

ارزیابی عمق نفوذ بمب در سنگ‌های با $RMR > 90$

ایوب الیاسی^۱، سیدحسین میرزینلی^{۲*}

^۱ فارغ‌التحصیل دکترای دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس

^۲ استادیار پژوهشکده سازه‌های امن، گروه پدافند غیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۹۴/۱۰/۷، پذیرش: ۹۷/۲/۸، نشر آنلاین: ۹۷/۲/۸)

چکیده

برای طراحی هرگونه سازه امن زیرزمینی نیاز است این سازه در عمق بهینه اجرا گردد تا با وجود سرباره بتواند از امنیت کامل برخوردار باشد. بنابراین دانستن میزان عمق نفوذ بمب‌های سنگ‌شکن که نهایتاً انفجار در آن حاصل می‌شود در طراحی سازه‌های پدافندی ضروری می‌باشد. میزان عمق نفوذ علاوه بر مشخصات پرتابه و سرعت اصابت آن بستگی به مشخصات ژئومکانیکی و مقاومتی محیطی که مورد برخورد قرار می‌گیرد دارد. در این تحقیق مدل‌سازی عمق نفوذ بمب GBU-28 (Guided Bomb Unit-28) توسط نرم‌افزار آباکوس (ABAQUS) و در سنگ‌های با $RMR > 90$ (Rock Mass Rating) (سه نوع سنگ گرانیت، ماسه‌سنگ و آهک) انجام می‌گیرد. این بمب هدایت‌شونده به وسیله لیزر از انواع بمب‌های نفوذگر می‌باشد که قبل از انفجار چندین متر به درون خاک، سنگ و یا بتن نفوذ کرده و سپس منفجر می‌گردد. در این تحقیق، در ابتدا پارامترهای ژئومکانیکی هر سه نوع سنگ با $RMR > 90$ توسط مطالعات کتابخانه‌ای و نرم‌افزار RocData تعیین می‌گردد. سپس عمق نفوذ بمب در هر سه نوع سنگ توسط مدل‌سازی به دست آورده می‌شود. از آنجا که پارامترهای مقاومتی سنگ با RMR مشخص منحصربه‌فرد نمی‌باشد، بنابراین آنالیز حساسیت علاوه بر سرعت برخورد بمب بر روی پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ نیز انجام گرفته و در پایان نیز نتایج به دست آمده از مدل‌های عددی توسط روابط تجربی راستی‌آزمایی می‌گردد. مدل‌سازی عددی توسط نرم‌افزار المان محدود نشان می‌دهد که عمق نفوذ در سنگ‌های با $RMR > 90$ گرانیت، ماسه‌سنگ و آهک به ترتیب ۸۰/۳۳، ۴/۴ و ۵/۳۷ متر می‌باشد.

کلید واژه‌ها: عمق نفوذ، GBU-28، RMR، آباکوس، RocData، آنالیز حساسیت.

۱- مقدمه

برای هدف‌گیری دقیق، یک مجموعه هدایت و کنترل که عمدتاً بر مبنای تصاویر تلویزیونی و یا بازتابش پرتوهای لیزری است در سر مجموعه قرار دارد. قطر کم و وزن زیاد باعث کاهش مقاومت هوا در مقابل سقوط بمب و سرعت گرفتن هر چه بیشتر آن می‌شود. GBU-28 یک نمونه از این بمب‌ها می‌باشد (Wikipedia, 2014). مشخصات بمب هدایت‌شونده واحد ۲۸ که توسط شرکت رایتون^۱ طراحی و ساخته شده است (شکل (۱)) در جدول (۱) آمده است (Wikipedia, 2014).

استحکامات نظامی زیرزمینی برخی از کشورها در هنگام جنگ از مهم‌ترین اماکن راهبردی آن‌ها می‌باشد این استحکامات جایگاه قرارگیری فرماندهی، انبارهای مهمات و آزمایشگاه‌های پژوهشی پنهانی بوده که همگی از دید راهبردی مهم و برای آغاز و ادامه جنگ ارزشمند است. همچنین در جنگ اول خلیج فارس طبق گزارش‌ها عراق دارای تأسیسات زیرزمینی غیرقابل نفوذی بود که با سلاح‌های موجود امکان انهدام آن‌ها وجود نداشت. بنابراین پروژه‌ای برای ساخت بمبی با قابلیت انهدام اهداف این چنینی تعریف گردید (Hansson, 2011). ارتش آمریکا چندین جنگ‌افزار گوناگون ویژه برای تازش به این پناهگاه‌های نظامی زیرزمینی دارد. اصطلاحاً به چنین بمب‌هایی نفوذگر می‌گویند. این بمب‌ها قبل از انفجار چندین متر به درون خاک، سنگ و یا بتن نفوذ کرده و سپس منفجر می‌گردد (Hansson, 2011).

جدول ۱- مشخصات بمب هدایت‌شونده واحد ۲۸

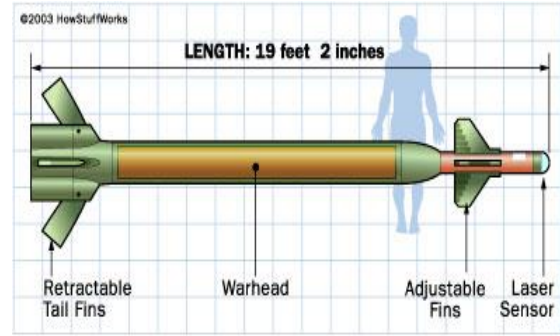
وزن (کیلوگرم)	طول (متر)	قطر (متر)	وزن ماده منفجره (کیلوگرم)	نوع ماده منفجره
۲۱۳۰	۵/۸۴	۰/۳۷۰	۳۰۶	TNT و پودر آلومینیوم

1. Raytheon

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۲۵۱۳۸۳۲۰

آدرس ایمیل: a.elyasi1986@yahoo.com (ا. الیاسی)، mirzeinaly@gmail.com (س. ح. میرزینلی).

پروژه‌های مشابه با پروژه مورد نظر بنا شده است. روش‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ ستون فقرات نگرش‌های تجربی را تشکیل می‌دهد و به‌طور وسیع در مطالعات مهندسی سنگ به‌کار می‌رود. در بسیاری از پروژه‌ها، طبقه‌بندی مهندسی سنگ‌ها به‌عنوان تنها مبنای عملی برای طراحی سازه‌های پیچیده تلقی می‌شود. در میان روش‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ در این تحقیق از دو روش طبقه‌بندی RMR و GSI برای تعیین پارامترهای ورودی آباکوس استفاده شده است که مختصری از این دو روش در زیر آورده شده است.



شکل ۱- بمب GBU-28 (Wikipedia, ۲۰۱۴)

۲-۱- امتیاز توده‌سنگ (RMR)

برای اولین بار طبقه‌بندی ژئومکانیک یا سیستم امتیاز توده-سنگ (RMR) توسط بینیاوسکی^۴ در انجمن تحقیقات علمی و صنعتی جنوب آفریقا (CSIR)^۵، مبتنی بر تجربیات وی در تونل‌های کم‌عمق در سنگ‌های رسوبی، توسعه یافت. از آن وقت به بعد این طبقه‌بندی تحت چندین تغییر مهم قرار گرفته است. کیفیت توده-سنگ با توجه به امتیازهای شش پارامتر زیر بیان می‌گردد (Bieniawski, ۱۹۸۹):

- ✓ مقاومت فشاری تک‌محوری ماده سنگ یکپارچه
- ✓ ضریب کیفیت سنگ RQD
- ✓ فاصله‌داری درزه یا ناپیوستگی
- ✓ وضعیت درزه
- ✓ شرایط آب زمین
- ✓ جهت یافتگی درزه

امتیاز توده‌سنگ، پس از قضاوت در مورد جهت یافتگی ناپیوستگی‌ها با جمع جبری امتیازهای پارامترهای معین شده در جدول‌های مربوطه به‌دست می‌آید. مجموع امتیازهای چهار پارامتر، امتیاز وضعیت سنگ (RCR) نامیده می‌شود که تأثیر مقاومت فشاری ماده‌سنگ یکپارچه و جهت یافتگی درزه‌ها در آن به حساب نمی‌آید. با انفجارهای سنگین شکستگی‌های جدیدی ایجاد می‌شود. تجربه نشان می‌دهد در مواقعی که برای حفاری تونل از TBM ها و رودهدرها^۶ استفاده می‌شود، ۱۰ امتیاز باید به مقدار دست آمده اضافه گردد، ولی با توجه به کیفیت آتشیاری کنترل شده، ۳ تا ۵ امتیاز اضافه می‌گردد. بر اساس مقادیر RMR در یک سازه مهندسی مشخص، توده‌سنگ به پنج کلاس با نام‌های خیلی خوب (RMR=81-100)، خوب (RMR=61-80)، نسبتاً خوب (RMR=41-60)، ضعیف (RMR=21-40) و خیلی ضعیف (RMR=0-20) طبقه‌بندی می‌شود (Bieniawski, ۱۹۸۹).

