

شبیه‌سازی نفوذ پرتابه صلب با سرعت بالا در توده سنگ با استفاده از روش المان مجزا با قابلیت جریان-ذرات

مرتضی رحیمی دیزجی^۱؛ آلان شوکتی^۲؛ احمد فهیمی فر^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- استادیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی معدن، دانشگاه کردستان

۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶

دریافت: ۱۳۹۹/۰۳

چکیده

در این مقاله نفوذ پرتابه صلب مخروطی با سرعت بالا در توده سنگ با استفاده از روش المان مجزای سه‌بعدی با قابلیت جریان ذرات شبیه‌سازی شد. به منظور شبیه‌سازی توده سنگ و پرتابه، المان‌های کروی مجزا بکارگیری شده و به منظور اتصال ذرات کروی از مدل رفتاری پیوند موازی با قابلیت انتقال نیرو و ممان استفاده شد. مقادیر ریزپارامترهای مدل پیوند موازی با انجام شبیه‌سازی‌های عددی آزمایش فشاری تک‌محوری توده سنگ کالیبره شد. در شبیه‌سازی برخورد پرتابه برای توده سنگ ساختگاه مغار نیروگاه بختیاری به خوبی خرد شدن توده سنگ و پرتاب قطعات آن با سرعت بالا مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد که تنش‌های فشاری و برشی بزرگی در اثر برخورد به توده سنگ القا می‌شود. تاثیر پارامترهایی همچون سرعت اولیه پرتابه، شکل دماغه، وزن و نسبت لاغری (قطر/طول) آن بر نفوذ پرتابه نیز بررسی شد. جهت اعتبارسنجی روش مورد استفاده نتایج با روابط تحلیلی مقایسه شد که تطابق بسیار خوبی بین نتایج ملاحظه گردید.

واژگان کلیدی

پرتابه صلب، نفوذ، توده سنگ، شبیه‌سازی عددی، المان مجزا

۱- مقدمه

فرآیند برخورد و نفوذ انواع پرتابه‌ها در هدف‌های مختلف (زمین و یا سازه‌های نظامی و غیرنظامی) از زمان جنگ جهانی اول مورد توجه بسیاری از پژوهشگران و مهندسين بوده است. از نظر نظامی عملکرد، قدرت تخریب و نفوذ پرتابه در هنگام برخورد به هدف بایستی دقیقاً مشخص گردد. از طرف دیگر، عمق نفوذ پرتابه و تأثیرگذاری آن بر سازه هدف (و یا مدفون در آن)، به منظور طراحی بهتر سازه‌های نظامی و غیرنظامی و کاهش تخریب و خسارات وارده بر آن‌ها حائز اهمیت می‌باشد. جهت نیل به اهداف فوق الذکر، لازم است مکانیزم حاکم بر فرآیند برخورد و نفوذ پرتابه به هدف کاملاً درک شود.

در حال حاضر، از سه روش مختلف به منظور ارزیابی برخورد پرتابه‌ها و تخمین عمق نفوذ آن‌ها در اهداف مختلف استفاده می‌شود: ۱- روش‌های تجربی که بر اساس برازش اطلاعات به دست آمده از

آزمایش‌های مکرر برخورد پرتابه‌ها به اهداف مختلف پایه‌گذاری شده‌اند [۱]. این روش‌ها عموماً اطلاعات کمی از مکانیزم برخورد، پاسخ هدف و اندرکنش بین پرتابه و هدف به دست می‌دهند و در اغلب موارد خروجی این روش‌ها صرفاً عمق نهایی نفوذ پرتابه در هدف می‌باشد. مطالعات بسیار و همچنین روابط تجربی و نیمه‌تجربی متعددی در زمینه برخورد و نفوذ پرتابه‌ها در مصالح زمین (سنگ/خاک) تاکنون انجام شده است (برای نمونه [۲]-[۹]) که مرور جامع و کامل آن‌ها را می‌توان در منابع [۱۰] و [۱۱] یافت. از آنجایی که روش‌های تجربی زمان‌بر و پرهزینه بوده و بعلاوه روابط به دست آمده از آن‌ها نیز فقط در محدوده شرایط آزمایش‌های انجام شده (همچون جنس، وزن و سرعت پرتابه، جنس هدف و غیره) معتبر می‌باشد، استفاده از این روش امروزه بسیار محدود است. ۲- توسعه مدل‌های تحلیلی ساده دینامیک برخورد و نفوذ؛ مدل‌های تحلیلی موجود به طور عمده بر اساس روش‌های انبساط حفره (کروی و

