

ارزیابی تأثیر سطح آب زیرزمینی بر عمق نفوذ پرتابه در خاک‌های ماسه‌ای و رسی

حسن عباس‌زاده امیردهی^{*۱}، سید حسین میرزینلی یزدی^۲

۱- دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ۲- استادیار دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر-تهران

(دریافت: ۹۵/۰۸/۱۴، پذیرش: ۹۵/۱۱/۱۹)

چکیده

یکی از حوزه‌های تحقیقاتی مهم در حفاظت سازه‌های زیرزمینی، بررسی عمق نفوذ پرتابه‌های نفوذگر در برخورد با خاک به عنوان یک پوشش محافظ است. پدیده برخورد و نفوذ پرتابه به عوامل متعددی وابسته است که یکی از مهم‌ترین آن‌ها، تأثیر رطوبت موجود در خاک است. بنابراین این پژوهش با هدف بررسی عمق نفوذ بمب GBU-28 که از سری بمب‌های لیزری و استحکام‌شکن مورد استفاده در ارتش ایالات متحده است، در خاک‌های ماسه‌ای و رسی و تأثیر سطح آب زیرزمینی بر میزان نفوذ با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار AUTODYN انجام شده است. نتایج به دست آمده نشان دادند که رطوبت خاک تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عمق نفوذ پرتابه، در زمان‌های مختلف انفجار خواهد گذاشت. به طور کلی عمق نفوذ پرتابه در خاک رسی بیشتر از خاک ماسه‌ای با تراکم مشابه است، اما نرخ افزایش عمق نفوذ پرتابه نسبت به حالت کاملاً خشک، در ماسه اندکی بیشتر از مقدار متناظر آن در رس است.

کلیدواژه‌ها: رطوبت خاک، بمب GBU-28، برخورد، بررسی پارامتریک، AUTODYN

Evaluating the Effect of Groundwater Level on Projectile Penetration Depth in Sandy and Clayey Soils

H. A. Amirdehi*, S. H. Mirzeinaly

Malek Ashtar University of Technology, Tehran

(Received: 04/11/2016; Accepted: 07/02/2017)

Abstract

One of the important research areas in protection of underground structures is evaluation of projectiles penetration depth in ground as a protective cover. The phenomenon of impact and projectile penetration is dependent on several factors, one of the most important of them is the effect of soil moisture. Therefore, this paper is aimed to study the GBU-28 penetration depth in sandy and clayey soils and the effect of groundwater level on penetration depth by means of AUTODYN software. The results have shown that soil moisture plays an important role in projectile penetration depth in different times of explosion. Generally, projectile penetration depth in clayey soil is more than sandy soil with same densities, but increasing rate of projectile penetration depth compared to dry soil in sandy soil is a little more than clayey soil.

Keywords: Soil Moisture, GBU-28, Impact, Parametric Study, AUTODYN

*Corresponding Author E-mail: a.amirdehi@chmail.ir

۱. مقدمه

امروزه سازه‌های زیرزمینی که به عنوان یکی از شریان‌های حیاتی جامعه به حساب می‌آیند، نقش بسیار مهمی را در برنامه‌های توسعه یک کشور ایفا می‌کنند؛ به نحوی که استفاده از این سازه‌ها یکی از رویکردهای معمول پدافند غیرعامل برای محافظت از تأسیسات مهم است [۱]. یکی از معضلات اساسی در حفاظت سازه‌های زیرزمینی، آسیب‌پذیری این سازه‌ها در برابر پرتابه‌های نفوذگر است که در صورت عدم به‌کارگیری تمهیدات لازم و کافی، موجب ضرر و زیان‌های فراوان همراه با پیامدهای اقتصادی و اجتماعی ناگوار خواهد شد. به همین دلیل، بررسی جنبه‌های مختلف پدافند غیرعامل در طراحی یک سازه امن زیرزمینی بسیار حائز اهمیت است.

یکی از حوزه‌های تحقیقاتی مهم در حفاظت سازه‌های زیرزمینی، بررسی عمق نفوذ پرتابه‌های نفوذگر در برخورد با خاک به عنوان پوشش محافظ است. از دیدگاه پدافند غیرعامل، دانستن میزان عمق نفوذ پرتابه‌هایی که در نهایت انفجار در آن‌ها رخ می‌دهد، اهمیت ویژه‌ای در طراحی سازه‌های امن دارد. احداث سازه زیرزمینی در عمق بهینه از سطح زمین، موجب کاهش آسیب‌پذیری سازه در مقابل نفوذ انواع پرتابه‌ها می‌شود. پژوهش‌های صورت گرفته توسط محققان مختلف نشان می‌دهد که پدیده برخورد و نفوذ پرتابه در خاک به عوامل متعددی مانند مشخصات پرتابه، سرعت و زاویه اصابت آن به خاک، مشخصات لایه‌های خاک و ... وابسته است [۸-۲].

یکی از ویژگی‌های مهم خاک که در فرآیند نفوذ اثرگذار است، درجه اشباع است. اکثر آزمایش‌های نفوذ گزارش شده در متون فنی بر روی خاک‌های خشک انجام گردیده است و اطلاعات کمتری در مورد مقاومت نفوذ خاک‌های مرطوب و اشباع در دسترس است. برخی از پژوهشگران کاهش مقاومت نفوذ در خاک‌های دانه‌ای سست را در شرایط اشباع گزارش نموده‌اند [۹] و [۱۰]. افزایش عمق نفوذ به دلیل افزودن آب به منافذ خاک در آزمایش‌های با سرعت ضربه کم (در محدوده سرعت ۶-۱ متر بر ثانیه) نیز گزارش شده است [۱۱]. در حالی که برخی از محققین این رفتار را به کاهش اصطکاک بین ذرات خاک تحت شرایط اشباع نسبت داده‌اند، برخی دیگر نیز روان‌گرایی موضعی را دلیل مقاومت کاهش یافته خاک مجاور پرتابه در حال نفوذ دانسته‌اند [۱۲].

علاوه بر ویژگی‌های خاک، ویژگی‌های هندسی و مقاومتی پرتابه نیز نقش مهمی را در فرآیند نفوذ ایفا می‌کنند. یکی از پرتابه‌های مهم و قدرتمند مورد استفاده در ارتش ایالات متحده، که در این پژوهش مورد ارزیابی قرار گرفته است، بمب GBU-28

است. بمب هدایت‌شونده واحد ۲۸ موسوم به Unit 28 که GBU-28 نیز نامیده می‌شود، یک بمب ۵۰۰۰ پوندی هدایت‌شونده به وسیله لیزر است که از سری بمب‌های «استحکام‌شکن»^۱ محسوب می‌شود. به صورت کلی ساختمان بمب عبارت است از یک لوله از جنس فلز بسیار سخت که داخل آن از مواد منفجره مانند TNT و پودر فلزات فعالی مانند آلومینیوم پر شده است تا علاوه بر حرارت زیاد، سرعت و شدت انفجار را نیز افزایش دهد [۱۳].

این بمب مخصوص عملیات نیروهای ارتش ایالات متحده در جریان عملیات «طوفان صحرا»^۲ برای نفوذ در استحکامات بسیار مقاوم و در اعماق زمین ساخته شده مراکز فرماندهی ارتش عراق ساخته شد و امروزه نیز در اختیار برخی از کشورهای دیگر قرار دارد [۱۳]. بنابراین نیاز است که به منظور آگاهی از میزان توانایی نفوذ این بمب لیزری در سطح زمین و انجام اقدامات پیشگیرانه دفاعی در حوزه پدافند غیرعامل، تحقیق و ارزیابی دقیق‌تری از میزان نفوذ آن در خاک با شرایط مختلف صورت پذیرد.

به طور کلی تحقیق در پدیده نفوذ به سه روش تجربی، تحلیلی و شبیه‌سازی عددی صورت گرفته است. روش‌های تجربی نیازمند مطالعات آزمایشگاهی می‌باشند که به دلایل مختلفی مانند هزینه‌های سنگین، اثرات مخرب زیست محیطی و نیاز به امکانات پیشرفته به طور محدودی صورت پذیرفته است. بررسی‌های تحلیلی نیز با توجه به پیچیدگی‌های موجود در این زمینه نیاز به حل معادلات دیفرانسیل پیچیده و گاهی غیر قابل حل دارند. اما در سال‌های اخیر، با توجه به پیشرفت قابل قبول رایانه‌ها، استفاده از روش‌های عددی مورد استقبال قرار گرفته است که دارای قابلیت مدل‌سازی حالت‌های واقعی و پیچیده به وسیله تعریف شرایط اولیه مناسب، مدل‌های رفتاری برای مصالح مورد استفاده، شرایط مرزی و نوع بارگذاری می‌باشند [۱۶-۱۴]. امروزه مدل‌های عددی به طور فزاینده‌ای در تحلیل نفوذ پرتابه به درون خاک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند تا به این ترتیب به مطالعه مواردی پرداخته شود که در نظر گرفتن آن‌ها در روش‌های تحلیلی مشکل است. از جمله این موارد می‌توان به نقش اصطکاک [۱۷ و ۱۸]، توزیع نیروهای مقاوم و اندرکنش‌های خاک-پرتابه در حین نفوذ [۱۹]، نقش ناهمگنی مصالح بر ناپایداری پرتابه و تغییر شکل و فرسایش پرتابه در نفوذهای با سرعت زیاد [۲۰] اشاره نمود. روش‌های عددی همچنین موجب تسهیل حل مشتقات تحلیلی نیز می‌شوند و امکان ترکیب روابط رفتاری پیشرفته را که ممکن است پیاده‌سازی آن‌ها در روش‌های تحلیلی تا حدی مشکل باشد، فراهم می‌آورند [۱۲].

¹ Bunker Busting

² Operation Desert Storm

فرمول‌بندی شده است. پاندورانگسن [۲۱]، به منظور در نظر گرفتن اثرات نرخ تغییر شکل و درجه اشباع بر پاسخ ماسه، به ارائه مجموعه‌ای از اصلاحات (شامل معادله حالت، مدل مقاومت و مدل گسیختگی) برای این مدل ماده پرداخت. این اصلاحات شامل فرضیاتی برای دستیابی به منحنی‌های مورد استفاده است که در ادامه این بخش به آن‌ها اشاره شده است. نتایج به دست آمده از مطالعه پاندورانگن نشان دادند که توافق خوبی میان مشاهدات آزمایشگاهی با نتایج محاسباتی مبتنی بر مدل اصلاح شده که با کمک دانشگاه Clemson و آزمایشگاه تحقیقاتی ارتش ایالات متحده (CU-ARL) به دست آمد، وجود دارد [۲۱].

به طور کلی ماسه دارای یک ساختار پیچیده شامل ذرات جامد معدنی است. فضای خالی بین این ذرات جامد به ۳ صورت پر می‌شود: ۱- با هوا (ماسه خشک)، ۲- با آب (ماسه اشباع) و ۳- با ترکیبی از آب و هوا (ماسه غیر اشباع). نسبت‌های حجم نسبی از سه جزء اصلی تشکیل دهنده ماسه، عموماً با استفاده از پارامتر تخلخل (α) و پارامتر درجه اشباع (β) سنجش می‌شوند که به صورت زیر تعریف می‌گردند [۲۳]:

$$\alpha = \frac{V_p}{V} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{V_w}{V_p} \quad (2)$$

که در این روابط، V_p حجم فضای خالی، V_w حجم آب و V حجم کل است.