ضرورت ارزیابی عمق نفوذ به این دلیل می‌باشد که تحلیل سازه زیرزمینی در برابر انفجار بمب‌های سنگ‌شکن نیازمند تعیین عمق انفجار (نفوذ) بمب می‌باشد. همچنین از آنجایی که آزمایش صحرائی هزینه‌بر و زمان‌بر بوده و حل تحلیلی نیز شامل فرضیات ساده‌سازی مسئله است حل عددی برای شبیه‌سازی درست نفوذ بمب ضروری می‌باشد. در این طرح ارزیابی عمق نفوذ بمب GBU-28 در سنگ‌های با $RMR > 90$ توسط حل عددی شبیه‌سازی می‌گردد.

میزان عمق نفوذ علاوه بر مشخصات پرتابه و سرعت اصابت آن بستگی به مشخصات ژئومکانیکی و مقاومتی محیطی که مورد برخورد قرار می‌گیرد دارد. بنابراین بررسی تأثیر پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ بر عمق نفوذ بمب حائز اهمیت می‌باشد به همین منظور در این تحقیق سه نوع سنگ با $RMR > 90$ ^۱ شامل گرانیت، ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک جهت ارزیابی عمق نفوذ بمب GBU-28 در نظر گرفته شده است.

در این تحقیق در ابتدا توسط سیستم‌های رده‌بندی توده-سنگ، مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی سه نوع سنگ گرانیت، آهک و ماسه‌سنگ با شاخص امتیازدهی توده‌سنگ بزرگ‌تر از ۹۰ تعیین می‌گردند. این پارامترها، به‌عنوان ورودی مشخصات محیط در نرم-افزار آباکوس^۳ (Dassault Systemes, ۲۰۱۰) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مدل‌سازی المان محدود انجام گرفته، عمق نفوذ بمب GBU-28 در سه نوع سنگ ذکر شده به‌دست آورده می‌شود و همچنین تحلیل حساسیت بر روی تأثیر پارامترهای توده‌سنگ و همچنین سرعت بمب بر عمق نفوذ انجام می‌گیرد. در نهایت نتایج به‌دست آمده برای عمق نفوذ توسط روابط تجربی راستی‌آزمایی می‌گردد.

۲- سیستم طبقه‌بندی

روش‌های تجربی طراحی بر اساس تجربیات عملی بر روی

۵. South African Council of Scientific and Industrial Research

۶. Roadheader

۲. Rock mass rating

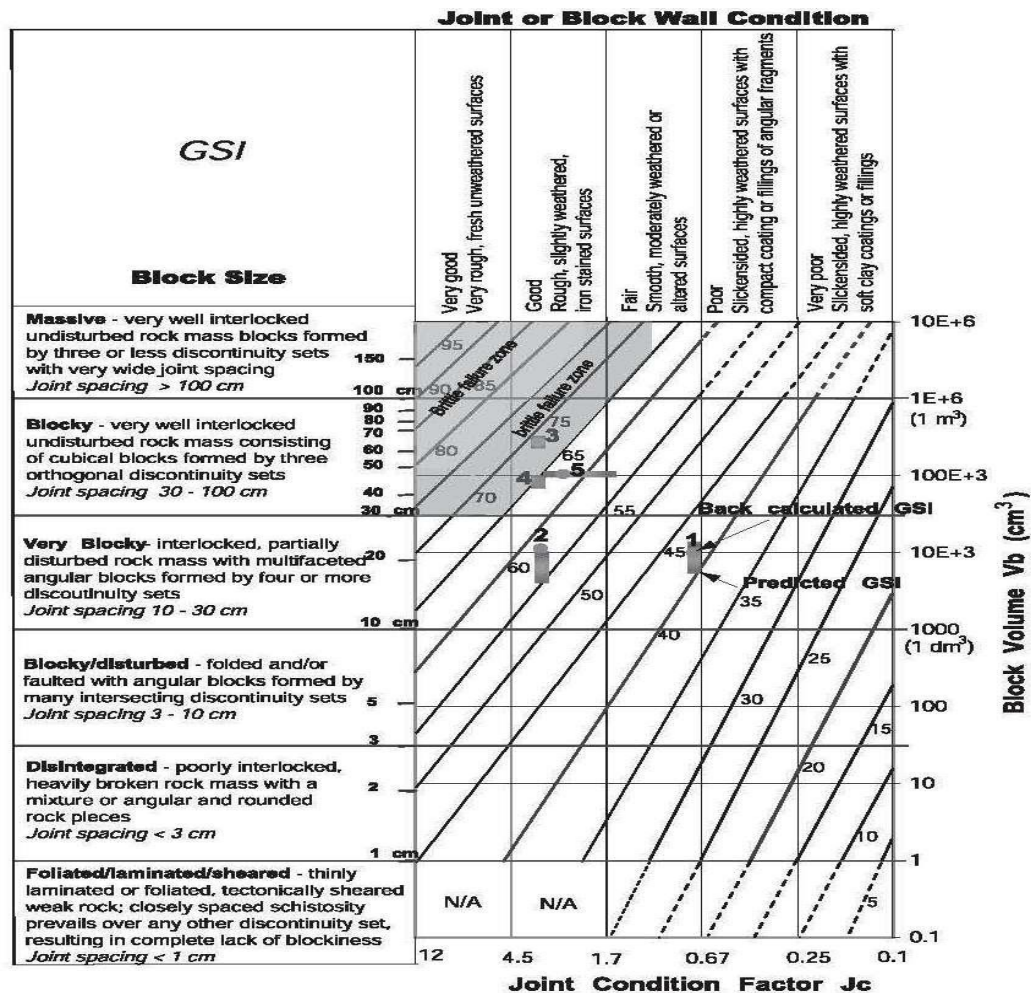
۳. ABAQUS

۴. Bieniawski

مرتبط می‌باشد. این سیستم بر اساس توصیف فاکتورهای ساختار توده‌سنگ و شرایط سطح درزه، تشکیل شده است (شکل ۲). این دو فاکتور بر اساس مشاهدات صحرایی مشخص شده و سپس مقادیر عددی تعیین می‌گردد (Cai و همکاران، ۲۰۰۴).

۲-۲- شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)^۷

سیستم GSI تنها سیستم طبقه‌بندی توده‌سنگ می‌باشد که به‌طور مستقیم با پارامترهای مهندسی از قبیل پارامترهای مقاومتی موهر-کلمب^۸ و هوک-بران^۹ و یا مدول توده‌سنگ،



شکل ۲- مقداردهی چارت GSI (Cai و همکاران، ۲۰۰۴)

دارد. در این مطالعه چندین مورد از این روابط که دارای دقت بالاتر و کاربرد بیشتری است، بررسی شده است (li و همکاران، ۲۰۰۵).

- اصلاح‌شده پتری^{۱۱}

این فرمول در سال ۱۹۱۰ به‌دست آمده و قدیمی‌ترین فرمول موجود می‌باشد. همچنین این فرمول معمول‌ترین فرمول در آمریکا برای به‌دست آوردن عمق نفوذ (X) در هدف بتنی نامحدود می‌باشد. در این رابطه قطر، جرم و سرعت پرتابه و مقاومت بتن در نظر گرفته شده است (li و همکاران، ۲۰۰۵).

۳- تئوری برخورد (ضربه) و نفوذ

Heuze (۱۹۹۰) با مطالعه منابع متعدد کتابخانه‌ای، مختصری از مطالعات نفوذ صورت گرفته قبل از سال ۱۹۹۰ میلادی را ارائه کرده است. تمرکز این مطالعات بر روی ژئومتریال^{۱۰} و مخصوصاً سنگ و به‌صورت بررسی‌های تجربی، تحلیلی و شبیه‌سازی‌های عددی می‌باشد. به‌دلیل شباهت رفتار مکانیکی بتن و سنگ، در اغلب موارد این سیستم طبقه‌بندی برای مطالعه بتن نیز به‌کار می‌رود (Heuze، ۱۹۹۰).

روابط متعددی در مورد نفوذ پرتابه در هدف سخت وجود

10. Geomaterials

11. Petry

۷. Geological strength index

8. Mohr- Coulomb

9. Hoek- Brown

که x میزان نفوذ، d قطر بدنه پرتابه، M وزن پرتابه و V سرعت برخورد پرتابه به هدف می‌باشد.