سنگ می‌باشد که تاکنون مورد توجه بسیار کمی قرار گرفته است. با بکارگیری این روش می‌توان مراحل مختلف نفوذ پرتابه در توده سنگ از لحظه برخورد، نحوه شکست و پرتاب قطعات سنگ و گسترش ناحیه آسیب‌دیده را به طور دقیق تعیین نمود. همچنین، عمق نهایی نفوذ، تانسور تنش‌های القایی و تاریخچه زمانی سرعت ذرات که به توده سنگ (در اثر ضربه برخورد) در جهات مختلف وارد می‌شود قابل تعیین می‌باشد.

با توجه به موارد فوق‌الذکر، در این مطالعه از روش المان مجزای سه‌بعدی با قابلیت جریان-ذرات (کد PFC^{3D}) به منظور شبیه‌سازی برخورد و نفوذ پرتابه صلب با سرعت بالا در توده سنگ استفاده خواهد شد. شبیه‌سازی‌های عددی برای برخورد و نفوذ پرتابه با دماغه مخروطی با سرعت بالا در توده سنگ ساختگاه مغار نیروگاه پروژه سد و نیروگاه بختیاری (به عنوان مطالعه موردی) انجام شده و جهت اعتبارسنجی نیز نتایج حاصله با روش‌های تحلیلی مقایسه خواهد شد. نظر به اینکه مدل‌سازی توده سنگ با استفاده از ذرات کروی مجزا با استفاده از ریزپارامترهای خاصی انجام خواهد شد، کالیبراسیون مقادیر این ریزپارامترهای مورد استفاده در مدل عددی با پارامترهای اندازه‌گیری شده توده سنگ همچون مدول تغییرشکل‌پذیری و یا مقاومت فشاری ضروری می‌باشد. این کالیبراسیون که با استفاده از شبیه‌سازی عددی آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ در کد PFC^{3D} انجام خواهد شد گامی اضافه در مراحل مدل‌سازی بوده که در سایر روش‌های عددی (همچون المان محدود) وجود ندارد.

۲- مدل المان مجزا (DEM)

۲-۱- مبانی نظری

مدل جریان-ذرات قابلیت مدل‌سازی رفتار مکانیکی یک مجموعه از ذرات با شکل دلخواه را دارا می‌باشد (ذره در اینجا بیانگر جسمی است که حجم مشخصی از فضا را اشغال نموده است) که به طور مستقل از یکدیگر جابجا شده و فقط در نقاط تماس (contact) یا در سطح واسط (interface) بین ذرات اندرکنش دارند [۴۶]. در کد PFC^{3D} المان‌های مجزا کروی شکل بوده و به وسیله قانون نیرو-جابجایی (رابطه ۱)) با یکدیگر اندرکنش دارند. قوانین حرکت که به هر یک از المان‌ها اعمال می‌شود توسط روابط (۲-۳) تعریف شده است.

