar
B	۰/۰۳۷۴۷	۰/۰۵۸۱۳	Mbar
ثابت ω	۰/۳۵	۰/۲	
ثابت R1	۴/۱۵	۴/۹	
ثابت R2	۰/۹	۱/۱	
انرژی درونی مخصوص E ₀	۰/۰۶	۰/۱۰۳	Mbar

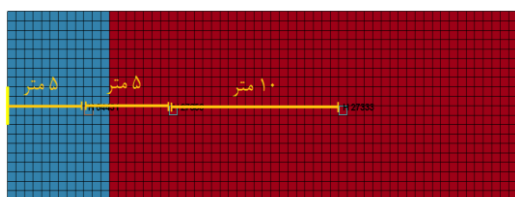
جدول ۲. پارامترهای مدل رفتاری ماسه [۱۵]

پارامتر	واحد	مقدار
چگالی (ρ)	gr/cm ³	۱/۹۸۶۸۳
چگالی دانه‌های جامد (Gs)	gr/cm ³	۲/۶۵
چگالی آب (ρ _w)	gr/cm ³	۱
پارامتر ویسکوپلاستیک (Vn)		۲
پارامتر ویسکوپلاستیک (γt)		۰/۰۰۰۱
مدول بالک (K)	Mbar	۰/۰۵۱۹۸۷
مدول برشی (G)	Mbar	۰/۰۳۴۳۴
زاویه اصطکاک داخلی حداکثر (Φ _{max})	rad	۰/۶۱۱
ضریب سطح اصلاح شده دراگر-پراگر (ahyp)		۴/۴۴ × ۱۰ ^{-۹}
چسبندگی (C)	Mbar	۶/۲ × ۱۰ ^{-۸}
پارامتر پلاستیسیته (An)		۰/۲۵
پارامتر پلاستیسیته (Et)		۰/۰۱
درصد رطوبت (W)		۰/۲۵۲۱
پارامتر تأثیر فشار آب منفذی بر مدول بالک	Mbar	۴۶۳
مدول بالک اسکلت خاک (Ksk)	Mbar	۵/۱۹۹ × ۱۰ ^{-۴}
زاویه اصطکاک داخلی حداقل (Φ _{res})	rad	۰/۰۰۱

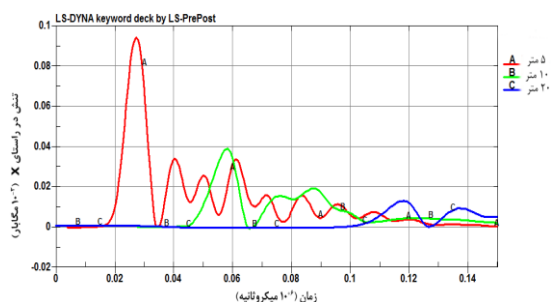
^۱ Initial Volume Fraction Geometry

۳-۱. گسترش تنش

در شکل (۵) مکان هندسی گیج‌ها و محل قرائت تنش‌های بیشینه و در شکل (۶) میزان تنش بیشینه در خاک یانگ لی حاصل از انفجار ۷/۵ کیلوگرم ماده منفجره H6 در فواصل مختلف از ماده منفجره نشان داده شده است. با توجه به شکل (۶) می‌توان به‌وضوح دریافت که موج انفجار به‌صورت یک پیک لحظه‌ای باعث افزایش تنش می‌شود و میزان تنش بیشینه با افزایش فاصله از محل انفجار کاهش می‌یابد.



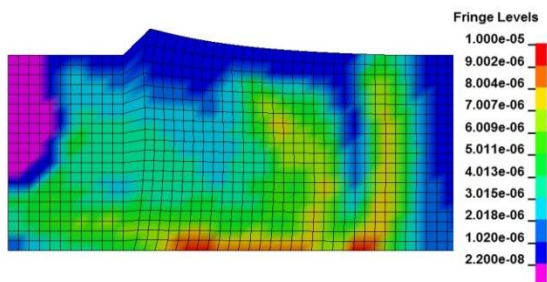
شکل ۵. مکان هندسی گیج‌ها و محل قرائت تنش‌های بیشینه



شکل ۶. مقدار تنش بیشینه ناشی از انفجار در فواصل ۵، ۱۰ و ۲۰ متری از ماده منفجره

۳-۲. محدوده روانگرایی

در این تحقیق محدوده روانگرایی خاک ماسه‌ای حاصل از انفجار ۵ وزن مختلف از ماده منفجره (۷/۵ کیلوگرم تا ۷۵ کیلوگرم) مورد بررسی قرار گرفت. در شکل (۷) کانتور تنش مؤثر ماسه یانگ لی تحت اثر انفجار ماده منفجره H6 با وزن ۷/۵ کیلوگرم نشان داده شده است. میزان تنش مؤثر کمتر از $10^{-8} \times 2/2$ مگا بار نشانگر محدوده روانگرا شده است و در واقع تنش مؤثر به صفر میل کرده است.