- اصلاح شده NDRC^{۱۴} (کمیته تحقیقات دفاع ملی آمریکا) این فرمول در سال ۱۹۴۶ بر اساس فرمول ACE و برای برخورد پرتابه صلب به هدف بتنی حجیم و همچنین رابطه گروه مهندسی ارتش آمریکا (ACF) ارائه شده است. در این رابطه علاوه بر قطر، جرم، سرعت پرتابه و مقاومت بتن، شکل پرتابه نیز تأثیر داده شده است:

$$G = \frac{KN^*M}{d} \left(\frac{V_0}{1000d} \right)^{1.8} \quad (۴)$$

که:

$$\begin{cases} G = \left(\frac{x}{2d} \right)^2, & \text{for } \frac{x}{d} \leq 2 \\ G = \frac{x}{d} - 1, & \text{for } \frac{x}{d} > 2 \end{cases} \quad (۵)$$

N^* فاکتور شکل دماغه می‌باشد (برای شکل‌های دماغه تخت^{۱۵}، نیم‌کره‌ای^{۱۶}، مخروط ناقص^{۱۷} و تیز^{۱۸} به ترتیب ۰/۷۲، ۰/۸۴، ۱/۰ و ۱/۱۴ می‌باشد). همچنین K فاکتور قابلیت نفوذپذیری بتن بوده که تابعی از مقاومت فشارشی آن می‌باشد. کندی ارتباط بین K و مقاومت فشارشی بتن را به صورت رابطه (۶) ارائه دادند:

$$k = \frac{180}{\sqrt{f_c}} \quad (۶)$$

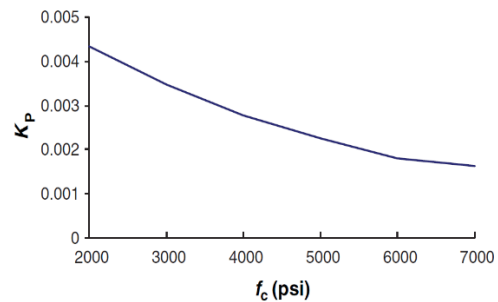
فرمول‌های دیگر محاسبه عمق نفوذ بمب نظیر آمان و ویتنی^{۱۹}، هیوز، ویفن^{۲۰}، کار^{۲۱}، UKAEA.CEA-EDF^{۲۲}، بچتل^{۲۳}، استون و وبستر^{۲۴}، دگن^{۲۵}، چانگ^{۲۶} و ... در مراجع مربوطه ارائه شده است (Zhou و Heuze، ۱۹۹۰، ۲۰۰۹).

۴- شبیه‌سازی نفوذ بمب GBU-28 با استفاده از مدل‌سازی عددی

همان‌گونه که عنوان شد روابط تجربی و تحلیلی روش مناسبی برای محاسبه و تحلیل مسائل بارگذاری‌های شدید در محیط توده‌سنگ نیست (به دلیل فرضیات ساده‌سازی زیاد). به همین منظور در این تحقیق جهت شبیه‌سازی عمق نفوذ بمب GBU-28 از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شده است. در مراحل مدل‌سازی بعد از ساخت هندسه بمب و محیط می‌بایست مشخصات رفتاری محیط تخصیص داده شود. در این تحقیق بمب به صورت صلب در نظر گرفته شده و رفتار محیط به صورت الاستوپلاستیک فرض می‌گردد. پارامترهای لازم جهت تحلیل مدل

$$x = 12K_p A_p \log_{10} \left(1 + \frac{V_0^2}{215000} \right) \quad (۱)$$

که A_p فشار پرتابه که از تقسیم وزن بر واحد مساحت به دست آورده می‌شود (lb/ft^2)، K_p قابلیت نفوذپذیری بتن می‌باشد که بستگی به مقاومت آن و درجه تقویت آن دارد (شکل (۳))، V_0 سرعت اصابت پرتابه می‌باشد. ضریب نفوذپذیری بتن بر حسب مقاومت فشاری از شکل (۳) به دست آورده می‌شود.



شکل ۳- تغییرات ضریب نفوذپذیری بتن نسبت به مقاومت فشارشی محصور نشده آن (li و همکاران، ۲۰۰۵)

از رابطه پتری می‌توان برای به دست آوردن عمق نفوذ بمب در سنگ نیز استفاده کرد. اما همان‌طور که مشخص است، به دست آوردن پارامترهای موردنیاز آن نیاز به انجام مطالعات آزمایشگاهی دارد.

- آزمایشگاه تحقیقات بالستیک (BRL)^{۱۲} در سال ۱۹۴۱ به منظور محاسبه عمق نفوذ پرتابه صلب در بتن و بر اساس نتایج آزمایشگاهی به دست آمده است (Heuze، ۱۹۹۰).

$$\frac{x}{d} = \frac{427}{\sqrt{f_c}} \left(\frac{M}{d^3} \right)^{0.2} \left(\frac{V_0}{1000} \right)^{1.33} \quad (۲)$$

M وزن پرتابه، d قطر بدنه پرتابه، f_c مقاومت فشارشی محصور نشده هدف و V_0 سرعت برخورد پرتابه به هدف می‌باشد.

- مهندسی ارتش (ACE)^{۱۳} در سال ۱۹۴۳ توسط ارتش آمریکا و بر اساس نتایج آزمایشگاهی و اصلاح رابطه آزمایشگاه تحقیقات بالستیک به دست آورده شده است (Heuze، ۱۹۹۰).

$$\frac{x}{d} = \frac{282.6}{\sqrt{f_c}} \left(\frac{M}{d^3} \right)^{0.215} \left(\frac{V_0}{1000} \right)^{1.5} + 0.5 \quad (۳)$$

۲۰. Whiffen

۲۱. Kar

۲۲. CEA-EDF perforation

۲۳. Bechtel

۲۴. Stone and Webster

۲۵. Degen

۲۶. Chang

۱۲. Ballistic Research Laboratory

۱۳. Army corps of engineers

۱۴. Modified NDRC

۱۵. Flat

۱۶. Hemispherical

۱۷. Blunt

۱۸. Sharp

۱۹. Ammann and Whitney

بکر، اندیس مقاومت زمین‌شناسی (GSI)، ثابت معیار موهر هوک-بروان برای سنگ بکر (m_i) و فاکتور آشفستگی (D)^{۲۸} می‌باشد. با توجه به مراجع، مقادیر مقاومت فشاری سنگ بکر برای نمونه‌های سنگ‌آهک، ماسه‌سنگ و گرانیت به ترتیب ۸۰، ۱۰۰ و ۱۶۰ مگاپاسکال می‌باشد (Palmstrom, ۲۰۰۰). مقادیر امتیاز توده‌سنگ‌های آهک، ماسه‌سنگ و گرانیت با استفاده از روابط تجربی ارائه‌شده به مقادیر اندیس مقاومت زمین‌شناسی جهت استفاده در نرم‌افزار RocData تبدیل می‌گردد (Hoek و Brown, ۱۹۹۷).

$$GSI = RMR - 5 \quad (V)$$

بنابراین برای هر سه نوع سنگ مذکور $90 < RMR < 100$ برابر است با $85 < GSI < 95$. همچنین مقادیر- ثابت معیار موهر هوک-بروان برای سنگ بکر (m_i) مطابق جدول (۲) و برای هر سه نوع سنگ‌آهک، ماسه‌سنگ و گرانیت، به‌عنوان ورودی نرم‌افزار RocData تعیین می‌گردد. همچنین به‌دلیل عدم انفجار بمب، مقدار فاکتور آشفستگی محیط صفر در نظر گرفته می‌شود.

رفتاری الاستوپلاستیک شامل مدول الاستیسیته، ضریب پواسون^{۲۷}، زاویه اصطکاک داخلی و ... می‌باشد. از آنجاکه در این تحقیق به بررسی عمق نفوذ بمب در سه نوع سنگ‌آهک، ماسه-سنگ و گرانیت با $RMR > 90$ پرداخته می‌شود پارامترهای مقاومتی ذکر شده می‌بایست جداگانه برای هر یک از سنگ‌ها به‌دست آورده شود. روش به‌دست آوردن پارامترهای مقاومتی مورد استفاده در مدل‌سازی در زیر آورده شده است.