$$F_i = K_i U_i \quad (1)$$

$$F_i = m(\ddot{x}_i - g_i) \quad (2)$$

$$M_i = I \dot{\omega}_i \quad (3)$$

استوانه‌ای) بنا نهاده شده‌اند. در این روش‌ها فرض می‌شود که تنش‌های نرمال وارد بر دماغه پرتابه برابر تنش‌های انبساطی در حفرات کروی و یا استوانه‌ای می‌باشد. روابط پیشنهادی با توجه به اصول بقای مومنتوم، جرم و انرژی و با در نظر گرفتن مدل رفتاری مصالح و شرایط مرزی موجود توسعه داده شده‌اند [۱۲]. از مطالعات تحلیلی انجام شده در زمینه نفوذ پرتابه‌ها در سنگ می‌توان به [۱۳]- [۱۷]، در خاک به [۱۲] و [۱۸] و در بتن به [۱۹]-[۲۸] اشاره نمود. در روابط به دست آمده از روش‌های تحلیلی جدای از دقت بسیار بالای آن‌ها، فرضیات ساده‌کننده متعددی در هندسه پرتابه و هدف، مدل رفتاری آن‌ها و غیره بکار رفته است. با توجه به این موارد، کاربرد این نوع روش‌ها نیز منحصر به شرایطی است که روابط در آن‌ها توسعه یافته است. ناگفته نماند که روش‌های تحلیلی ابزار بسیار قدرتمندی جهت شناخت و ارزیابی پارامترهای موثر بر پدیده نفوذ پرتابه به دست می‌دهند. ۳- استفاده از راه‌حل‌های عددی پیشرفته برای شبیه‌سازی فرآیند برخورد و نفوذ پرتابه‌ها. با افزایش رشد فن‌آوری کامپیوترها، در دهه‌های اخیر محققین مختلف از روش‌های عددی همچون المان محدود ((Finite Element Method (FEM) و المان مجزا ((Distinct Element Method (DEM) [۲۹]-[۳۵] به منظور شبیه‌سازی پدیده برخورد و نفوذ پرتابه‌ها در اهداف مختلف استفاده کرده‌اند. مزیت عمده روش‌های عددی در مقایسه با روش‌های پیشین عدم وجود انواع محدودیت‌ها در هندسه، جنس و مدل رفتاری پرتابه و هدف و همچنین شرایط مرزی اعمالی می‌باشد.

جنس هدف در مطالعات انجام شده در زمینه برخورد و نفوذ پرتابه‌ها عمدتاً فلزی، بتنی و مصالح زمین (سنگ و یا خاک) می‌باشد. همان گونه که گذشت، عمده تمرکز در برخورد پرتابه‌ها به مصالح زمین که در این تحقیق مطلوب می‌باشد، بر روی مطالعات تجربی و تا حدی تحلیلی بوده است. در زمینه شبیه‌سازی‌های عددی نیز اغلب پژوهش‌ها بر روی مدل‌سازی عددی اثرات برخورد پرتابه به هدف همانند گسترش موج دینامیکی ناشی از برخورد و انفجار پرتابه در هدف متمرکز شده [۴۱]-[۴۶] و روند برخورد فیزیکی پرتابه و شکست سنگ کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در خصوص نفوذ پرتابه در اهداف بتنی مطالعات محدودی در رابطه با شبیه‌سازی روند برخورد پرتابه انجام شده است (به طور مثال به [۱] مراجعه شود).

با توجه به ماهیت روش المان مجزا و اینکه امکان ترک خوردگی و جدایش المان‌ها تحت بارگذاری‌های مختلف وجود دارد، این روش در مقایسه با سایر روش‌های عددی برای شبیه‌سازی محیط‌های ناپوسته و بخصوص مصالح دانه‌ای تحت بارهای دینامیکی مناسب‌تر می‌باشد [۱] و [۳۶]. شبیه‌سازی برخورد پرتابه با استفاده از روش المان مجزا با قابلیت جریان-ذرات (particle flow) رهیافتی بسیار مناسب جهت بررسی دقیق‌تر روند برخورد و نحوه نفوذ پرتابه در توده