شکل ۷. کانتور تنش مؤثر ماسه یانگ لی تحت انفجار ۷/۵ کیلوگرم ماده منفجره H6

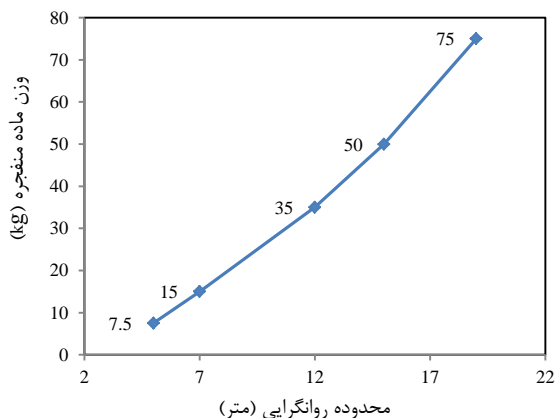
پارامترهای ماسه FHWA از مقادیر ارائه‌شده در توصیه‌نامه FHWA soil استخراج شده است [۱۶]. برای اعمال بارگذاری انفجار از ماده منفجره H6 و TNT به‌عنوان پارت انفجاری استفاده شد. ماده منفجره به شکل استوانه در عمق ۵ متری خاک قرار دارد.

جدول ۳. مشخصات ماسه یانگ لی [۹] و ماسه FHWA [۱۶]

پارامتر	واحد	مقدار	
		ماسه یانگ لی	ماسه FHWA
چگالی (ρ)	gr/cm ³	۱/۸۴۲	۱/۹۸۶۸۳
چگالی دانه‌های جامد (Gs)	gr/cm ³	۲/۶۸۴	۲/۶۵
چگالی آب (pw)	gr/cm ³	۱	۱
پارامتر ویسکوپلاستیک (Vn)		۲	۲
پارامتر ویسکوپلاستیک (Yr)		۰	۰/۰۰۰۱
حداکثر تعداد تکرار پلاستیسیته		۱۰	۱۰
مدول بالک (K)	Mbar	$3/239 \times 10^{-4}$	$1/6 \times 10^{-4}$
مدول برشی (G)	Mbar	$1/943 \times 10^{-4}$	$9/66 \times 10^{-5}$
زاویه اصطکاک داخلی حداکثر (Φmax)	Rad	۰/۶۱۱	۰/۶۱۱
ضریب سطح اصلاح‌شده دراگر-پراگر (ahyp)		$4/22 \times 10^{-9}$	$4/44 \times 10^{-9}$
چسبندگی (C)	Mbar	$6/2 \times 10^{-8}$	$6/2 \times 10^{-8}$
پارامتر خروج از مرکزیت (e)		۱	۱
پارامتر پلاستیسیته (An)		۰/۲۵	۰/۲۵
پارامتر پلاستیسیته (Et)		۰/۰۱	۰/۰۱
درصد رطوبت (W)		۰/۳۷۳	۰/۲۵۲۱
پارامتر تأثیر فشار آب منفذی بر مدول بالک	Mbar	1×10^{-11}	۴۶۳
مدول بالک اسکلت خاک (Ksk)	Mbar	$6/478 \times 10^{-5}$	$8/05 \times 10^{-5}$
پارامتر تأثیر فشار آب منفذی بر تنش مؤثر	Mbar	۰	۰
زاویه اصطکاک داخلی حداقل (Φres)	rad	۰/۵۲۳۶	۰/۰۰۱
پارامتر کرنش نرم شونده (ξ0)		۰/۱	۰/۱
پارامتر کرنش نرم شونده (Gf)		۱	۱
میزان آسیب برای حذف المان		۰	۰
حداکثر کرنش گسیختگی برای حذف المان		۱	۱

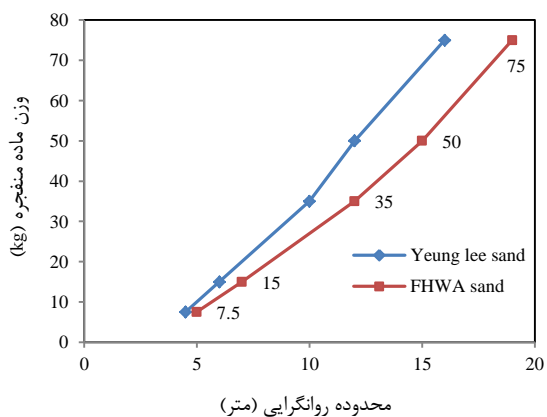
۳. نتایج و بحث

در این قسمت از دو منظر گسترش تنش و محدوده روانگرایی به بررسی نتایج مدل‌سازی‌ها پرداخته می‌شود.