۴-۱- پارامترهای ژئوتکنیکی سنگ‌های آهک، ماسه‌سنگ و گرانیت با $RMR > 90$

از جمله مشکلات بزرگ در بحث مدل‌های عددی، مسئله داده‌های ورودی معتبر نباشند، نتایج نیز از اعتبار چندانی برخوردار نخواهد بود. به همین منظور برنامه‌های نرم‌افزاری مانند RockLab (Rocscience Ltd, ۲۰۰۲) و RocData (Rocscience Ltd, ۲۰۰۵) و RocData ارائه شده است و به کاربر این امکان را می‌دهد تا تخمینی مناسب از خصوصیات توده‌سنگ را به‌دست آورد. داده‌های ورودی این نرم‌افزار شامل مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ

جدول ۲- مقادیر ثابت m_i سنگ بکر برای انواع مختلف سنگ‌ها (Marinos و Hoek, ۲۰۰۱)

Rock Type	Class	Group	Texture				
			Coarse Conglomerates	Medium Sandstones	Fine Siltstones	Very fine Claystones	
Sedimentary	Clastic		*	17±4	7±2	4±2	
			Breccias		Greywackes	Shales	
			*		18±3	6±2	
						Marls	
						7±2	
	Non-Clastic	Carbonates	Crystalline Limestones		Sparitic Limestones	Mieritic Limestones	Dolomites
				12±3	10±2	9±2	9±3
		Evaporites			Gypsum	Anhydrite	
					8±2	12±2	
							Chalk
	Organic				7±2		
Metamorphic	Non Foliated		Marble	Hornfels	Quartzites		
			9±3	19±4	20±3		
				Metasandstones			
	Slightly foliated		Migmatite	Amphibolites	Gneiss		
				29±3	26±6	28±5	
	Foliated			Schists	Phyllites	Slates	
					12±3	7±3	7±4
Igneous	Plutonic	Light	Granite	Diorite			
			32±3	25±5			
				Granodiorite			
				29±3			
				Gabbro	Diorite		
	Dark				Norite		
					20±5		
					Porphyries	Diabase	Peridotite
					20±5	15±5	25±5
Volcanic	Lave		Rhyolite	Dacite			
			25±5	25±3			
			Andesite	Basalt			
			25±5	25±5			
				Agglomerate	Breccia	Tuff	
Pyroelastic	19±3	19±5	13±5				

27. Poisson's ratio
28. Disturbance factor

جدول ۳- مقادیر مدول تغییر شکل سه نوع سنگ آهک، ماسه سنگ و گرانیت مرتبط با مقاومت فشاری تک محوره و GSI های مختلف

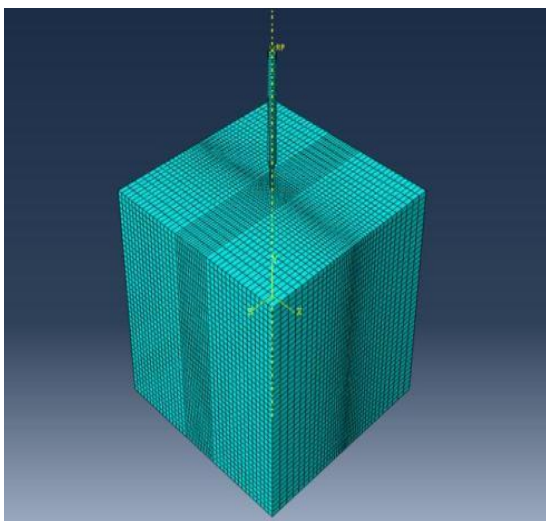
گرانیت	ماسه سنگ		آهک			UCS(MPA)	GSI
	۱۰۰	۸۰	۷۰	۶۰	۵۰		
۹۹/۱۷	۷۴/۹۸	۶۷/۰۷	۶۲/۷۴	۵۸/۰۹	۵۰/۰۲	۸۵	مدول تغییر شکل (GPa)
۱۰۱/۸۳	۷۹/۴۳	۷۱/۰۵	۶۶/۴۶	۶۱/۵۲	۵۶/۱۶	۸۶	
۱۰۶/۷۵	۸۴/۱۴	۷۵/۲۵	۷۰/۳۹	۶۵/۱۷	۵۹/۵۰	۸۷	
۱۱۳/۰۹	۸۹/۱۲	۷۹/۷۱	۷۴/۵۶	۶۹/۰۴	۶۳/۰۲	۸۸	
۱۱۹/۷۹	۹۴/۴۰	۸۴/۴۳	۷۸/۹۸	۷۳/۱۲	۶۶/۷۵	۸۹	
۱۲۶/۹۰	۱۰۰/۰۰	۸۹/۴۴	۸۳/۶۶	۷۷/۴۵	۷۰/۷۱	۹۰	
۱۳۴/۴۲	۱۰۵/۹۲	۹۴/۷۴	۸۸/۶۲	۸۲/۰۵	۷۴/۹۰	۹۱	
۱۴۲/۳۹	۱۱۲/۲۰	۱۰۰/۳۵	۹۳/۸۷	۸۶/۹۱	۷۹/۳۳	۹۲	
۱۵۰/۸۲	۱۱۸/۸۵	۱۰۶/۳۰	۹۹/۴۳	۹۲/۰۶	۸۴/۰۴	۹۳	
۱۵۹/۷۶	۱۲۵/۸۹	۱۱۲/۶۰	۱۰۵/۳۲	۹۷/۵۱	۸۹/۰۲	۹۴	
۱۶۹/۲۳	۱۳۳/۳۵	۱۱۹/۲۷	۱۱۱/۵۷	۱۰۳/۲۹	۹۴/۲۹	۹۵	

شکل ۴) می باشد. تعیین شرایط مرزی همواره یکی از کلیدی ترین چالش ها در مدل سازی دینامیکی و ژئومکانیکی است که غالباً با توجه به شرایط تکتونیکی و زمین شناسی در نواحی مرزی ساختار ژئومکانیکی معین می شوند. در این مطالعه شرایط مرزی مسئله به صورت ذیل می باشند:

(۱) مرز پایینی مدل در همه جهات بسته شده است.

(۲) مرز بالایی مدل آزاد است.

هیچ جابه جایی نرمالی در مرزهای جانبی مدل وجود ندارد. بعد از ایجاد هندسه و تخصیص شرایط اولیه و شرایط مرزی، خصوصیات رفتاری مواد تخصیص داده می شود (سرعت برخورد بمب ۴۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است).



شکل ۴- شمای کلی مدل های ایجاد شده

در نهایت مقادیر مدول تغییر شکل و زاویه اصطکاک داخلی توسط نرم افزار RocData مرتبط با RMR های ۹۰ تا ۱۰۰ (GSI های ۸۵ تا ۹۵)، برای هر سه نوع سنگ به دست آورده می شود. مقادیر مدول تغییر شکل سنگ در جدول (۳) ارائه شده است. در ابتدا برای مدل سازی نفوذ هر یک از سنگ ها مقدار مدول تغییر شکل متوسط (مرتبط با RMR=95) در نظر گرفته می شود و در پایان تحلیل حساسیت بر روی مقادیر مدول تغییر شکل به دست آمده از RMR برابر ۹۰ تا ۱۰۰ انجام می گیرد.

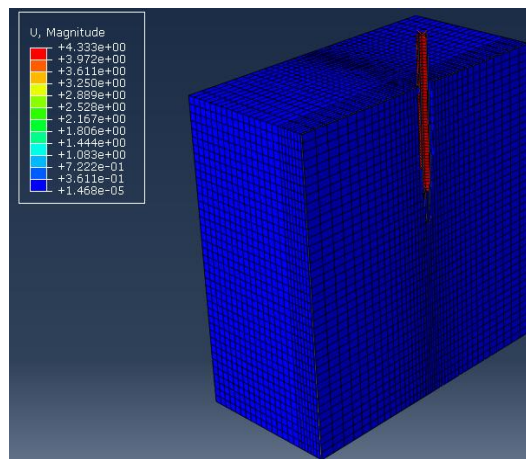
مقادیر پارامترهای دیگر مورد نیاز مدل سازی شامل دانسیته برای سه نوع سنگ گرانیت، ماسه سنگ و سنگ آهک به ترتیب برابر با ۲۶۵۰، ۲۳۰۰ و ۲۶۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ضریب پواسون سنگ های گرانیت، ماسه سنگ و سنگ آهک به ترتیب برابر با ۰/۱۸، ۰/۲۰ و ۰/۳۰ می باشد (Zhang و Peng, ۲۰۰۷).