بیان این نکته نیز حائز اهمیت است که مدل CU-ARL برای در نظر گرفتن رفتار ماسه تحت شرایط نرخ تغییر شکل بالا که تحت آن آب در فضای بین ذرات گیر می‌کند، تعیین شده است که شامل بخش‌های زیر است [۲۳]:

۲-۱-۱. معادله حالت

در این قسمت، روابط ارائه شده توسط گروچیکیک و همکاران [۲۳] بدون تغییر به کار گرفته شد. برای مدل ماسه CU-ARL، یک معادله حالت کامپکشن مورد استفاده قرار گرفت که شکل خاصی از معادله حالت Mie-Gruneisen است:

$$P = P_H + \Gamma \rho (e - e_H) \quad (3)$$

که در آن، عبارت دوم از سمت راست رابطه (۳) حذف شده است. در رابطه (۳) نام‌گذاری‌های ذیل مورد استفاده قرار گرفته است: P بیانگر فشار (مجموع فشار منفذی و تنش مؤثر در اسکلت خاک)، ρ بیانگر چگالی جرم (موجود)، Γ پارامتر Gruneisen و e بیانگر چگالی انرژی داخلی است؛ همچنین زیرنویس H نیز برای مشخص نمودن سطح مرجع shock-Hugoniot در یک مقدار معین استفاده شد.

فشار Hugoniot (P_H) با استفاده از رابطه زیر تعریف می‌گردد:

ایران در زمره کشورهای قرار دارد که دارای تنوع زمین‌شناسی و اقلیمی گسترده‌ای بوده و انواع مختلفی از خاک‌های درشت‌دانه و ریزدانه در شهرهای مختلف آن یافت می‌شود؛ بنابراین سازه‌های زیرزمینی احداث شده در کشور با پوشش‌های گوناگونی همراه خواهند بود و در نتیجه عمق بهینه قرارگیری‌شان (برای یک پرتابه مشخص) تفاوت خواهد کرد. بنابراین این پژوهش با هدف بررسی پارامتریک عمق نفوذ بمب GBU-28 در خاک‌های ماسه‌ای و رسی و تأثیر سطح آب زیرزمینی بر میزان نفوذ با استفاده از مدل‌سازی عددی انجام شده است تا به طور کلی عملکرد هر دو نوع خاک درشت‌دانه و ریزدانه در برابر نفوذ این پرتابه مورد ارزیابی قرار گیرد. همان‌طور که بیان شد در اکثر مطالعات صورت گرفته توسط محققان، خاک به صورت خشک در نظر گرفته شده است و مطالعات کمی در رابطه با اثر رطوبت خاک بر میزان عمق نفوذ پرتابه انجام شده است؛ در حالی که در بسیاری از حالات عملی، خاک به صورت مرطوب و اشباع است. به همین دلیل ابتدا میزان نفوذ پرتابه در خاک خشک مورد بررسی قرار گرفت و سپس مطالعات پارامتریک با تغییر سطح آب زیرزمینی انجام شده و اثر آن بر تغییرات عمق نفوذ پرتابه ارزیابی گردید.

۲. مدل‌های اصلاح‌شده برای خاک‌های ماسه‌ای و رسی

یک رابطه‌سازی کامل از یک مسئله دینامیکی غیر خطی گذرا مانند برخورد یک پرتابه با هدف، مستلزم آگاهی از مدل‌های مواد (روابط بین فشار، تنش انحرافی، چگالی جرم، کرنش، نرخ کرنش، چگالی انرژی داخلی و ...) است. این روابط به طور معمول شامل: (۱) معادله حالت، (۲) مدل مقاومت، (۳) مدل گسیختگی و (۴) مدل فرسایش برای هر یک از مواد تشکیل دهنده است. معادله حالت وابستگی فشار بر چگالی جرم و چگالی انرژی داخلی را تعریف می‌نماید. معادلات مقاومت و گسیختگی نیز تحولات تنش انحرافی در ناحیه الاستیک، ناحیه الاستیک-پلاستیک و ناحیه بعد از شروع گسیختگی را مشخص می‌کنند. به عبارت دیگر، معادله حالت همراه با معادلات مقاومت و گسیختگی، ارزیابی تحولات یک تانسور تنش کامل در طی یک تحلیل دینامیکی غیر خطی گذرا را میسر می‌سازند. معادله فرسایش نیز به طور کلی برای از بین بردن مشکلات تحلیل عددی ناشی از تغییر شکل زیاد سلول‌های لاگرانژی در نظر گرفته می‌شود. با این وجود، اغلب معادله حالت برای ایجاد سازوکار گسیختگی اضافی (به ویژه در مواد با شکل پذیری محدود) مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۱].

۲-۱. ماسه

در نرم‌افزار AUTODYN، پاسخ دینامیکی ماسه با استفاده از مدل ماده‌ی کامپکشن نمایش داده شده است که با استفاده از نتایج آزمایشگاهی به دست آمده توسط لین و سندویک [۲۲]

ماسه خشک، تنش تسلیم وابسته به فشار به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma_{y,dry} = \phi_{dry} P_{dry} \approx \begin{cases} 1.3732 P_{dry}, & 0 < P_{dry} \leq P_{MC}, \\ 1.3732 P_{MC}, & P_{dry} > P_{MC}. \end{cases} \quad (8)$$

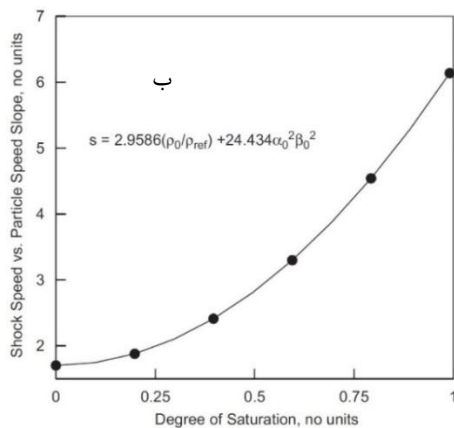
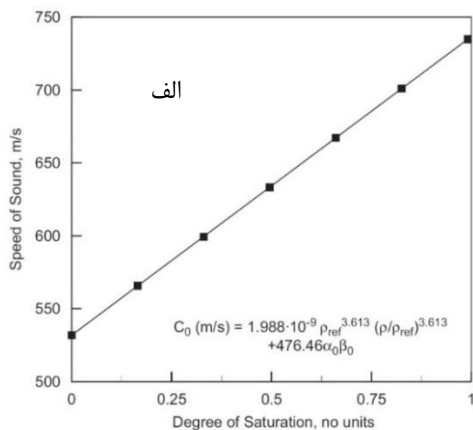
همچنین برای ماسه اشباع، تنش تسلیم وابسته به فشار را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\sigma_{y,sat} = \begin{cases} \phi_{sat} P_{sat}, & 0 \leq P_{sat} \leq P_{MC}, \\ \phi_{sat} P_{MC}, & P_{sat} > P_{MC}. \end{cases} \quad (9)$$

که در آن ضریب ϕ_{sat} به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\phi_{sat} = \begin{cases} \left(0.1 + 1.2732 \frac{P_{sat}}{P_{MC}}\right), & 0 \leq P_{sat} \leq P_{MC}, \\ 1.3732, & P_{sat} > P_{MC}. \end{cases} \quad (10)$$

عبارت $P_{MC} (= 1.864 \times 10^5 \text{ kPa})$ در روابط (۱۰-۸)، فشار موهر-کولمب است که پس از آن تنش تسلیم به فشار حساس نخواهد بود. لازم به ذکر است که هیچ یک از این روابط، شامل اثر نرخ کرنش بر تنش تسلیم ماسه نیست. در مطالعات قبلی نشان داده شد تا زمانی که مدل در نرخ تغییر شکل بالا ($> 1.0 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$) مورد استفاده قرار می‌گیرد، رفتار مقاومت و گسیختگی ماسه را می‌توان به صورت مستقل از نرخ کرنش در نظر گرفت.



شکل ۱. تغییرات (الف) سرعت صوت و (ب) نسبت سرعت شوک به سرعت ذرات با درجه اشباع اولیه ماسه [۲۳]

$$P_H = \frac{\rho_0 C_0^2 \eta}{(1-s\eta)^2} \quad (4)$$

که در آن، $\rho_0 = (1 - \alpha_0)\rho_{ref} + \alpha_0\beta_0\rho_w$ چگالی جرم اولیه ماده، C_0 برابر با سرعت انتشار صوت (در محیط همگن شده ماسه/منافذ)، $\eta = \left(1 - \frac{\rho_0 - \alpha_0\beta_0\rho_w}{\rho - \alpha_0\beta_0\rho_w}\right) = \left(1 - \frac{(1-\alpha_0)\rho_{ref}}{\rho - \alpha_0\beta_0\rho_w}\right)$ نسبت تراکم‌پذیری و ρ_w چگالی آب است؛ همچنین پارامتر s نیز نشان دهنده نرخ افزایش سرعت متوسط ذرات (U_p) با یک افزایش در سرعت شوک (U_s) است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$U_s = C_0 + sU_p \quad (5)$$

در معادله حالت مدل ماسه CU-ARL، روابط مذکور برای ρ_0 و η در رابطه (۴) جایگزین می‌گردند که منجر به روابط زیر می‌شود:

$$P = P_H = \frac{((1-\alpha_0)\rho_{ref} + \alpha_0\beta_0\rho_w) C_0^2 \left(1 - \frac{(1-\alpha_0)\rho_{ref}}{\rho - \alpha_0\beta_0\rho_w}\right)}{\left(1 - s \left(1 - \frac{(1-\alpha_0)\rho_{ref}}{\rho - \alpha_0\beta_0\rho_w}\right)\right)^2}, \quad \rho \leq \rho_{comp} \quad (6)$$

$$P = P_H = P(\rho_{comp}) + C_0^2(\rho - \rho_{comp}), \quad \rho > \rho_{comp} \quad (7)$$

که در آن، $\rho_{comp} = \left(\frac{1-\alpha_0}{1-\alpha_0+\alpha_0\beta_0}\right)\rho_{ref} + \left(\frac{\alpha_0\beta_0}{1-\alpha_0+\alpha_0\beta_0}\right)\rho_w$ چگالی ماسه در حالت فشردگی کامل است. فشردگی کامل به عنوان یک حالت بدون تخلخل تعریف شده است.

با برازش نتایج اصلی U_s در برابر U_p به دست آمده از مطالعات پیشین در یک چندجمله‌ای مرتبه پایین که در آن ضرایب تعیین شده بستگی به سطح اولیه تخلخل و چگالی مرجع دارد، پارامترهای وابسته به درجه اشباع C_0 و s به دست آمدند. نتایج این فرآیند برازش منحنی در شکل (۱) آمده است که در آن روابط کاربردی C_0 در برابر β_0 و همچنین s در برابر β_0 نیز آورده شده است. این روابط به همراه روابط (۶) و (۷) وابستگی فشار به ρ و β_0 ، α_0 ، ρ_{ref} را تعیین می‌نمایند.