در شکل (۸) مقادیر محدوده روانگرایی خاک یانگ لی حاصل از انفجار ماده منفجره H6 و TNT نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۸) مشخص است، با افزایش وزن ماده منفجره H6 از ۷/۵ کیلوگرم به ۷۵ کیلوگرم، محدوده روانگرایی خاک از ۴/۵ متر به ۱۶ متر افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش وزن ماده منفجره TNT از ۷/۵ کیلوگرم به ۷۵ کیلوگرم محدوده روانگرایی خاک از ۴ متر به ۱۵ متر افزایش می‌یابد. در یک وزن ماده منفجره ثابت، محدوده روانگرایی تحت اثر انفجار H6 نسبت به محدوده روانگرایی تحت انفجار TNT بیشتر است که عموماً به دلیل قدرت انفجاری بیشتر H6 نسبت به TNT است.

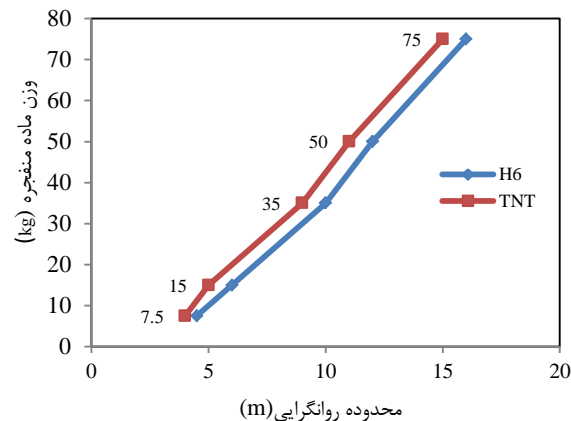
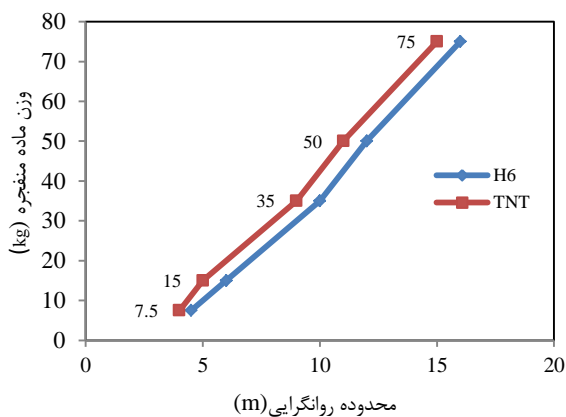
شکل ۹. مقایسه محدوده روانگرایی ماسه FHWA تحت مقادیر مختلف ماده منفجره H6



شکل ۱۰. مقایسه مقادیر محدوده روانگرایی تحت اثر ماده منفجره H6 در ماسه یانگ لی و FHWA

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی محدوده روانگرایی خاک ماسه‌ای ناشی از انفجار مدفون در خاک به وسیله مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار LS-Dyna پرداخته شد. برای این منظور از مدل رفتاری mat FHWA soil موجود در کتابخانه نرم‌افزار LS-Dyna استفاده شد که قادر به شبیه‌سازی پدیده روانگرایی خاک و افزایش فشار آب حفره‌ای است. دو ماده منفجره H6 و TNT و دو ماسه متفاوت با عنوان ماسه یانگ لی و ماسه FHWA مورد بررسی قرار گرفت تا تأثیر انفجار بر محدوده روانگرایی به دست آید. مقدار تنش بیشینه موجود در خاک به دست آمده از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی و عددی موجود در برخی تحقیقات گذشته مقایسه شده و صحت‌سنجی آن انجام گردید. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که تنش بیشینه در خاک با فاصله گرفتن از مرکز انفجار کاهش می‌یابد. همچنین محدوده روانگرایی خاک ماسه‌ای اشباع یانگ لی با تغییر وزن ماده منفجره H6 از ۷/۵ کیلوگرم به ۷۵ کیلوگرم از ۴/۵ متر به ۱۶ متر افزایش یافت. مهم‌ترین نتیجه



شکل ۸. مقایسه محدوده روانگرایی ماسه یانگ لی تحت مقادیر مختلف ماده منفجره H6 و TNT

محدوده روانگرایی در ماسه FHWA تحت انفجار ۷/۵ کیلوگرم تا ۷۵ کیلوگرم ماده منفجره H6 نیز مورد بررسی قرار گرفت که نتایج در شکل (۹) نشان داده شده است.