نیروی انتقالی در پیوند موازی با استفاده از روابط (۴) و (۵) و با جایگزینی pb_kn و pb_ks بجای عبارات سختی‌های $\bar{k}^n$ و $\bar{k}^s$ به دست می‌آید. ممان انتقالی بین دو المان پیوندخورده بصورت زیر به دست می‌آید:

$$\bar{M}_i^n = \bar{k}^s J \Delta \theta^n \quad (۴)$$

$$\bar{M}_i^s = \bar{k}^n I \Delta \theta^n \quad (۵)$$

که در آن؛ $\bar{M}_i^n$ و $\bar{M}_i^s$ ممان‌های کلی نرمال و مماسی، $\bar{k}^n$ و $\bar{k}^s$ سختی‌های نرمال و مماسی پیوند موازی، J ممان قطبی سطح دیسک دایره‌ای، I ممان اینرسی دیسک دایره‌ای، $\Delta \theta^n$ و $\Delta \theta^s$ نیز چرخش زاویه‌ای نسبی نرمال و مماسی بین دو المان در تماس است. علیرغم وجود پیوند موازی بین دو المان، امکان وقوع لغزش بین دو المان پیوندخورده وجود دارد.

اتلاف انرژی در مدل عددی ساخته‌شده در این پژوهش نیز در نظر گرفته شده است. انرژی موجود بین دو المان در اندرکنش به وسیله لغزش اصطکاکی با ضریب اصطکاک تعریف شده کلمب، μ ، تلف خواهد شد. علاوه بر این، در PFC^{3D} میرایی محلی غیر ویسکوز که در آن نیروی میرایی در معادله حرکت وارد شده است در دسترس می‌باشد:

$$F_{(i)} + F_{(i)}^d = M_{(i)} A_{(i)} \quad (۶)$$

که در این رابطه؛ $F_{(i)}$ ، $M_{(i)}$ و $A_{(i)}$ به ترتیب نیروی کل، جرم و مولفه‌های شتاب بوده و $F_{(i)}^d$ نیز نیروی میرایی است:

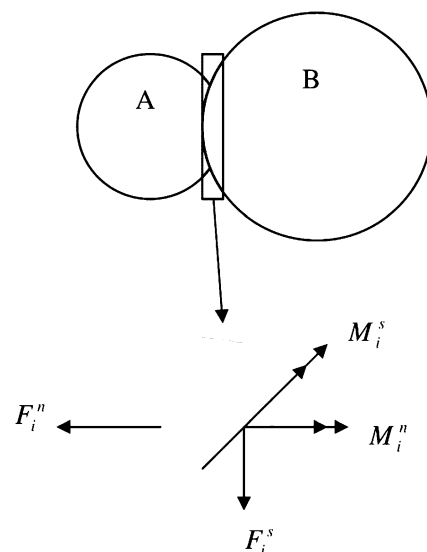
$$F_{(i)}^d = -\alpha |F_{(i)}| \text{sign}(V_{(i)});$$

$$\text{sign}(y) = \begin{cases} +1, & \text{if } y > 0; \\ -1, & \text{if } y < 0; \\ 0, & \text{if } y = 0; \end{cases} \quad (۷)$$

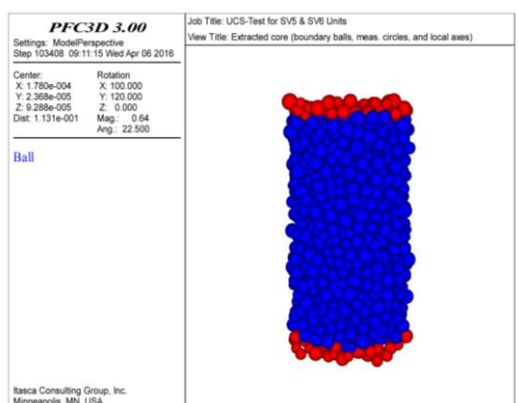
در این رابطه α میرایی عددی است (جزئیات بیشتر در این رابطه در راهنمای PFC^{3D} داده شده است). پس از انجام چندین شبیه‌سازی عددی اولیه برای مدل توده سنگ ساختگاه نیروگاه بختیاری، مقدار میرایی عددی که در شبیه‌سازی‌های برخورد پرتابه مورد استفاده قرار خواهد گرفت برابر ۰/۰۵ تعیین شد.