رابطه به دست آمده برای فشار در برابر چگالی تنها در حین بارگذاری و تنها زمانی که چنین بارگذاری تا ایجاد تراکم برگشت-ناپذیر/پلاستیک ماده متخلخل افزایش می‌یابد، معتبر است. لازم به ذکر است که مدت بارگذاری بیان کننده رخدادی است که در آن فشار افزایش می‌یابد (و در مورد بارگذاری پلاستیک، کاهش فشار همراه خواهد بود. همچنین در حین باربرداری و بارگذاری مجدد الاستیک، رابطه بین فشار و چگالی به صورت $\frac{dP}{d\rho} = C_0^2(\rho_{ref}, \alpha_0, \beta_0)$ تعریف می‌شود که رابطه $C_0(\rho_{ref}, \alpha_0, \beta_0)$ در شکل (۱) آمده است.

۲-۱-۲. مدل مقاومت

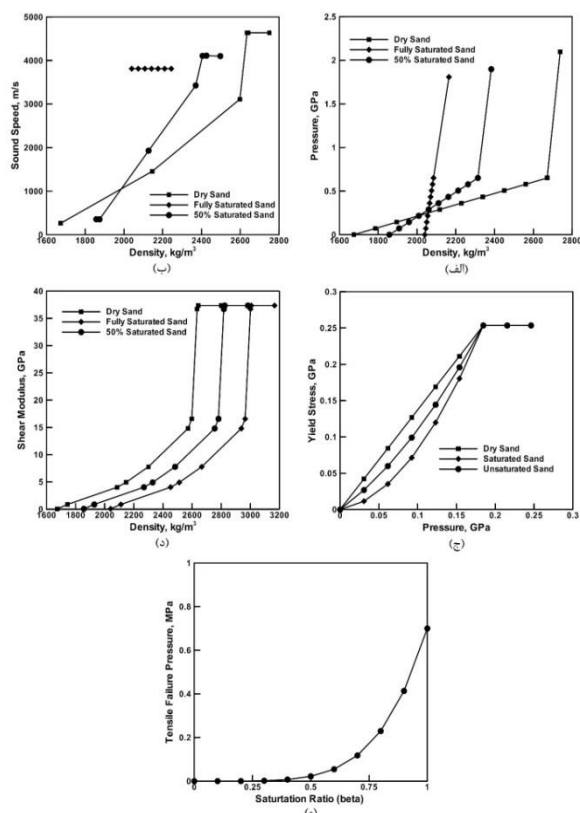
در این قسمت نیز روابط ارائه شده توسط گروچیکیک و همکاران [۲۳] بدون تغییر به کار گرفته شد. در مدل مقاومت اصلی برای

مقاومت چسبندگی ماسه غیر اشباع با درجه اشباع ۰/۷، تقریباً ۱۵-۱۰٪ مقدار آن در ماسه اشباع است.

۲-۱-۴. مدل فرسایش

در مدل فرسایش فرض می‌شود وقتی که کرنش هندسی آنی (یعنی الاستیک + پلاستیک + خرابی) به یک مقدار حداکثر مجاز می‌رسد، فرسایش المان ماده رخ می‌دهد. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که کرنش هندسی آنی بهینه برای انواع خاک‌ها برابر با ۱ است [۲۱]. هنگامی که یک المان ماده فرسوده می‌شود، گره‌ها به همراه جرم و سرعتشان باقی خواهد ماند تا اندازه حرکت سامانه حفظ گردد. اندازه حرکت با توزیع جرم و سرعت سلول‌های فرسوده در بین گره‌های کناری سلول‌های باقیمانده حفظ می‌شود. با وجود این واقعیت که این فرآیند از دقت بالایی برخوردار نیست (به دلیل حذف انرژی کرنشی از المان‌های فرسوده)، اما به طور کلی نتایج قابل قبولی را به دست می‌دهد.

به منظور نمایش اثر درجه اشباع بر روی رفتار ماسه که با استفاده از مدل اصلاح شده ارائه شده پیش‌بینی شده است، منحنی‌های نشان داده شده در شکل (۲) مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۴].



شکل ۲. اثر درجه اشباع بر منحنی‌های مورد استفاده برای مدل سازی خاک ماسه‌ای با تخلخل اولیه ۰/۳۶ [۲۴]

علاوه بر تعیین رابطه بین تنش تسلیم و فشار، مدل مقاومت مستلزم تعیین مدول برشی وابسته به چگالی نیز است. از آنجایی که آب توانایی تحمل تنش برشی را ندارد، مدول برشی (G) ماسه غیر اشباع تحت تأثیر مدول برشی اسکلت جامد ماسه قرار دارد. با این حال، وجود آب موجب تغییر چگالی ماسه خواهد شد. بنابراین، رابطه اصلی مدول برشی در برابر چگالی (که با استفاده از مختصات ۱۰ نقطه جداگانه در نرم‌افزار AUTODYN تعریف شده است) به یک تابع چندجمله‌ای برازش شد و توسط (۱) اصلاح چگالی با عبارت $-\alpha_0\beta_0\rho_w$ و (۲) معرفی یک مدول برشی حداکثر وابسته به سطح رطوبت به منظور تعیین یک رابطه مدول برشی در برابر چگالی (مستقل از نرخ کرنش) برای ماسه در سطوح اشباع مختلف اصلاح گردید. این فرآیند منجر به ایجاد روابط زیر خواهد شد:

$$G (kPa) = \quad (11)$$

$$\begin{cases} 5.2175 \times 10^{-14} (\rho - \alpha_0\beta_0\rho_w)^6, & \rho < (1 - \alpha_0\beta_0)\rho_{ref} + \alpha_0\beta_0\rho_w \\ (1 - \alpha_0\beta_0)G_{Bulk}, & \rho \geq (1 - \alpha_0\beta_0)\rho_{ref} + \alpha_0\beta_0\rho_w \end{cases}$$

که در آن، $G_{Bulk} (= 3.73470 \times 10^7)$ مدول برشی ماسه خشک کاملاً فشرده شده را نشان می‌دهد. رابطه (۱۱) به درستی این واقعیت را توجیه می‌نماید که در حالت فشرده‌گی کامل، چگالی ماسه برابر است با $(1 - \alpha_0\beta_0)\rho_{ref} + \alpha_0\beta_0\rho_w$.

لازم به ذکر است که در مدل مقاومت توسعه یافته در این بخش، مشارکت آب در مقاومت ماده نادیده گرفته شده است. این را می‌توان با دانستن این حقیقت که معمولاً گرانروی آب در حدود $0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ است و در نرخ کرنش $1.0 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ سهم آب در مقاومت برشی ماسه تنها ۱۰۰ Pa است، توجیه نمود.

۲-۱-۳. مدل گسیختگی

این موضوع به خوبی اثبات شده است که وجود رطوبت در ماسه، مقاومت چسبندگی ماسه را افزایش می‌دهد. بنابراین، انتظار می‌رود که مقدار فشار گسیختگی (منفی) در ماسه با افزایش درجه اشباع (β) افزایش یابد. همچنین برای این که تأثیر رطوبت بر مقاومت چسبندگی ماسه زیاد باشد، درجه اشباع خاک نیز باید به اندازه کافی بزرگ باشد ($\beta > 0.7$) [۲۱]. برای در نظر گرفتن این دو مورد از رابطه ارائه شده توسط گروچیکیک و همکاران [۲۳] استفاده شد که عبارت زیر برای مقدار فشار گسیختگی (منفی) در ماسه غیر اشباع ($P_{fail,unsat}$) را پیشنهاد نمودند:

$$P_{fail,unsat} = \beta_0^5 P_{fail,sat} \quad (12)$$

که در آن، $P_{fail,sat} (= 729 \text{ kPa})$ فشار گسیختگی در ماسه اشباع است. رابطه (۱۲) به درستی پیش‌بینی می‌نماید که

۲-۲. رس

مطالعه پاندورانگن [۲۱] نشان داده است که به دلیل فعل و انفعال تعدادی از پدیده‌های فیزیکی-شیمیایی مانند پیوند قوی الکترواستاتیک چسبندگی بین ذرات در رس، تمایل مبتنی بر خاصیت نفوذ رس به جذب و نگهداری آب و تورم ناشی از جذب آب رس، پاسخ دینامیکی مکانیکی خاک‌های رسی به طور قابل توجهی متفاوت از خاک‌های ماسه‌ای است. بنابراین در این بخش با استفاده از روابط ارائه شده توسط گروجیکیک و همکاران [۲۵]، اثر درجه اشباع بر مدل‌سازی خاک‌های رسی بررسی می‌شود.

۲-۲-۱. معادله حالت

همان‌طور که در بخش‌های قبلی بیان شد، معادله حالت نشانگر رفتار فشردگی خاک تحت فشار هیدرواستاتیک است. روش تعیین معادله حالت برای خاک رسی مشابه با همان روشی است که برای تعیین معادله حالت در خاک ماسه‌ای به کار گرفته شد. ابتدا معادله حالت به طور جداگانه برای حالات خشک و کاملاً اشباع رس که حاوی مقدار کمی ماسه است (کمتر از ۱۰٪ حجم) به دست آمد. سپس این معادلات با هم ترکیب شده و روابط متناظر برای خاک رسی نیمه اشباع به دست آمد. همچنین مشخص شد که رفتار فشردگی ماسه و رس، حداقل از دو جهت قابل توجه متفاوت است: (۱) ذرات رس ریزتر هستند و تحت وزن خود خاک می‌توانند به راحتی جابه‌جا شوند تا سطح پایین‌تری از تخلخل اولیه در خاک به دست آید؛ (۲) ذرات رس تغییر شکل پذیر هستند که تا حد زیادی به فشردگی خاک‌های رسی کمک می‌کند، اما در خاک‌های ماسه‌ای عموماً به شکستگی ذرات ماسه برای فشردگی خاک نیاز است.

۲-۲-۲. مدل مقاومت

مقاومت تسلیم رس (σ_y) به طور قابل توجهی تحت تأثیر میزان فشار همه جانبه نیست و به منظور تخمین اولیه، می‌توان آن را با استفاده از یک قانون ساختاری ایده‌آل پلاستیک مستقل از فشار نشان داد. اگر چه، تنش تسلیم ثابت، یک تابع کاهشی از درجه اشباع است و فرض می‌شود که به طور خطی بین مقدارش برای رس خشک (۵۰ kPa) و مقدارش برای رس اشباع (۰/۵ kPa) تغییر می‌نماید. میزان کم ماسه موجود در رس، به عنوان اجزای سخت در ماتریس رس در نظر گرفته می‌شوند.