۴-۲- عمق نفوذ بمب GBU-28 در سنگ های آهک، ماسه-

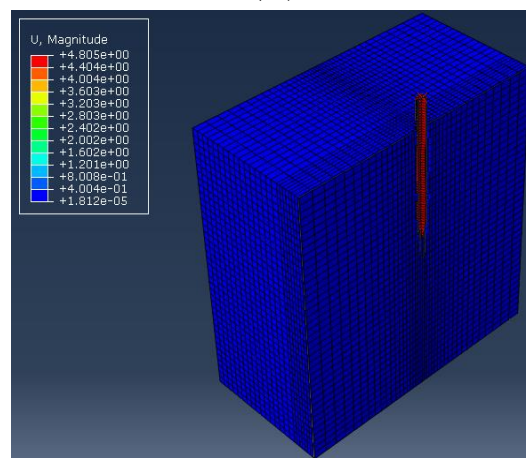
سنگ و گرانیت با RMR>90

در مدل سازی نفوذ، هندسه طوری طراحی می گردد که بمب به مرکز وجه بالایی برخورد کند همچنین در اطراف محل برخورد و مسیر حرکت بمب در محیط به دلیل نیاز به دقت بالا مش بندی متراکم تر در نظر گرفته می شود. به دلیل قطر کم بمب و همچنین مقاومت خوب مصالح محیط هندسه محیط به صورت مکعبی با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ متر در نظر گرفته می شود. مدل رفتاری استفاده شده برای سنگ مدل موهر- کلمب می باشد. در مدل سازی نفوذ، بمب منفجر نمی شود و نفوذ کامل تا سرعت صفر انجام می گیرد بنابراین در این تحقیق فقط مقدار نفوذ فیزیکی بمب تعیین گردیده و مبحث انفجار بمب و خسارت ناشی از حباب موج آن جدا از نفوذ بمب است. شمای کلی مدل های ایجاد شده به صورت

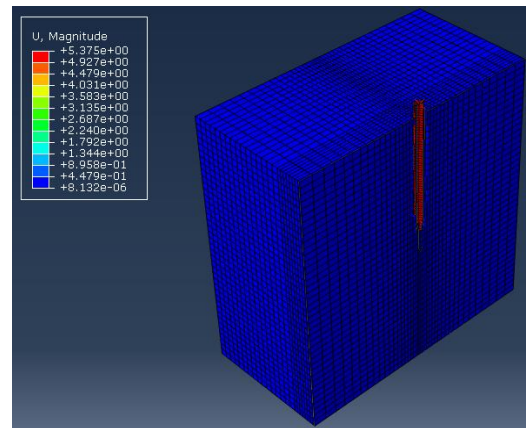
مقادیر نفوذ به دست آمده از مدل سازی برای هر یک از سنگ ها در شکل (۵) نشان داده شده است. همان طور که از شکل پیداست مقدار نفوذ در گرانیت کم تر از هر دوی ماسه سنگ و آهک می باشد. و مقدار نفوذ بمب در ماسه سنگ نیز کم تر از سنگ آهک می باشد. همچنین نتایج نشان می دهد که تمرکز تنش میسر^{۲۹} در گرانیت بیشتر بوده و تغییر شکل ها در سنگ آهک بزرگ تر می باشد. به- عنوان مثال کانتور توزیع تنش برای هر سه نوع سنگ در شکل (۶) نشان داده شده است.



(الف)

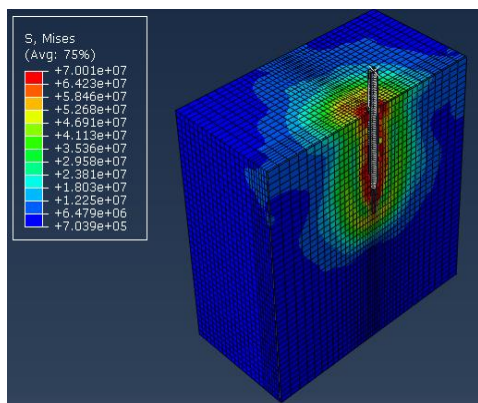


(ب)

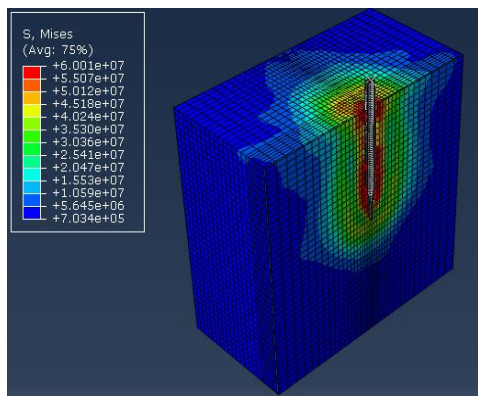


(ج)

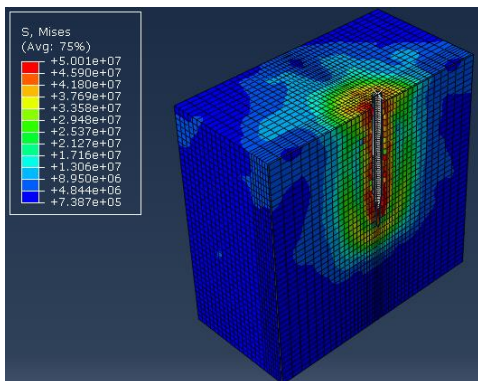
شکل ۵- عمق نفوذ بمب در سنگ های با $RMR > 90$ (برحسب متر): (الف) گرانیت، (ب) ماسه سنگ، (ج) آهک



(الف)



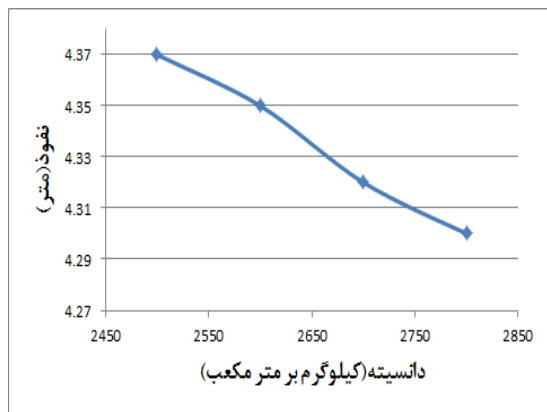
(ب)



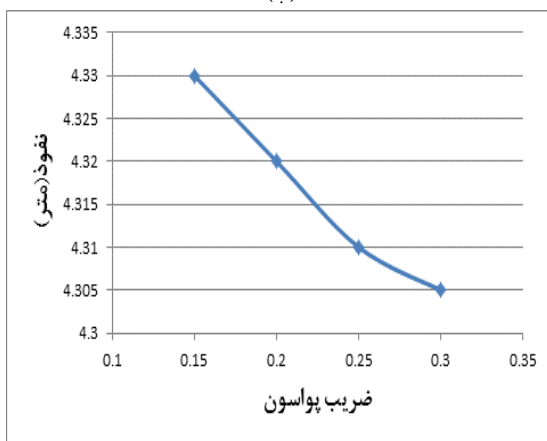
(ج)

شکل ۶- توزیع تنش در سنگ های با $RMR > 90$ (برحسب پاسکال): (الف) گرانیت، (ب) ماسه سنگ، (ج) آهک

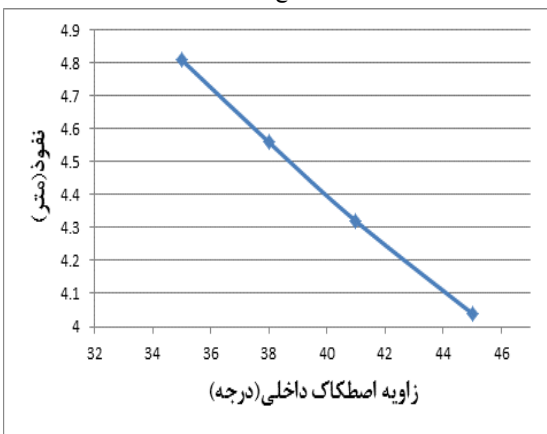
در این مدل سازی بمب به صورت صلب (تغییر شکل ناپذیر) و رفتار محیط به صورت الاستوپلاستیک (مدل رفتاری موهر- کلمب) در نظر گرفته می شود. در ابتدا برای مدل سازی نفوذ هر یک از سنگ ها با $RMR > 90$ ، مقدار مدول تغییر شکل و زاویه اصطکاک داخلی متوسط (مرتبط با $RMR = 95$) در نظر گرفته می شود.



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۷- منحنی عمق نفوذ بمب بر حسب: الف) مدول تغییر شکل، ب) دانسیته، ج) ضریب پواسون، د) زاویه اصطکاک داخلی سنگ

۴-۳-۲- سرعت برخورد بمب

آنالیز حساسیت سرعت بمب نشان می‌دهد که با افزایش سرعت برخورد پرتابه، عمق نفوذ آن نیز افزایش پیدا می‌کند که این پدیده در شکل (۸) نشان داده شده است. مشخص است که با افزایش سرعت پرتابه از ۳۰۰ متر بر ثانیه تا ۴۵۰ متر بر ثانیه متناسب با مقدار سرعت، عمق نفوذ بمب افزایش پیدا می‌کند.