در شکل (۱۰) محدود روانگرایی ماسه FHWA و ماسه یانگ لی تحت انفجار H6 نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود ماسه FHWA نسبت به ماسه یانگ لی پارامترهای مقاومت برشی کمتری دارد و به نسبت سست‌تر است. به همین دلیل نیز محدوده روانگرایی بیشتری را تجربه می‌کند.

- [7] Lanmin, W.; Kaiming, H.; Yucheng, S.; Jun, W. "Study on Liquefaction of Saturated Loess by In-Situ Explosion Test"; *Earthq. Eng. Vib.* 2002, 1, 50-56.
- [8] Ye, F.; Yeo, C. H.; Goh, S. H.; Anand, S.; Soh, T. B. "3D Numerical Modeling of Underground Explosion in Saturated Sand"; *Numer. Meth. Geotech. Eng.* 2014, 1205-1210.
- [9] Lee, W. Y. "Numerical Modeling of Blast Induced Liquefaction"; Ph.D. Thesis, Brigham Young University. 2006.
- [10] Wang, Z.; Lu, Y. "Numerical Analysis on Dynamic Deformation Mechanism of Soil under Blast Loading"; *Soil. Dyn. Earthq. Eng.* 2003, 23, 705-714.
- [11] Wang, Z.; Hao, H.; Lu, Y. "A Three-Phase Soil Model for Simulating Stress Wave Propagation due to Blast Loading"; *Int. J. Numer. Anal. Met.* 2004, 28, 33-56.
- [12] Wang, Z.; Lu, Y.; Bai, C. "Numerical Analysis of Blast-Induced Liquefaction of Soil"; *Computer Geotechnics* 2008, 35, 196-209.
- [13] Wang, Z.; Lu, Y.; Bai, C. "Numerical Simulation of Explosion-Induced Soil Liquefaction and Its Effect on Surface Structures"; *Finite Elem. Anal. Des.* 2011, 47, 1079-1090.
- [14] LS-DYNA "Keyword User's Manual"; Volume 1, Livermore Software Technology Corporation. 2012.
- [15] Jayasinghe, L. B.; Thambiratnam, D. P.; Perera N.; Jayasooriya, J. H. A. R. "Computer Simulation of Underground Blast Response of Pile in Saturated Soil"; *Comput. Struct.* 2013, 120, 86-95.
- [16] Reid, J. D.; Coon, B. A.; Lewis, B. A.; Sutherland, S. H.; Murray, Y. D. "Evaluation of LS-DYNA Soil Material Model 147"; Federal Highway Administration. 2004.

کاربردی این تحقیق تأثیر نوع و مقدار ماده منفجره و همچنین مشخصات خاک محل در محدوده روانگرایی ناشی از انفجار می‌باشد. بر این اساس در نهایت این مدل می‌تواند در تحقیقات آینده در مورد روانگرایی خاک ناشی از انفجار به‌ویژه در پروژه‌های دفاعی و حساس مورد استفاده قرار گیرد.

۵. مراجع‌ها

- [1] Yasuda, S.; Hashimoto, T. "New Project to Prevent Liquefaction-Induced Damage in a Wide Existing Residential Area by Lowering the Ground Water Table"; *Soil. Dyn. Earthq. Eng.* 2016, 91, 246-259.
- [2] Huang, Y.; Wen, Z. "Recent Developments of Soil Improvement Methods for Seismic Liquefaction Mitigation"; *Nat. Hazards* 2014, 76, 1927-1938.
- [3] Shim, H. S. "Response of Piles in Saturated Soil under Blast Loading"; Ph.D. Thesis, University of Colorado, Boulder, US, 1996.
- [4] Byrne, P. M.; Park, S.; Beaty, M.; Sharp, M.; Gonzalez, L.; Abdoun, T. "Numerical Modeling of Liquefaction and Comparison with Centrifuge Tests"; *Can. Geotech. J.* 2004, 41, 193-211.
- [5] Khodaparast, M.; Hosseini, S. H. "Effect of Pile Space in Pile Group under Explosive Loading"; *Adv. Defence Sci. Technol.* 2019, 01, 393-404.
- [6] Asaadi, A.; Sharifipour, M. "Numerical Simulation of Liquefaction Susceptibility of Soil Interacting by Single Pile"; *Int. J. Min. Geo-Eng.* 2015, 49, 47-56.