برای محاسبه این تأثیر ذرات ماسه از یک روش ساده استفاده می‌شود که در آن مقاومت تسلیم رس ماسه‌ای، در هر سطحی از درجه اشباع، با ضرب مقدار متناظر برای رس در ضریب $\Omega = 1/(1 - \Omega)$ به دست می‌آید که در آن $\Omega = V_{sand}/(V_{clay} + V_{sand})$ می‌باشد.

همان‌طور که در بخش‌های قبلی نیز بیان شد، علاوه بر تعیین رابطه بین تنش تسلیم و فشار، مدل مقاومت مستلزم تعیین مدول

برشی و وابستگی آن به چگالی و یا فشار نیز است. مدول برشی برای تعیین رابطه بین اجزای تنش انحرافی و کرنش انحرافی در حین باربرداری و بارگذاری مجدد الاستیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. به طور کلی نشان داده شده است که مدول برشی رس خشک نسبتاً مستقل از فشار است، اما با افزایش چگالی جرم، افزایش می‌یابد. مقدار این افزایش در ابتدا نسبتاً کوچک است و به تدریج تا رسیدن به شرایط فشردگی کامل بزرگ‌تر می‌شود. هنگامی که شرایط فشردگی کامل به دست می‌آید، اساساً مدول برشی مستقل از چگالی خواهد شد. مشابه با حالت مقاومت تسلیم، میزان کمی از ماسه موجب سختی الاستیک رس می‌شود و بنابراین مدول برشی رس ماسه‌ای با ضرب مقدار متناظر برای مدول برشی رس در ضریب $1/(1 - \Omega)$ به دست می‌آید.

۲-۲-۳. مدل گسیختگی

عموماً مشاهده شده است که گسیختگی در خاک‌های رسی، علاوه بر واچسبندگی که در خاک‌های ماسه‌ای بدان اشاره شد، به دلیل برش بیش از حد نیز می‌تواند رخ دهد. بنابراین، یک مدل گسیختگی ترکیبی برای خاک‌های رسی مد نظر قرار گرفت. علاوه بر این، مدل گسیختگی ترکیبی این واقعیت را تبیین می‌نماید که در حالی که در خاک‌های ماسه‌ای افزایش درجه اشباع منجر به افزایش در مقاومت گسیختگی خاک می‌شود، مقاومت چسبندگی در خاک‌های رسی با افزایش درجه اشباع (از حالت خشک با مقدار برابر با ۶۰ kPa) به یک مقدار حدی برابر با ۲۲۵ kPa افزایش می‌یابد (در درجه اشباع ۵۰٪-۴۰٪) و سپس به مقدار ۱۰ در رس کاملاً اشباع کاهش می‌یابد.

در بخش اول مدل گسیختگی، به منظور در نظر گرفتن تأثیر درجه اشباع بر مقاومت چسبندگی خاک‌های رسی نیمه اشباع رابطه زیر پیشنهاد شده است:

$$P_{unsaturatedclay, fail} = P_{dryclay, fail} - 720.8\beta + 770.8\beta^2 \quad (13)$$

در بخش بعدی مدل، گسیختگی ناشی از برش مد نظر قرار گرفت. در این بخش فرض می‌شود که گسیختگی هنگامی رخ می‌دهد که تنش برشی حداکثر به یک مقدار حدی وابسته به درجه اشباع برسد. افزایش درجه اشباع خاک منجر به افزایش مقاومت در برابر گسیختگی برشی می‌گردد که با استفاده از رابطه زیر نشان داده می‌شود:

$$\tau_{unsaturatedclay, fail} = \tau_{dryclay, fail} + \beta(\tau_{saturatedclay, fail} - \tau_{dryclay, fail}) \quad (14)$$

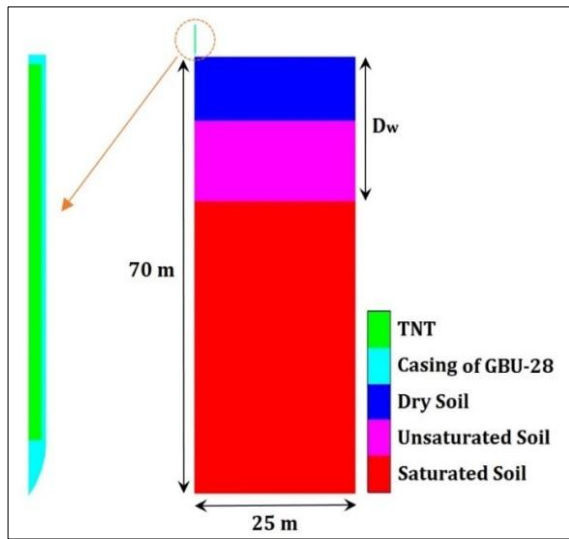
که در آن، $\tau_{dryclay, fail}$ و $\tau_{saturatedclay, fail}$ به ترتیب مقاومت در برابر گسیختگی برشی برای رس خشک و اشباع می‌باشند.

از آنجایی که ذرات ماسه مانع برش در خاک‌های رسی می‌شوند، عموماً آن‌ها دارای تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر توانایی

۳. مشخصات مدل سازی

به منظور ارزیابی تأثیر سطح آب زیرزمینی بر میزان نفوذ پرتابه، مدل هندسی نشان داده شده در شکل (۴) مورد استفاده قرار گرفت که در آن هندسه مدل و علائم قراردادی نمایش داده شده است. به منظور شبیه‌سازی رفتار خاک در حالات خشک، نیمه اشباع و اشباع از پارامترهای مستخرج از نمودارهای بخش قبل استفاده شد؛ همچنین شبیه‌سازی هندسی و مقاومتی بمب GBU-28 نیز با استخراج اطلاعات موجود از منابع انجام گردید (جدول (۱)). استفاده از تقارن مسئله باعث کاهش چشمگیر حجم محاسبات و در عین حال افزایش دقت و کاهش خطا خواهد شد که در اینجا با توجه به هندسه و نوع شرایط مرزی مسئله، می‌توان آن را به صورت دو بعدی و با تقارن محوری تحلیل نمود.

علاوه بر این موارد، نکات مهم دیگری که در یک شبیه‌سازی باید بدان توجه نمود عبارتند از: تعیین شرایط مرزی، شرایط اولیه، مش‌بندی و برهم‌کنش میان سطوح.



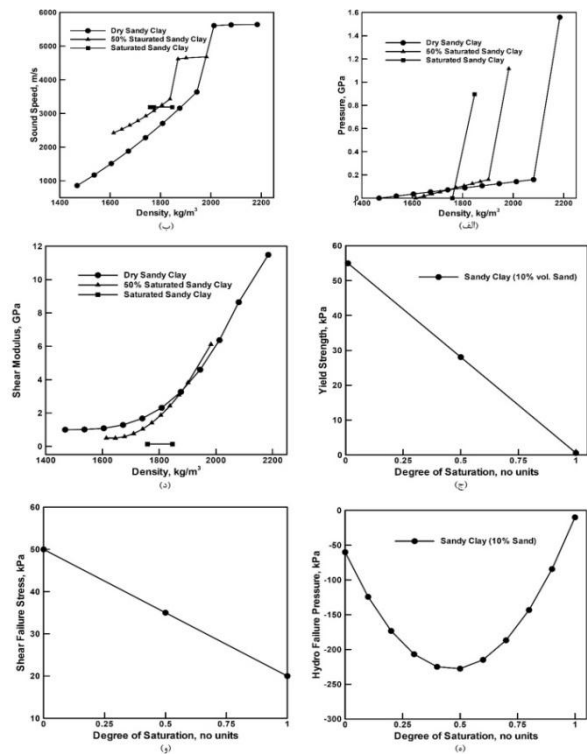
شکل ۴. مشخصات مدل هندسی

خاک‌های رسی در مقاومت در برابر برش (بدون گسیختگی) می‌باشند. به منظور در نظر گرفتن این تأثیر، مقاومت گسیختگی خاک‌های رسی (در هر درجه اشباع) به صورت ضرب رابطه (۱۴) در ضریب $1/(1 - \Omega)$ تعریف می‌شود.

۲-۲-۴. مدل فرسایش

همان‌طور که در بخش‌های قبلی بیان شد، کرنش هندسی آنی بهینه (الاستیک + پلاستیک + خرابی) برای انواع خاک‌ها برابر با ۱ است که در آن فرسایش المان ماده رخ می‌دهد.

به منظور نمایش اثر درجه اشباع بر روی رفتار رس، منحنی‌های نشان داده شده در شکل (۳) مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۵].



شکل ۳. اثر درجه اشباع بر منحنی‌های مورد استفاده برای مدل سازی خاک رسی با تخلخل اولیه ۰/۲۹ [۲۵]

جدول ۱. مشخصات بمب GBU-28 [۲۶ و ۲۷]

قطر کلاهک (cm)		طول کلاهک (m)		سرعت برخورد (m/s)	وزن (kg)	مشخصات کلی
۳۷		۳/۹		۵۰۰	۲۲۶۸	
ω	R_2	R_1	B (Pa)	A (Pa)	وزن (kg)	معادله حالت
۰/۳۴	۱/۱۰	۴/۲۰	$7/678 \times 10^9$	$5/242 \times 10^{11}$	۲۹۴	JWL
S R C	H E	H C (Pa)	Yield Stress (Pa)	G (Pa)	ρ (kg/m ³)	مدل مقاومت
۰/۰۱۴	۰/۲۶	$6/10 \times 10^8$	$8/92 \times 10^8$	$8/10 \times 10^{10}$	۷۹۰۰	Johnson-Cook

جداره پرتابه

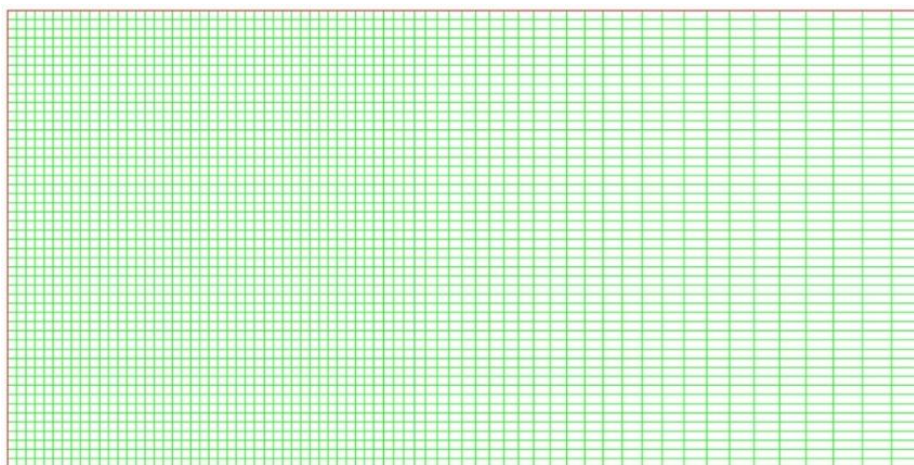
قراردادی برابر با ۱ در نظر گرفته شد. در این حالت اندازه تقریبی ابعاد المان‌ها در نواحی برخورد برابر با ۲۵۰ میلی‌متر است که به طور تدریجی به ۵۰۰ میلی‌متر در اطراف مرزهای مدل افزایش پیدا می‌کند. نتایج به‌دست آمده نشان دادند که با کاهش تراکم نسبی المان‌ها، عمق نفوذ افزایش می‌یابد؛ اما هنگامی که تراکم نسبی المان‌ها از یک مقدار حدی بیشتر می‌شود، عمق نفوذ به‌دست آمده تفاوت قابل ملاحظه‌ای نخواهد داشت. بنابراین در این پژوهش، به دلیل صرفه‌جویی در زمان تحلیل و همچنین کم اثر بودن تراکم‌های نسبی بالا در نتایج، از تراکم نسبی ۱ برای مدل‌سازی استفاده شد.