که در این روابط؛ F_i مولفه i ام نیروی تماسی، K_i سختی المان که شامل سختی نرمال (عمودی) K_n و سختی برشی K_s می‌باشد، U_i همپوشانی بین دو المان در تماس، m جرم هر المان، $\ddot{X}$ شتاب حرکتی، $\dot{\omega}$ شتاب چرخشی، g شتاب گرانش، M_i ممان برآیند وارد بر هر المان و I نیز ممان اینرسی است. در یک چرخه محاسباتی ابتدا قانون نیرو-جابجایی (رابطه (۱)) محاسبه شده سپس موقعیت جدید المان با بکارگیری قانون حرکت (روابط (۲) و (۳)) به‌روز می‌شود. توضیحات بیشتر در خصوص فرمولاسیون PFC^{3D} را در مرجع [۴۶] می‌توان یافت.

اندرکنش بین دو المان در PFC^{3D} به دو طریق بیان می‌شود: پیوند تماسی (contact bond) و پیوند موازی (parallel bond). مدل پیوند موازی قابلیت انتقال نیروی تماسی و ممان بین دو المان در تماس را دارا می‌باشد. به همین دلیل، از آنجایی که هدف این مطالعه شبیه‌سازی توده سنگ (که مصالحی اصطکاکی است) می‌باشد، مدل پیوند موازی جهت مدل‌سازی عددی انتخاب شد. پیوند موازی را می‌توان به عنوان سیمانی که در یک سطح مقطع دایره‌ای محدود بین دو المان قرار گرفته است تصور نمود که دارای سختی و تنش تسلیم مشخص و تعریف شده است. به همین دلیل، پارامترهای ذاتی جدیدی همانند pb_kn، pb_ks، pb_nstrength، pb_sstrength که به ترتیب سختی‌های نرمال و برشی، و تنش‌های جاری شدن نرمال و برشی پیوند موازی می‌باشند نیاز به تعریف دارند. تنش وارد بر پیوند موازی با استفاده از تئوری تیرها (شکل ۱) قابل محاسبه است. در صورتی که مقادیر یکی از تنش‌های حداکثر از مقاومت پیوند معادل آن تجاوز نماید، پیوند موازی شکسته خواهد شد. در واقع، مدل رفتاری پیوند موازی، الاستیک-شکننده در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱: مولفه‌های نیرو و ممان در یک پیوند موازی [۴۷]



شکل ۲: هندسه مدل در نمونه استوانه‌ای جهت انجام آزمایش‌های کالیبراسیون (ذرات قرمز رنگ صفحات بارگذاری می‌باشند).

جدول ۱: مقادیر پارامترهای برجای توده سنگ ساخته‌گاه مغار نیروگاه سد بختیاری

مقدار	پارامتر
2650 kg/cm^3	ρ چگالی سنگ
0.3	ν ضریب پواسون
38 GPa	E_m مدول تغییرشکل پذیری
$13/4 \text{ MPa}$	σ_{cm} مقاومت فشاری

جدول ۲: مقادیر ریزپارامترهای پیوند موازی برای توده سنگ ساخته‌گاه مغار نیروگاه

مقدار	پارامتر
$145/5 \text{ GPa/m}$	$\bar{k}^n$ سختی نرمال
$97/0 \text{ GPa/m}$	$\bar{k}^s$ سختی برشی
10 MPa	$\bar{\sigma}_c$ مقاومت نرمال
10 MPa	$\bar{\tau}_c$ مقاومت برشی
0.637	μ ضریب برشی