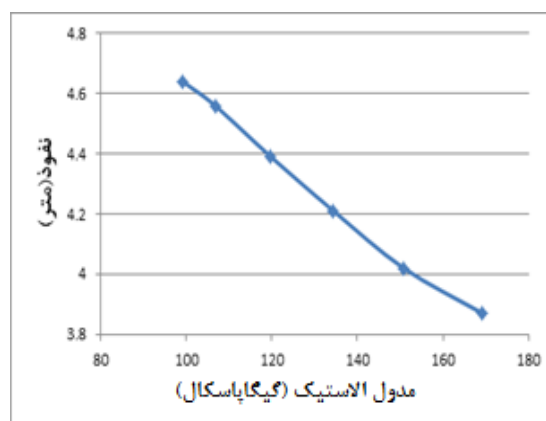
۴-۳- آنالیز حساسیت متغیرهای پارامترهای مقاومتی

محیط، سرعت برخورد بمب و درزه

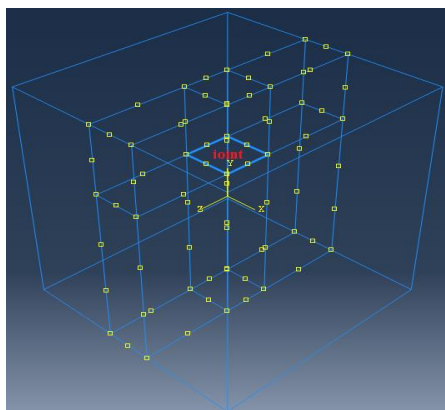
در طبقه‌بندی مهندسی سنگ بایستی در نظر داشت که هیچ پارامتری به‌تنهایی نمی‌تواند به‌طور کامل یک توده‌سنگ را برای اهداف مهندسی به‌طور کمی تشریح کند. پارامترهای مختلف درجات اهمیت متفاوتی دارند و در صورت برداشت با هم آن‌ها، می‌توان توده‌سنگ را به طرز رضایت‌بخشی تشریح کرد. بنابراین پارامترهای مقاومتی سنگ با $RMR > 90$ منحصر به فرد نمی‌باشد. به‌عنوان مثال ممکن است که سنگ‌های با مدول تغییر شکل متفاوت و یا دانسیته متفاوت مقدار RMR یکسانی داشته باشند بنابراین آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ ضروری می‌باشد. در این تحقیق در تمامی موارد از محدوده پارامترهای مقاومتی سنگ گرانیته با $RMR > 90$ جهت آنالیز حساسیت پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ استفاده شده است.

۴-۳-۱- پارامترهای مقاومتی محیط

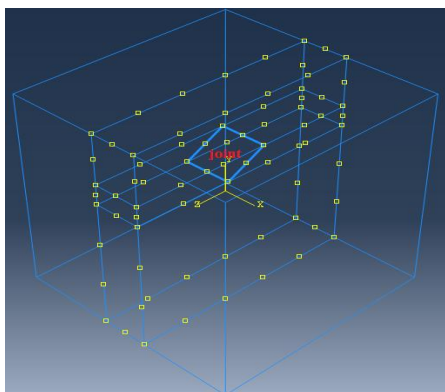
ارتباط بین عمق نفوذ بمب با پارامترهای سنگ (مدول تغییر شکل، دانسیته، نسبت پواسون و زاویه اصطکاک داخلی در نمودارهای ارائه شده در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است می‌توان گفت که با افزایش هر یک از پارامترهای مذکور (افزایش مقاومت)، عمق نفوذ کاهش پیدا می‌کند البته نرخ تغییرات عمق نفوذ نسبت به تغییرات چگالی و ضریب پواسون در مقایسه با نرخ تغییرات عمق نفوذ نسبت به مدول تغییر شکل و زاویه اصطکاک داخلی بسیار پایین می‌باشد و می‌توان از تأثیر آن‌ها بر عمق نفوذ صرف نظر کرد.



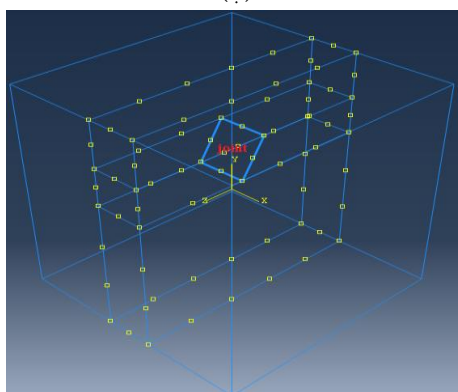
(الف)



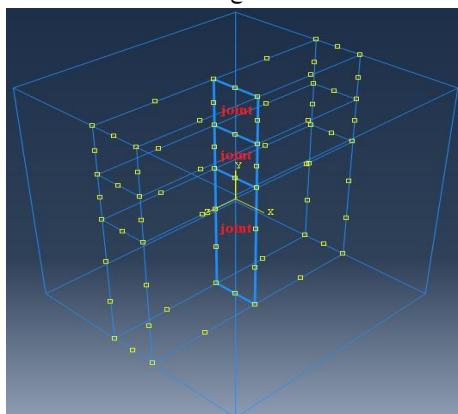
(الف)



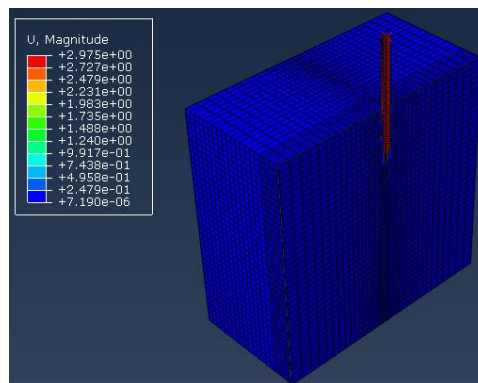
(ب)



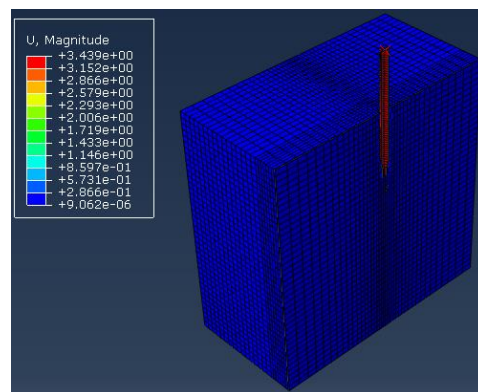
(ج)



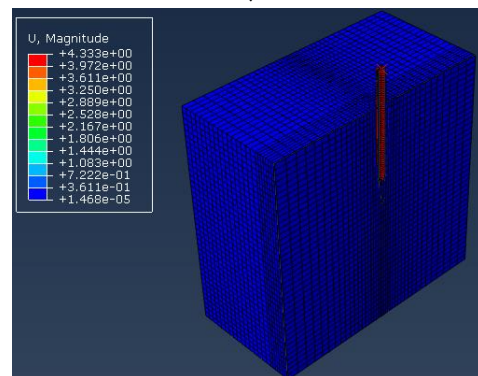
(د)



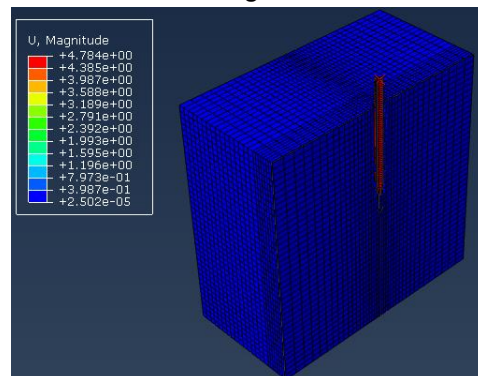
(الف)



(ب)



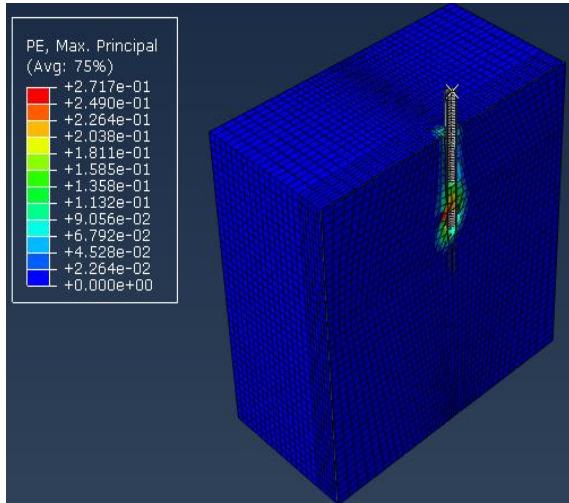
(ج)