برهم‌کنش میان سطوح: اصولاً بدون تعریف برهم‌کنش میان مدل‌های مختلف و همچنین حلگرهای متفاوت، شبیه‌سازی امری بی‌فایده می‌نماید. از این رو در این پژوهش از گزینه برهم‌کنش میان دو حلگر لاگرانژی موجود در نرم‌افزار که در مسائل برخورد و نفوذ کاربرد دارد، برای سطوح تماس مسئله (یعنی سطح خارجی پرتابه و خاک) استفاده شد.

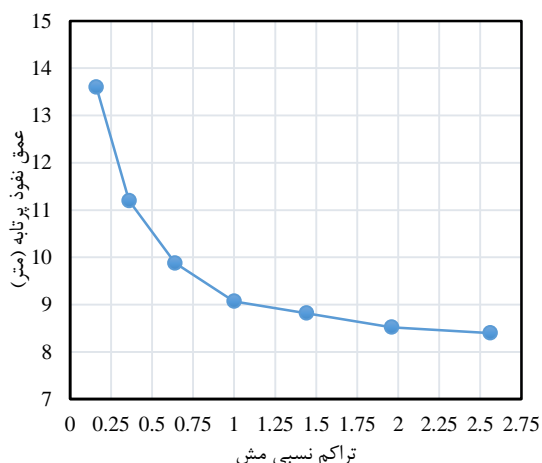
شرایط مرزی خاک: طبیعی است که امکان شبیه‌سازی و شبکه‌بندی یک محدوده وسیع برای نرم‌افزارهای مختلف وجود ندارد، به همین دلیل در اکثر نرم‌افزارها قابلیت تعریف شرایط مرزی خاصی که حالت نامتناهی و یا نیمه متناهی را شبیه‌سازی می‌کنند وجود دارد (شرایط مرزی Transmit در نرم‌افزار AUTODYN). در این وضعیت می‌توان یک حجم عظیم ماده را که در پشت این سطح مرزی قرار گرفته است، متصور شد.

شرایط اولیه: سرعت اولیه پرتابه باید به صورت یک شرط اولیه به پرتابه اعمال شود که سرعت اولیه بمب GBU-28، بنا بر اطلاعات مستخرج از منابع [۲۶ و ۲۷]، حدوداً برابر با ۵۰۰ m/s است.

مش‌بندی: به منظور بررسی تأثیر اندازه المان بر تحلیل، نتایج حاصل از مدل‌سازی با تعداد المان‌های متفاوت (با توجه به تقسیم‌بندی و دانه‌بندی جهت‌دار نشان داده شده در شکل (۵)، بر حسب تراکم نسبی مش در جدول (۲) و شکل (۶) نشان داده شده است. این نتایج برای حالت نفوذ پرتابه در ماسه خشک و زمان تأخیر در انفجار ۳۰ میلی‌ثانیه به‌دست آمده‌اند. تراکم نسبی مش برای حالتی که در شکل (۵) نشان داده شده است، به طور



شکل ۵. ایجاد مش‌بندی جهت‌دار در مدل هدف (به دلیل بزرگنمایی، فقط نواحی فوقانی هدف نشان داده شده است).

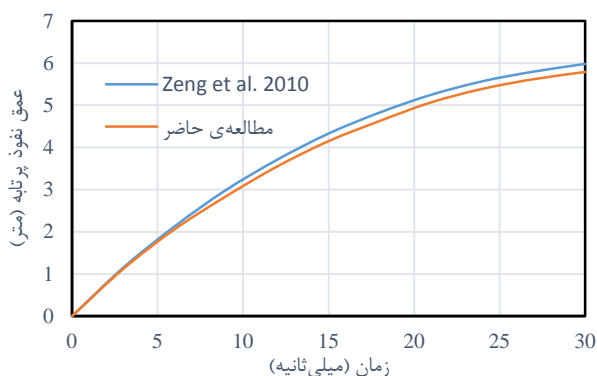


شکل ۶. رابطه بین عمق نفوذ پرتابه و تراکم نسبی مش

جدول ۲. عمق نفوذ پرتابه در ماسه خشک (با زمان تأخیر در انفجار ۳۰ میلی‌ثانیه) در تراکم‌های نسبی مش متفاوت

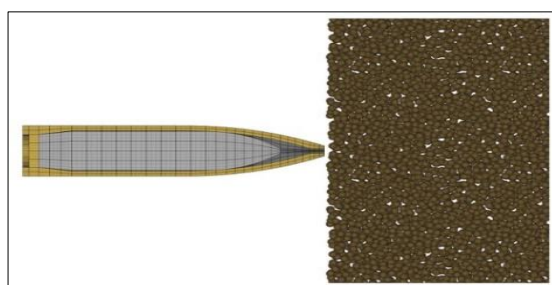
عمق نفوذ (متر)	تراکم نسبی مش	تعداد المان
۱۳/۶۰	۰/۱۶	۳۱۳۶
۱۱/۲۰	۰/۳۶	۷۰۵۶
۹/۸۸	۰/۶۴	۱۲۵۴۴
۹/۰۷	۱/۰۰	۱۹۶۰۰
۸/۸۲	۱/۴۴	۲۸۲۲۴
۸/۵۲	۱/۹۶	۳۸۴۱۶
۸/۴۰	۲/۵۶	۵۰۱۷۶

به گزارش شرکت سازنده (Raytheon) GBU-28، پس از انجام آزمایش‌هایی در مرکز Tonopah Test Range واقع در نوادا، معلوم شد که این بمب به طور تقریبی، توانایی نفوذ تا عمق ۳۰ متری سطح زمین و یا ۶ متری یک سطح سفت (مانند سطح بتونی) را داراست [۲۷]. مقایسه نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که پارامترهای مورد استفاده برای این بمب در پژوهش حاضر مورد تأیید قرار گرفته است (شکل ۸).



شکل ۸. مقایسه منحنی عمق نفوذ بمب GBU-28 (در بتن مسلح) در برابر زمان در مطالعه حاضر با مطالعه زنگ و همکاران [۲۶]

در رابطه با مدل‌سازی صحیح برخورد و نفوذ پرتابه در خاک نیز پژوهش ماکسنس و همکاران [۲۸] برای ماسه و پژوهش کارتن و همکاران [۲۹] برای رس مورد بررسی قرار گرفت. ماکسنس و همکاران [۲۸] با استفاده از نرم‌افزار AUTODYN، برخورد و نفوذ گلوله APM2 در مواد مختلف (از جمله ماسه) را مدل‌سازی نمودند و سپس صحت مدل‌سازی را با نتایج به‌دست آمده از آزمون‌های آزمایشگاهی (ارائه شده توسط برویک و همکاران [۳۰]) مورد ارزیابی قرار دادند. جزئیات مسئله به صورت شماتیک در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۹. جزئیات مسئله‌ی برخورد و نفوذ پرتابه (APM2) در ماسه در مطالعه Moxnes و همکاران [۲۸]

به منظور صحت‌سنجی مدل ماسه مورد استفاده در این پژوهش، مدل‌سازی ماسه با استفاده از مدل CU-ARL و برخی پارامترهای ارائه شده در پژوهش ماکسنس و همکاران انجام شد. شکل (۱۰) نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها در مطالعه حاضر و پژوهش ماکسنس و همکاران و همچنین مقایسه آن‌ها با نتایج

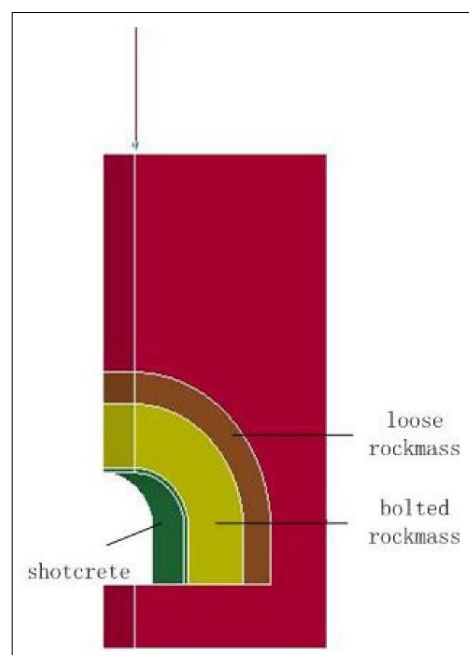
همچنین بیان این نکته نیز ضروری است که به منظور ساده‌سازی در مدل‌سازی، خاک ماسه‌ای در بالای سطح آب زیرزمینی به صورت خشک و در پایین آن به صورت کاملاً اشباع در نظر گرفته شد (از مدل‌سازی محدوده نیمه اشباع، به دلیل کم بودن ارتفاع مویبندی، صرف نظر شد). اما در خاک رسی، به دلایلی خاصیت مویبندی، در بالای سطح آب زیرزمینی باید ارتفاع مشخصی از خاک نیمه اشباع وجود داشته باشد. بنابراین با توجه به مشخصات خاک رسی مورد استفاده در تحلیل و اطلاعات در دسترس برای مدل‌سازی خاک رسی با درجه اشباع ۵۰٪، محدوده‌ای به ضخامت ۱۲ متر در بالای سطح آب زیرزمینی به صورت نیمه اشباع (با درجه اشباع ۵۰٪) در نظر گرفته شد.

ارزیابی صحت مدل‌سازی از دو طریق زیر صورت پذیرفت:

(۱) صحت‌سنجی پارامترهای مورد استفاده برای بمب GBU-28

(۲) صحت‌سنجی مدل‌سازی صحیح برخورد و نفوذ پرتابه در خاک

به منظور صحت‌سنجی پارامترهای مورد استفاده برای بمب GBU-28 در تحلیل و به دلیل عدم وجود مطالعات آزمایشگاهی و میدانی مرتبط با نفوذ بمب GBU-28 در خاک، مدل ارائه شده توسط Zeng و همکاران [۲۶] برای نفوذ این بمب در بتن مسلح مدل‌سازی شد تا پارامترهای فرض شده‌ای (به غیر از پارامترهای ارائه شده در جدول (۱)) که برای بمب GBU-28 در تحلیل به کار گرفته شدند مورد ارزیابی قرار گیرند. شکل (۷) مدل هندسی مورد مطالعه در پژوهش زنگ و همکاران [۲۶] را نشان می‌دهد.



شکل ۷. مدل هندسی مورد مطالعه در پژوهش Zeng و همکاران [۲۶]

نشان می‌دهند که میزان تفاوت نتایج حاصل از مدل‌های آزمایشگاهی با نتایج حاصل از مدل‌سازی در نرم‌افزار AUTODYN، در محدوده قابل قبولی قرار دارد (جدول (۳)).

جدول ۳. مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی نفوذ گلوله MSC در نرم‌افزار AUTODYN با نتایج حاصل از مدل‌های آزمایشگاهی در پژوهش Carton و همکاران [۲۸]

مدل	سرعت اولیه (m/s)	سرعت باقیمانده (m/s)	تفاوت (%)
آزمایشگاه	۱۹۸	۱۷۷	۸/۵
AUTODYN	۱۹۸	۱۶۲	
آزمایشگاه	۳۳۹	۳۱۹	۵/۶
AUTODYN	۳۳۹	۳۰۱	
آزمایشگاه	۴۱۵	۳۸۶	۴/۱
AUTODYN	۴۱۵	۳۷۰	

۴. نتایج و بحث

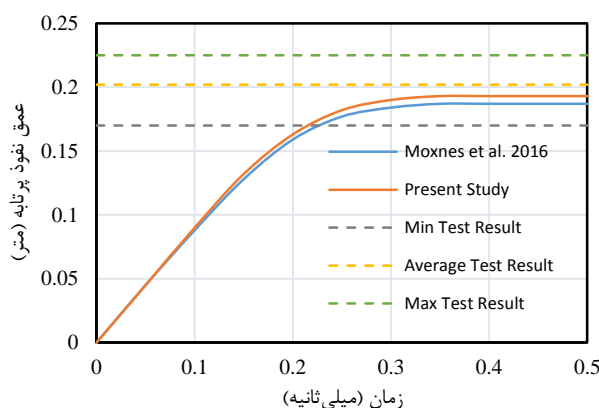
هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر سطح آب زیرزمینی (با سطح اشباع در خاک چسبنده) بر میزان عمق نفوذ بمب GBU-28 است. این بمب که در زمره بمب‌های هوشمند قرار دارد، قابلیت نصب فیوزهای مختلفی را دارد که به منظور ایجاد تأخیر در انفجار (پس از برخورد) برای نفوذ بیشتر در هدف مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین آگاهی از انواع فیوزهای قابل نصب بر این بمب و زمان تأخیرشان، برای تعیین دقیق عمق نفوذ قبل از انفجار، امری ضروری است. از این رو، اطلاعات فیوزهای به‌دست آمده در جدول (۴) آمده است.

جدول ۴. مشخصات فیوزهای قابل نصب بر روی بمب GBU-28 [۳۱]

نام فیوز	زمان تأخیر در انفجار (میلی ثانیه)
FMU-143F/B	۳۰
FMU-143G/B	۶۰
FMU-143H/B	۱۲۰
FMU-152/B	۲۴۰

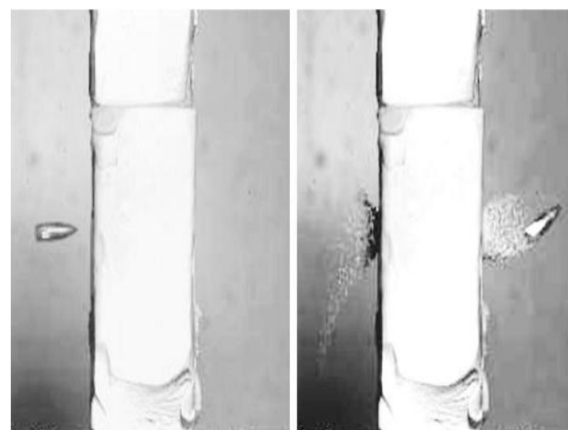
نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌ها برای خاک‌های ماسه‌ای و رسی در شکل‌های (۱۵-۱۲) نشان داده شده است. همان‌طور که از نتایج به‌دست آمده مشخص است، رطوبت خاک تأثیر قابل توجهی بر عمق نفوذ پرتابه خواهد گذاشت که در اکثر مطالعات گذشته اثر آن نادیده گرفته شده است.

حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. محدوده نتایج آزمایشگاهی برای آزمون‌های مختلف به صورت حداقل، حداکثر و متوسط نتایج در نمودار مشخص شده است. همان‌طور که از نتایج به‌دست آمده مشخص است، مطابقت بسیار خوبی بین نتایج برقرار است که نشان دهنده صحت نحوه مدل‌سازی با استفاده از مدل ماسه در نرم‌افزار AUTODYN است.



شکل ۱۰. مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی نفوذ گلوله APM2 در ماسه خشک (با سرعت ۹۱۷ متر بر ثانیه) در نرم‌افزار AUTODYN با نتایج حاصل از پژوهش Moxnes و همکاران [۲۸] و آزمون‌های آزمایشگاهی [۳۰]

همچنین کارتن و همکاران [۲۹] نیز به انجام آزمایشگاهی بالستیکی نفوذ گلوله MSC در توده رسی (با ضخامت محدود ۶۱/۵ میلی‌متر) با سرعت‌های برخورد گوناگون پرداخته و سرعت اولیه و باقیمانده گلوله را با استفاده از صفحه نمایش لیزری اندازه‌گیری نمودند (شکل (۱۱)).



شکل ۱۱. جزئیات مسئله برخورد و نفوذ پرتابه (7.62x39 mm MSC) در رس در مطالعه کارتن و همکاران [۲۹]

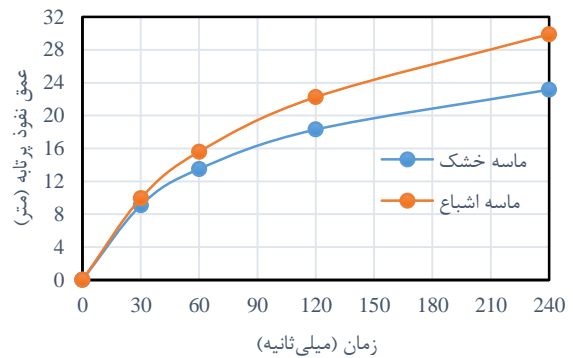
مشابه با صحت‌سنجی انجام شده برای مدل ماسه، مدل‌سازی رس نیز با استفاده از مدل CU-ARL و برخی پارامترهای ارائه شده در پژوهش کارتن و همکاران انجام شد. نتایج به‌دست آمده

۱- همان‌طور که انتظار می‌رفت، با افزایش زمان بر عمق نفوذ پرتابه نیز افزوده می‌شود. صرف نظر از نوع خاک و حالت آن، نرخ افزایش عمق نفوذ در زمان‌های ابتدایی با شدت بالایی صورت می‌پذیرد و پس از گذشت زمان‌های بیشتر، از شدت آن کاسته خواهد شد و بدین ترتیب انرژی پرتابه مستهلک می‌شود. ضربه پرتابه بر یک خاک منجر به تولید امواج تنشی شده که این امواج به همراه خود پرتابه در درون خاک انتشار می‌یابند. امواج تنشی از طریق استهلاک هندسی و همچنین به دلیل ذخیره نمودن انرژی داخل مصالح افت می‌نمایند. مقاومت مصالح خاکی در برابر نفوذ به قابلیت آن در برابر استهلاک انرژی مرتبط است. بخشی از انرژی جنبشی پرتابه به دلیل ضربه وارده بر سطح خاک مستهلک شده و طی آن ذرات به حرکت در آمده و امواج تنشی ایجاد می‌شوند. انرژی باقیمانده نیز با غلبه پرتابه بر نیروهای مقاوم به شکل کار انجام شده مستهلک می‌شود که بخش زیادی از آن ناشی از استهلاک اصطکاکی و برخوردی است [۱۲ و ۱۳].

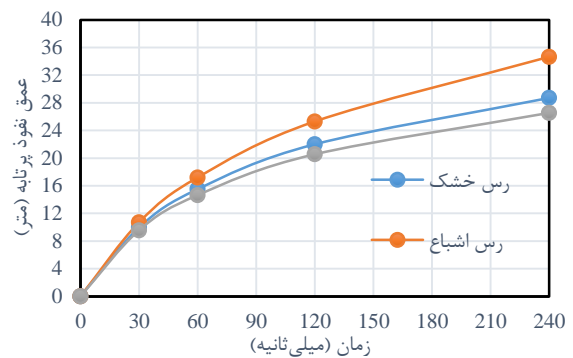
۲- صرف نظر از نوع خاک، میزان عمق نفوذ پرتابه در خاک کاملاً اشباع بیشتر از خاک کاملاً خشک است که امری بدیهی است، زیرا وجود رطوبت موجب کاهش مقاومت خاک می‌شود. اما در خاک رسی نشان داده شده است که عمق نفوذ در حالت نیمه اشباع (با درجه اشباع ۵۰٪) اندکی کمتر از حالت کاملاً خشک است که این امر به دلیل وجود مکش و فشار حفره‌ای منفی در رس نیمه اشباع رخ می‌دهد. فشار حفره‌ای منفی دانه‌های خاک را به سمت هم هول می‌دهد و میان دانه‌ها نیروی فشاری (دانه به دانه) ایجاد می‌کند؛ به همین دلیل مقاومت نفوذ رس نیمه اشباع (در منطقه موئینه) بیشتر از رس خشک است. پس از برخورد پرتابه به خاک رسی و افزایش چگالی، مدول برشی رس نیمه اشباع بزرگ‌تر از رس خشک و مدول برشی رس خشک نیز بزرگ‌تر از رس اشباع است (همان‌طور که در شکل (۳) نیز نشان داده شده است) [۱۳].

۳- میزان عمق نفوذ پرتابه در زمان ۳۰ میلی‌ثانیه در خاک‌های رسی و ماسه‌ای تا حدی مشابه است، اما با افزایش زمان، تفاوت‌ها نیز بیشتر می‌شود. این بدان معنی است که اگر از فیوز با زمان تأخیر در انفجار ۳۰ میلی‌ثانیه استفاده شود، نوع خاک تأثیر به سزایی در میزان عمق نفوذ پرتابه ندارد، اما اگر از فیوز با زمان تأخیر بالاتر (یعنی ۶۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ میلی‌ثانیه) استفاده شود، تفاوت میزان عمق نفوذ پرتابه قبل از انفجار در خاک‌های رسی و ماسه‌ای محسوس‌تر خواهد بود. برای درک بهتر موضوع می‌توان به ارزیابی نمودار سرعت پرتابه در برابر زمان پرداخت.