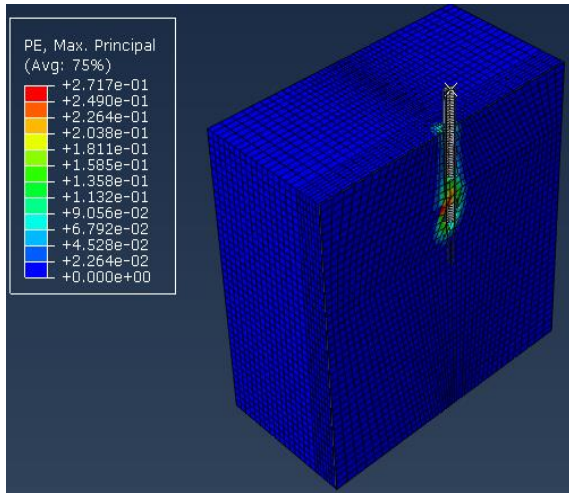
(د)

شکل ۸- عمق نفوذ بلمب GBU-28 متناسب با سرعت برخورد آن
(برحسب متر): (الف) ۳۰۰ متر بر ثانیه، (ب) ۳۵۰ متر بر ثانیه،
(ج) ۴۰۰ متر بر ثانیه، (د) ۴۵۰ متر بر ثانیه

شکل ۹- نمایی از اسمبلی مدل و درزه ایجاد شده: (الف) درزه افقی، (ب) درزه ۳۰ درجه، (ج) درزه ۶۰ درجه، (د) درزه قائم



(الف)



(ب)

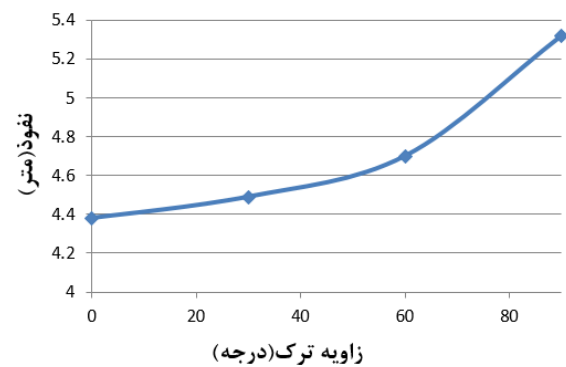
شکل ۱۱- توزیع کرنش پلاستیک در مدل درزه‌دار

بنابراین عملکرد و دقت مناسب‌تری نسبت به دیگر روابط دارد (علیزاده و همکاران، ۱۳۹۳). به همین جهت در این تحقیق به منظور راستی‌آزمایی عمق نفوذ به دست آمده از مدل‌سازی عددی از این رابطه استفاده می‌شود. یکی از متغیرهای این رابطه مقاومت فشاری سنگ می‌باشد که توسط نرم‌افزار RocData تعیین می‌گردد. که مقادیر آن برای سنگ‌های گرانیت، ماسه‌سنگ و سنگ-آهک با $RMR=100$ به ترتیب برابر با ۱۲۱، ۷۵/۷ و ۶۰/۵ مگاپاسکال می‌باشد که این مقادیر در فرمول مربوطه جایگذاری می‌گردند. مقایسه عمق نفوذ به دست آمده از مدل‌سازی با عمق نفوذ به دست آمده از رابطه گروه مهندسی ارتش نشان می‌دهد که مقادیر عمق نفوذ به دست آمده از مدل‌سازی همخوانی خوبی با مقادیر عمق نفوذ به دست آمده از رابطه تجربی مذکور دارد (جدول ۴). بنابراین می‌توان گفت که مقادیر عمق نفوذ به دست آمده از مدل‌سازی عددی قابل استناد بوده و به مقادیر واقعی نزدیک می‌باشد.

۴-۳-۳- اثر درزه

حضور درزه و ناپیوستگی‌ها به‌طور قابل‌توجهی بر رفتار مکانیکی توده‌سنگ اثر می‌گذارد. در این تحقیق به بررسی اثر زاویه درزه و تعداد درزه‌ها در مدل ساخته شده پرداخته می‌شود. در مدل‌سازی اثر درزه بر روی عمق نفوذ بمب، به دلیل کم بودن قطر بمب و عدم گسترش زیاد زون پلاستیک، نیازی به اعمال ترک در طول کل مدل نیست و مدل‌سازی ترک با طول کم کفایت می‌کند. به عبارت دیگر، زون و شعاع تأثیر ناشی از برخورد بمب و نفوذ آن پایین بوده و در نتیجه مدل‌سازی درزه به فاصله کمی از مسیر نفوذ بمب کافی می‌باشد. نمایی از اسمبلی مدل و درزه ایجاد شده در شکل (۹) نشان داده شده است.

در بررسی اثر زاویه درزه، سنگ میزبان گرانیت با $RMR=95$ در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که در بالا ذکر گردید در حالت بدون درزه عمق نفوذ بمب ۴/۳۳ متر می‌باشد. عمق نفوذ بمب برای حالت‌های مختلف زاویه درزه در شکل (۱۰) نشان داده شده است. با توجه به شکل نتیجه‌گیری می‌شود که در حالت وجود درزه در سنگ عمق نفوذ بمب بیشتر شده و همچنین با افزایش زاویه ترک (به سمت عمودی) عمق نفوذ نیز بیشتر می‌شود. همچنین ماکزیمم تمرکز تنش و همچنین ماکزیمم ناحیه پلاستیک در اطراف درزه رخ خواهد داد. به عنوان مثال توزیع کرنش پلاستیک در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۰- عمق نفوذ بمب GBU-28 بر حسب زاویه درزه

۴-۴- راستی‌آزمایی نتایج

جهت راستی‌آزمایی مقادیر عمق نفوذ به دست آمده از مدل‌سازی عددی می‌توان از روابط تحلیلی و یا روابط تجربی (علی‌رغم فرضیات ساده‌سازی موجود) استفاده نمود. نتایج مطالعات انجام شده قبلی پیرامون روابط عمق نفوذ پرتابه (بررسی منحنی عمق نفوذ به قطر پرتابه) نشان می‌دهد که رابطه گروه مهندسی ارتش ACE نسبت به دیگر روابط دارای هماهنگی و تشابه بیشتری با منحنی حاصل شده از نتایج آزمایشگاهی می‌باشد.

خواهد شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زاویه ترک (به-سمت عمودی) عمق نفوذ بمب بیشتر می‌شود. بررسی منحنی عمق نفوذ برحسب زاویه درزه نشان می‌دهد که در ابتدا (زوایای کم درزه) شیب منحنی کم و سپس در زوایای زیاد درزه (بزرگ‌تر از ۶۰ درجه) شیب منحنی افزایش می‌یابد.

➤ در حالت وجود درزه در محیط، ماکزیمم تمرکز تنش و همچنین ماکزیمم ناحیه پلاستیک در اطراف درزه رخ خواهد داد.

۶- مراجع

- علیزاده ط، مرادلو ج، ناصراسدی ک، "شبیه‌سازی عددی نفوذ پرتابه در هدف بتنی و بررسی روابط"، نشریه مهندسی عمران مدرس، ۱۳۹۳، ۱۴ (۱)، ۱۶۹-۱۷۹.
- Bieniawski ZT, "Engineering Rock Mass Classification", John Wiley and Sons, 1989.
- Cai M, Kaiser PK, Uno H, Tasaka Y, Minami M, "Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41 (1), 3-19.
- Dassault Systèmes, "ABAQUS Unified Finite Element Analysis, User's Manual Version 6.10", Providence, Rhode Island, Simulia Corporation, USA, 2010.
- Hansson H, "Warhead penetration in concrete protective structures", KTH Architecture and the Built Environment, Licentiate Thesis, 2011.
- Heuze FE, "An overview of projectile penetration into geological materials, with emphasis on rocks", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1990, 27 (1), 1-14.
- Hoek E, Brown ET, "Practical estimates of rock mass strength", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34 (8), 1165-1186.
- Li QM, Reid SR, Wen HM, Telford AR, "Local impact effects of hard missiles on concrete targets", International Journal of Impact Engineering, 2005, 32 (1-4), 224-284.
- Marinos P, Hoek E, "Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as Flysch", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2001, 60, 85-92.
- Palmstrom A, "Recent developments in rock support estimates by the RMI", Journal of Rock Mechanics and Tunneling Technology, 2000, 6 (1), 1-19.
- Peng S, Zhang J, "Engineering Geology for Underground Rocks", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- Rocscience Ltd, "RocData, software, version 3.0.1.3", Toronto, www.rocscience.com, 2005.
- Rocscience Ltd, "ROCLAB Software for Calculating Hoek-Brown Rock Mass Strength", Toronto, Ontario, www.rocscience.com, 2002.
- Wikipedia, Some background material in this article is gathered from Wikipedia under the Creative Commons license. <http://wikipedia.org>, 2014.
- Zhou Y, "Simulation of High-velocity Penetration for Rigid Projectile into Plain Concrete Target using Discrete Element Method", Virginia Polytechnic Institute and State University, Master Thesis, 2009.

جدول ۴- عمق نفوذ بمب GBU-28 برای سنگ با RMR=100

سنگ	عمق نفوذ (متر)	
	آباکوس	ACE
گرانیت	۳/۸۷	۳/۷۰
ماسه‌سنگ	۴/۵۷	۴/۵۴
آهک	۵/۰۶	۵/۰۲

۵- نتیجه‌گیری

در این طرح ارزیابی عمق نفوذ بمب GBU-28 در سنگ‌های با $RMR > 90$ توسط حل عددی شبیه‌سازی می‌گردد. در این تحقیق جهت تعیین مدول تغییر شکل و زاویه اصطکاک داخلی سنگ با $RMR > 90$ از نرم‌افزار RocData استفاده شده است به این صورت که مقادیر امتیاز توده‌سنگ‌های آهک، ماسه‌سنگ و گرانیت ($RMR_{min} = 90$ تا $RMR_{max} = 100$) با استفاده از روابط تجربی ارائه‌شده به مقادیر اندیس مقاومت زمین‌شناسی جهت استفاده در نرم‌افزار RocData تبدیل می‌گردد. بعد از تعیین پارامترهای مقاومتی هر سه نوع سنگ، مدل‌سازی جهت ارزیابی عمق نفوذ انجام می‌گیرد. نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی صورت زیر می‌باشند.

➤ مقادیر عمق نفوذ برای سه نوع سنگ گرانیت، ماسه‌سنگ و آهک با $RMR > 90$ به ترتیب ۴/۳۳، ۴/۸۰ و ۵/۳۷ متر می‌باشد بنابراین مقدار نفوذ در گرانیت کم‌تر از هر دوی ماسه‌سنگ و آهک بوده و مقدار نفوذ بمب در ماسه‌سنگ نیز کم‌تر از سنگ-آهک می‌باشد. همچنین تمرکز تنش در گرانیت بیشتر بوده و ناحیه پلاستیک در سنگ‌آهک بزرگ‌تر می‌باشد.

➤ با افزایش هر یک از پارامترهای مقاومتی محیط سنگی نظیر مدول تغییر شکل سنگ، دانسته، نسبت پواسون و زاویه اصطکاک داخلی سنگ عمق نفوذ کاهش پیدا می‌کند البته نرخ تغییرات عمق نفوذ نسبت به تغییرات چگالی و ضریب پواسون در مقایسه با نرخ تغییرات عمق نفوذ نسبت به مدول تغییر شکل و زاویه اصطکاک داخلی بسیار پایین می‌باشد و می‌توان از تأثیر آن‌ها بر عمق نفوذ صرف‌نظر کرد.

➤ با افزایش سرعت برخورد پرتابه، عمق نفوذ آن افزایش پیدا می‌کند.

➤ حضور درزه و ناپیوستگی‌ها به‌طور قابل‌توجهی بر رفتار مکانیکی توده‌سنگ اثر می‌گذارد و عمق نفوذ بمب بیشتر خواهد شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زاویه ترک (به-سمت عمودی) عمق نفوذ بمب بیشتر می‌شود. بررسی منحنی عمق نفوذ برحسب زاویه درزه نشان می‌دهد که در ابتدا (زوایای کم درزه) شیب منحنی کم و سپس در زوایای زیاد درزه (بزرگ‌تر از ۶۰ درجه) شیب منحنی افزایش می‌یابد.

➤ حضور درزه و ناپیوستگی‌ها به‌طور قابل‌توجهی بر رفتار مکانیکی توده‌سنگ اثر می‌گذارد و عمق نفوذ بمب بیشتر

EXTENDED ABSTRACT

Assessment of Bomb Penetration into the Rocks with RMR > 90

Seyed Hossein Mirzeinaly^{a,*}, Ayub Elyasi^b

^a Department of Passive Defense, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

^b School of Mining Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 29 December 2015; **Accepted:** 29 April 2018

Keywords:

Penetration depth, GBU-28, RMR, Abaqus, RocData, Sensitivity analysis.

1. Introduction

To design a safe underground structure, it is necessary to construct this structure at the optimal depth to be completely safe due to having sufficient overburden. Therefore, knowing the penetration depth of the bunker buster bombs in which the explosion will eventually occur is essential in the design of defensive structures. The depth of penetration, in addition to the characteristics of the projectile and the speed of its impact, depends on the geomechanical characteristics of the rock mass. In this research, the penetration depth of the GBU-28 bomb is modeled by Abaqus software in rocks with RMR > 90 (three types of granite, sandstone and lime). This laser-guided bomb is a type of penetrating bomb that penetrates several meters into the ground, rock, or concrete before exploding and then exploding.

2. Methodology

First, the geomechanical parameters of three types of rocks (granite, sandstone and limestone) with RMR > 90 are determined by the RocData library and software studies. Then the depth of bomb penetration in all three types of rocks is obtained by modeling using the FEM-based software package, Abaqus. Since the rock elastic and strength parameters with specific RMR are not unique, the sensitivity analysis was performed on the rock mass elastic and strength parameters. In addition, since the presence of joints and discontinuities significantly affects the mechanical behavior of rock mass the effect of joint/discontinuity angle as well as the amount of joints in the model was investigated.

Determining boundary conditions is always one of the key challenges in dynamic and geomechanical modeling, which are often determined by geotechnical structure, tectonic and geological conditions in boundary areas. In this study, the boundary conditions of the model are defined as follows:

- The lower border of the model is closed in all directions.
- The upper limit of the model is free.
- There is no normal displacement in the lateral borders of the model.

3. Results and discussion

The depth of bomb penetration in all three types of rocks was obtained by modeling and then sensitivity analysis was performed on the bomb impact speed, geomechanical formation properties, and discontinuities angle. Empirical relationships (despite the existing simplification assumptions) were used to verify the penetration depth values obtained from numerical modeling.

* Corresponding Author

E-mail addresses: a.elyasi1986@yahoo.com (Ayub Elyasi), mirzeinaly@gmail.com (Seyed Hossein Mirzeinaly).

Results of previous studies on projectile penetration depth relationships show that the relationship of ACE Army Engineering Group has more coordination and similarity with the curves obtained from laboratory results and therefore exhibits better performance and accuracy than other relationships.

Comparison of the penetration depth obtained from modeling with the penetration depth obtained from the ACE relationship shows that the penetration depth values obtained from the modeling are in good agreement with the penetration depth values obtained from this experimental relationship.

4. Conclusions

Numerical modeling by finite element software shows that the penetration depth in rocks with RMR > 90 granite, sandstone and limestone are 4.33, 4.80 and 5.37 meters, respectively. In addition, the stress concentration is higher in granite, although the plastic area in limestone is larger.

Increasing any of the elastic/strength parameters (young modulus, poisson's ratio, friction angle and etc.) of the rock mass such results in the reduction of the bomb penetration depth. On the other hand, the presence of joints and discontinuities significantly affects the mechanical behavior of the rock mass so that the depth of penetration of the bomb will increase.

5. References

- Bieniawski ZT, "Engineering Rock Mass Classification", John Wiley and Sons, 1989.
- Cai M, Kaiser PK, Uno H, Tasaka Y, Minami M, "Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41 (1), 3-19.
- Heuze FE, "An overview of projectile penetration into geological materials, with emphasis on rocks", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 1990, 27 (1), 1-14.
- Li QM, Reid SR, Wen HM, Telford AR, "Local impact effects of hard missiles on concrete targets", *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 32 (1-4), 224-284.
- Palmstrom A, "Recent developments in rock support estimates by the RMI", *Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology*, 2000, 6 (1), 1-19.
- Zhou, Y, "Simulation of High-velocity Penetration for Rigid Projectile into Plain Concrete Target using Discrete Element Method", Virginia Polytechnic Institute and State University, Master Thesis, 2009.