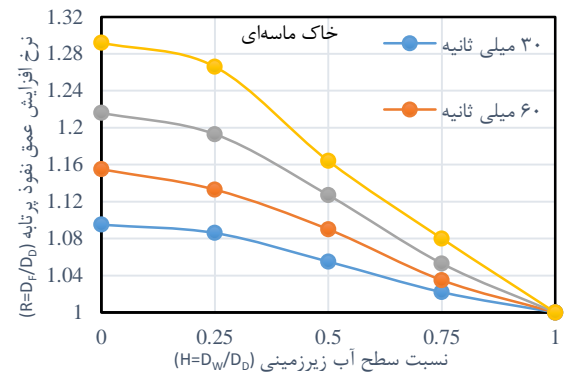
همان‌طور که در شکل (۱۶) نشان داده شده است، نمودار سرعت پرتابه در زمان‌های ابتدایی پس از برخورد در خاک‌های رسی و ماسه‌ای (در هر دو حالت خشک و اشباع) به هم نزدیک است، به طوری که در محدوده سرعت بین ۳۰۰ تا ۵۰۰ متر بر



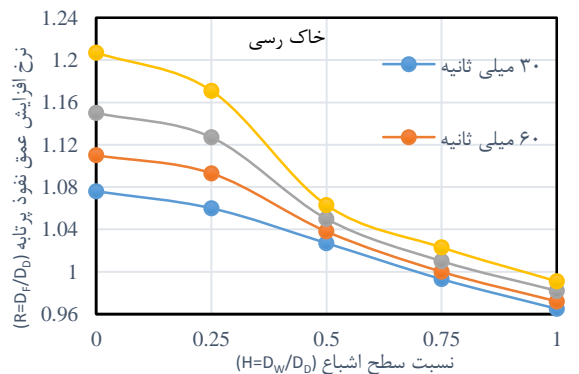
شکل ۱۲. منحنی عمق نفوذ پرتابه در برابر زمان در خاک ماسه‌ای



شکل ۱۳. منحنی عمق نفوذ پرتابه در برابر زمان در خاک رسی



شکل ۱۴. منحنی نرخ افزایش عمق نفوذ پرتابه در برابر نسبت سطح آب زیرزمینی در خاک ماسه‌ای



شکل ۱۵. منحنی نرخ افزایش عمق نفوذ پرتابه در برابر نسبت سطح اشباع در خاک رسی

به عبارت دیگر می‌توان گفت که هر چه خاک ریزدانه‌تر باشد، میزان عمق نفوذ بیشتر خواهد بود. برای توجیه این پدیده باید به این نکته اشاره کرد که ذرات ریزتر قابل انعطاف در خاک رسی، تنش‌های تماسی بیشتری را در اثر برخورد پرتابه تجربه می‌کنند (دارای نسبت سطح به حجم بیشتری از ماسه می‌باشند) و از این رو به احتمال زیاد بیشتر از ذرات درشت‌تر نسبتاً صلب در خاک ماسه‌ای فشرده (و یا خرد) می‌شوند که در برخی از مطالعات گذشته نیز به آن اشاره شده است [۱۲]. البته باید به این نکته نیز توجه شود که در ذرات بزرگ‌تر ترک‌های بیشتری وجود دارد و در نتیجه این ذرات به مقدار بیشتری در معرض خردشدگی قرار دارند. بنابراین دو سازوکار بر خردشدگی ذرات اثر می‌گذارد، اما مشاهدات میدانی و آزمایشگاهی نشان داده است که ذرات کوچک‌تر بیشتر خرد می‌شوند [۳۷-۳۴].

۵- صرف نظر از نوع خاک، با افزایش عمق سطح آب زیرزمینی یا سطح اشباع (D_w) از سطح زمین تا عمقی برابر با عمق نفوذ پرتابه در خاک کاملاً خشک (D_D)، عمق نهایی نفوذ (D_F) کاهش می‌یابد که نتیجه‌ای قابل انتظار است.

جدول ۵. عمق نفوذ پرتابه در خاک‌های ماسه‌ای و رسی خشک و اشباع

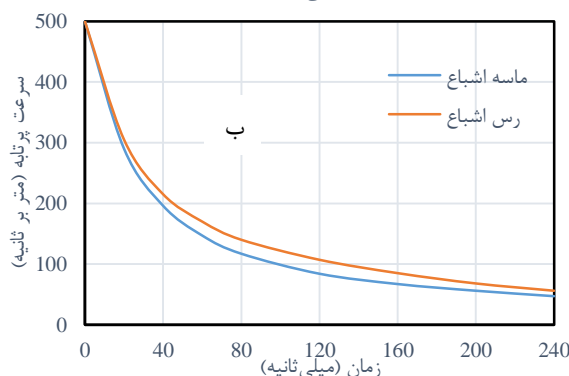
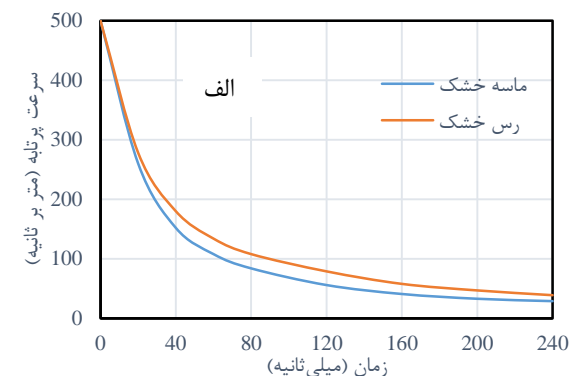
حالت خاک	عمق نفوذ در زمان تأخیر در انفجار معین (متر)			
	۳۰ ms	۶۰ ms	۱۲۰ ms	۲۴۰ ms
ماسه خشک	۹/۰۷	۱۲/۵۰	۱۸/۳۰	۲۳/۱۵
رس خشک	۹/۹۵	۱۵/۵۰	۲۲/۰۰	۲۸/۷۰
ماسه اشباع	۹/۹۳	۱۵/۶۰	۲۲/۲۵	۲۹/۹۰
رس اشباع	۱۰/۷۰	۱۷/۲۰	۲۵/۳۰	۳۴/۶۵

۶- مقایسه نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌ها برای عمق سطح آب زیرزمینی متفاوت نشان می‌دهد که به طور کلی در هر سطحی از آب زیرزمینی ($H = D_w/D_D$)، نرخ افزایش میزان عمق نفوذ پرتابه نسبت به حالت کاملاً خشک ($R = D_F/D_D$) در ماسه اندکی بیشتر از مقدار متناظر آن در رس است. به عنوان مثال، تفاوت نرخ افزایش عمق نفوذ در نسبت سطح آب زیرزمینی یا سطح اشباع برابر با ۱ و ۰ در زمان ۳۰ میلی‌ثانیه، به ترتیب برابر با ۰/۰۳۵ و ۰/۰۱۹ است، در حالی که در زمان ۲۴۰ میلی‌ثانیه، میزان تفاوت برابر با ۰/۰۰۹ و ۰/۰۸۵ است (جدول ۶).

جدول ۶. نرخ افزایش عمق نفوذ پرتابه نسبت به حالت خشک در سطوح آب زیرزمینی مختلف (در زمان ۳۰ و ۲۴۰ میلی‌ثانیه)

نوع خاک	نرخ افزایش عمق نفوذ پرتابه نسبت به حالت خشک ($R = D_F/D_D$)									
	نسبت سطح آب زیرزمینی (H) در ۲۴۰ میلی‌ثانیه					نسبت سطح آب زیرزمینی (H) در ۳۰ میلی‌ثانیه				
	۰/۰۰	۰/۲۵	۰/۵۰	۰/۷۵	۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۵	۰/۵۰	۰/۷۵	۱/۰۰
ماسه	۱/۰۹۵	۱/۰۸۶	۱/۰۵۵	۱/۰۲۲	۱/۰۰۰	۱/۲۹۲	۱/۲۶۶	۱/۱۶۴	۱/۰۸۰	۱/۰۰۰
رس	۱/۰۷۶	۱/۰۶۰	۱/۰۲۷	۰/۹۹۳	۰/۹۶۵	۱/۲۰۷	۱/۱۷۱	۱/۰۶۳	۱/۰۲۳	۰/۹۹۱

ثانیه تقریباً بر هم منطبق می‌باشند، اما با گذشت زمان بیشتر این دو نمودار از هم فاصله می‌گیرند که به معنای تفاوت عمق نفوذ پرتابه در زمان‌های بالاتر است.



شکل ۱۶. منحنی سرعت پرتابه (پس از برخورد) در برابر زمان در حالات (الف) خاک خشک و (ب) خاک اشباع

به عبارت دیگر می‌توان گفت که اگر در هنگام انفجار، پرتابه سرعتی برابر با ۳۰۰ متر بر ثانیه و یا بیشتر از آن داشته باشد، نوع خاک و حالت آن تأثیر قابل توجهی بر عمق نفوذ نخواهد داشت.

۴- میزان عمق نفوذ پرتابه در خاک رسی کاملاً خشک و یا کاملاً اشباع، در هر زمان، از میزان متناظر آن در خاک ماسه‌ای بیشتر است (البته میزان این تفاوت در زمان‌های ابتدایی کم است؛ به عنوان مثال، تفاوت عمق نفوذ برای حالات خشک و اشباع در زمان ۳۰ میلی‌ثانیه، به ترتیب برابر با ۰/۸۸ و ۰/۷۷ متر است، در حالی که در زمان ۲۴۰ میلی‌ثانیه، میزان تفاوت برابر با ۵/۵۵ و ۴/۷۵ متر است (جدول ۵)).

پرتابه خواهد گذاشت که در اکثر مطالعات قبلی اثر آن نادیده گرفته شده است. عملکرد ماسه و رس در لحظات ابتدایی پس از برخورد پرتابه و تا سرعت ۳۰۰ متر بر ثانیه تقریباً مشابه بوده و مستقل از درجه اشباع است، اما با گذشت زمان تفاوت پیدا خواهد کرد. به طور کلی عمق نفوذ بمب GBU-28 در خاک رسی بیشتر از خاک ماسه‌ای با تراکم مشابه به دست آمد، به نحوی که میزان عمق نفوذ در حالات کاملاً خشک و کاملاً اشباع، به ترتیب برابر با ۲۸/۷۰ و ۳۴/۶۵ متر برای خاک رسی و ۲۳/۱۵ و ۲۹/۹۰ متر برای خاک ماسه‌ای در زمان ۲۴۰ میلی‌ثانیه (بیشترین زمان تأخیر در انفجار) است؛ بنابراین میزان تفاوت عمق نفوذ در حالات خشک و اشباع، به ترتیب برابر با ۵/۵۵ و ۴/۷۵ متر است. با این حال، نرخ افزایش عمق نفوذ پرتابه نسبت به حالت کاملاً خشک، در ماسه بیشتر از مقدار متناظر آن در رس است. به عنوان مثال، در زمان ۲۴۰ میلی‌ثانیه و در حالتی که سطح آب زیرزمینی یا سطح اشباع در تراز سطح زمین قرار دارد (خاک کاملاً اشباع)، میزان نرخ افزایش عمق نفوذ در ماسه برابر با ۱/۲۹۲ و در رس برابر با ۱/۲۰۷ به دست آمد که نشان دهنده تفاوت ۸/۵ درصدی در عملکرد این خاک‌ها است. البته میزان این تفاوت در زمان‌های ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ میلی‌ثانیه به ترتیب برابر با ۱/۹، ۴/۵ و ۶/۶ درصد است که حاکی از تشابه نسبی عملکرد هر دو نوع خاک در لحظات اولیه پس از برخورد و سپس افزایش تفاوت عملکردشان با افزایش زمان است.

۶. مراجع

- [1] Gholizad, A.; Rajabi, M. "Securing the Buried Concrete Structure against Blast Loading"; J. Passive Defense Sci. & Tech. 2013, 3, 167-179 (In Persian).
- [2] Izadifard, R. A. "Blast and Ballistic Loading of Structures"; Malek-Ashtar University of Technology Press, Tehran, 2015 (In Persian).
- [3] Givi, M. K. B.; Baronaghi, H. R. "Modern Protective Structures"; Malek-Ashtar University of Technology Press, Tehran, 2012 (In Persian).
- [4] Khosravi, F.; Hedayatjou, J. "A Comparison between Governing Relations in Projectile Penetration's Equations in Different Soils"; J. Passive Defense 2010, 3, 19-28 (In Persian).
- [5] Vahedi, K.; Latifi, M.; Khodarahmi, H.; Khosravi, F. "Penetration Depth of Projectiles into Soil Covered Concrete Targets"; J. Energ. Mater. 2008, 3, 37-48 (In Persian).
- [6] Khojasteh, A.; Baronaghi, H. R. "Explosive Loading of Engineering Structures"; Malek-Ashtar University of Technology Press, Tehran, 2012 (In Persian).
- [7] Mohammadnezhad, M. "Dynamic Analysis of Large Underground Structures under Blast Loadings"; M.S. Thesis, Shahrood University of Technology, Shahrood, 2010 (In Persian).
- [8] Kalhor, M. "Numerical Investigation of Projectile Impact to Concrete Faced Rockfill Dam"; M.S. Thesis, Kharazmi University, Tehran, 2012 (In Persian).

در رابطه با این موضوع، باید به تأثیر ریز ساختار این خاک‌ها بر رفتار مکانیکی‌شان توجه نمود. مقاومت ماسه توسط اصطکاک بین ذرات کنترل می‌شود و حضور آب در ماسه اشباع موجب جداسازی ذرات ماسه با ایجاد یک لایه برشی فیزیکی مبتنی بر آب شده و در نتیجه، ضریب اصطکاک مؤثر بین ذره‌ای (نسبت سطح تسلیم به فشار) و سطح تسلیم را کاهش می‌دهد. از طرفی دیگر، مقاومت چسبندگی رس نیز عموماً با افزایش درجه اشباع کاهش می‌یابد که این کاهش مقاومت به جذب آب در درون ذرات نسبت داده می‌شود، چون منجر به افزایش جدایی بین لایه‌ای و در نتیجه کاهش مقاومت اتصال بین این لایه‌ها می‌گردد. اما عاملی که به نظر می‌رسد موجب نرخ افزایش میزان عمق نفوذ پرتابه بیشتر در ماسه می‌شود، روان‌گرایی جزئی خاک ماسه‌ای اشباع در اطراف پرتابه است. هنگامی که پرتابه در خاک ماسه‌ای اشباع نفوذ می‌کند، تمایل به فشردگی خاک منجر به افزایش فشار آب منفذی و در نتیجه کاهش تنش مؤثر می‌گردد. آفت کامل تنش مؤثر منجر به رخداد روان‌گرایی خواهد شد که این امر عموماً در خاک‌های رسی مشاهده نمی‌شود.

۷- هنگامی که نسبت سطح آب زیرزمینی (H) در خاک ماسه‌ای از ۱ به ۰ می‌رسد، نرخ افزایش عمق نفوذ پرتابه (R) در یک زمان تأخیر مشخص، به تدریج افزایش می‌یابد. اما در خاک رسی و به ویژه در زمان‌های ۱۲۰ و ۲۴۰ میلی‌ثانیه می‌توان مشاهده نمود که این نرخ پس از نسبت سطح اشباع ۰/۵، با شدت بیشتری افزایش می‌یابد. با این حال، تفاوت نرخ افزایش R در نسبت‌های سطح آب زیرزمینی یا سطح اشباع ۰/۲۵ و ۰، در هر دو نوع خاک و در همه زمان‌های تأخیر نسبتاً کم است. دلیل این امر را می‌توان به تشابه نسبی عملکرد خاک در حالات خشک، نیمه اشباع و اشباع، در زمان‌های ابتدایی پس از برخورد پرتابه نسبت داد؛ این بدان معنی است که در اعماق سطحی‌تر، مقاومت خاک در برابر نفوذ پرتابه تقریباً مستقل از درجه اشباع است.

۵. نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی پارامتریک عمق نفوذ بمب GBU-28 در خاک‌های ماسه‌ای و رسی و تأثیر سطح آب زیرزمینی یا سطح اشباع بر میزان نفوذ با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار AUTODYN انجام شد. بدین منظور ابتدا صحت‌سنجی پارامترهای مورد استفاده برای پرتابه و همچنین نحوه صحیح مدل‌سازی مسئله نفوذ در خاک در نرم‌افزار، از طریق مدل‌سازی مسئله نفوذ پرتابه در برخی از مطالعات گذشته و مقایسه نتایج حاصل انجام گردید و سپس به بررسی میزان عمق نفوذ بمب GBU-28 در حالات مختلف خاک پرداخته شد. نتایج به دست آمده نشان دادند که رطوبت خاک تأثیر قابل توجهی بر عمق نفوذ

- [24] Grujicic, 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.* 2008, 15, 79-99.
- [25] Grujicic, 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.
- [26] Zeng, L.; Wang, W. L.; Zhu, J. F. "The Numerical Simulation on Co-Damage Effectiveness of Penetration and Explosion Made by BLU-113"; *Computer Modeling and Simulation ICCMS'10*, 2010, 76-80.
- [27] Kopp, C. "The GBU-28 Bunker Buster (No. APA-TR-2005-0501, pp. 1-1)"; *Air Power Australia*, 2005.
- [28] Moxnes, J. F.; Frøyland, Ø.; Skriudalen, S.; Prytz, A. K.; Teland, J. A.; Friis, E.; Ødegårdstuen, G. "On the Study of Ricochet and Penetration in Sand, Water and Gelatin by Spheres, 7.62mm APM2, and 25 mm Projectiles"; *Defence Tech.* 2016, 12, 160-171.
- [29] Carton, E. P.; Roebroeks, G. H.; Broos, J. P.; Halls, V.; Zheng, J. "Characterization of Dynamic Properties of Ballistic Clay"; *InPASS 2014-Personal Armour Systems Symposium*, Robinson College, Cambridge, United Kingdom, 2014.
- [30] Børvik, T.; Dey, S.; Olovsson, L. "Penetration of Granular Materials by Small-Arms Bullets"; *Int. J. Impact Eng.* 2015, 75, 123-139.
- [31] Robbins, F. "Fuzes for Air Force Unguided and Precision Guided Weapons"; *Air Armament Center Eglin AFB FL*, 2001.
- [32] Omidvar, M.; Iskander, M.; Bless, S. "Stress-Strain Behavior of Sand at High Strain Rates"; *Int. J. Impact Eng.* 2012, 49, 192-213.
- [33] Powrie, W. "Soil Mechanics"; *Spon Press*, 2004.
- [34] Altuhafi, F. N.; Coop, M. R. "Changes to Particle Characteristics Associated with the Compression of Sands"; *Geotechnique* 2011, 61, 459-471.
- [35] Cavarretta, I.; Coop, M.; O'Sullivan, C. "The Influence of Particle Characteristics on the Behavior of Coarse Grained Soils"; *Geotechnique*, 2010, 60, 413-423.
- [36] Cavarretta, I.; O'sullivan, C. "The Mechanics of Rigid Irregular Particles Subject to Uniaxial Compression"; *Geotechnique* 2012, 62, 681.
- [37] Guzman, I. L.; Iskander, M.; Bless, S. "Observations of Projectile Penetration into a Transparent Soil"; *Mech. Res. Commun.* 2015, 70, 4-11.
- [9] Umbanhowar, P.; Goldman, D. I. "Granular Impact and the Critical Packing State"; *Phys. Rev. E.* 2010, 82, 010301.
- [10] Kharab, A.; Hudspeth, R. T.; Guenther, R. B. "Penetration of Cylindrical Projectiles into Saturated Sandy Media"; *Exp. Mech.* 2009, 49, 605-612.
- [11] Marston, J. O.; Vakarelski, I. U.; Thoroddsen, S. T. "Sphere Impact and Penetration into Wet Sand"; *Phys. Rev. E.* 2012, 86, 020301.
- [12] Omidvar, M.; Iskander, M.; Bless, S. "Response of Granular Media to Rapid Penetration"; *Int. J. Impact Eng.* 2014, 66, 60-82.
- [13] "Report to Congress on the Conduct of the Persian Gulf War"; http://es.rice.edu/projects/Poli378/Gulf/gwtxt_ch6.html#GBU-28, 2011.
- [14] Darban, H. "An Introduction to LS-DYNA Software"; *Malek-Ashtar University of Technology Press*, Tehran, 2012 (In Persian).
- [15] Fallahzadeh, P. "The Effect of Explosion on Underground Structures"; *M.S. Thesis*, Iran University of Science and Technology, Tehran, 2008 (In Persian).
- [16] Moeinoddini, H. "Modeling and Analysis of Effective Parameters in Hemispherical Body's Penetration into Thin Metallic Targets"; *M.S. Thesis*, Khajeh Nasir Toosi University of Technology, Tehran, 2012 (In Persian).
- [17] Kondic, L.; Fang, X.; Losert, W.; O'Hern C. S.; Behringer R. P. "Microstructure Evolution during Impact on Granular Matter"; *Phys. Rev. E.* 2012, 85, 011305.
- [18] Seguin, A.; Bertho, Y.; Gondret, P.; Crassous, J. "Sphere Penetration by Impact in a Granular Medium: A Collisional Process"; *Europhysics Letters*, 2009, 88, 44002.
- [19] Dwivedi, S. K.; Teeter, R. D.; Felice, C. W.; Gupta, Y. M. "Two Dimensional Mesoscale Simulations of Projectile Instability during Penetration in Dry Sand"; *J. Appl. Phys.* 2008, 104, 083502.
- [20] Borg, J. P.; Vogler, T. J. "Mesoscale Simulations of a Dart Penetrating Sand"; *Int. J. Impact Eng.* 2008, 35, 1435-1440.
- [21] Pandurangan, B. "Development, Parameterization and Validation of Dynamic Material Models for Soil and Transparent Armor Glass"; *Ph.D. Thesis*, Clemson University, USA, 2009.
- [22] Laine, L.; Sandvik, A. "Derivation of Mechanical Properties for Sand"; *In Proceedings of the 4th Asia-Pacific Conference on Shock and Impact Loads on Structures*, CI-Premier PTE LTD, Singapore, 361, 368. ANSYS Inc., 2001.
- [23] Grujicic, M.; Pandurangan, B.; Qiao, R.; Cheeseman, B. A.; Roy, W. N.; Skaggs, R. R.; Gupta, R. "Parameterization of the Porous-Material Model for Sand with Different Levels of Water Saturation"; *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 2008, 28, 20-35.