۲-۳- مدل سازی المان مجزا

۲-۳-۱- توده سنگ هدف

مدل سه‌بعدی از توده سنگ هدف بصورت مکعب مستطیلی به ابعاد (ارتفاع×عرض×طول) $5 \times 5 \times 4$ متر است که حاوی تعداد ۵۴۸۱ ذره کروی می‌باشد (شکل ۳). این ابعاد با توجه به قطر پرتابه و محدوده تاثیر آن در توده سنگ با در نظر گرفتن هزینه محاسباتی آن پس از ساخت چندین مدل و آزمایش آن‌ها انتخاب شده است. در ساخت مدل توده سنگ هدف از چهار گام اساسی [۴۶]: ۱- تراکم اولیه ذرات کروی؛ ۲- ایجاد تنش اولیه در مدل منطبق بر تنش‌های ثقلی

۲-۲- کالیبراسیون ریزپارامترهای مدل پیوند موازی

همان طور که در بخش قبل اشاره شد، مدل‌سازی ناپیوسته مصالح در PFC^{3D} با استفاده از ذراتی کروی شکل انجام می‌شود که به یکدیگر متصل شده (پیوند موازی) و در اندرکنش هستند. در این بخش، هدف ساخت مدلی عددی از توده سنگ با مقادیر پارامترهای بزرگ مقیاس مشخص (مدول یانگ، ضریب پواسون، مقاومت فشاری) می‌باشد.

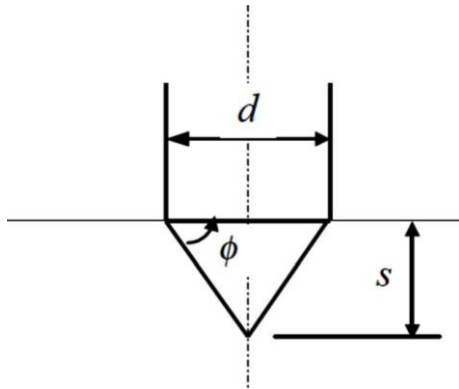
در کدهای محاسباتی مربوط به محیط‌های پیوسته پارامترهای ورودی مصالح (همانند مدول‌ها و مقاومت) به طور مستقیم با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی و یا صحرایی قابل اندازه‌گیری هستند. اما در کدهای ناپیوسته همانند PFC^{3D} که در آن‌ها رفتار مصالح در بزرگ مقیاس به وسیله اندرکنش ذرات در ابعاد میکرو کنترل می‌شود، مقادیر پارامترهای ورودی اجزای میکروسکوپی (ریزپارامترها (micro-parameters)) ناشناخته بوده و می‌بایست به درستی تعیین گردند. در واقع، مقادیر ریزپارامترهای کنترل‌کننده رفتار المان‌های کروی باید طوری تعیین گردند که رفتار مجموعه این ذرات معرف توده سنگ واقعی در بزرگ مقیاس باشد. به طور مثال، مقادیر سختی‌های نرمال و برشی را می‌توان جهت تعیین سختی بزرگ مقیاس یعنی مدول یانگ و ضریب پواسون توده سنگ کالیبره نمود.

برای کالیبراسیون ریزپارامترهای مورد نیاز در مدل پیوند موازی، آزمایش فشاری تک‌محوره بصورت عددی در PFC^{3D} بر روی نمونه استاندارد ساخته‌شده از ذرات کروی (شکل ۲) انجام شد. مراحل اصلی کالیبراسیون را می‌توان بصورت زیر خلاصه نمود:

- ساخت مجموعه‌ای از المان‌های کروی مجزا.
- انجام آزمایش فشاری تک‌محوره الاستیک به منظور تعیین مقادیر ریزپارامترهای سختی.
- شبیه‌سازی آزمایش مقاومت فشاری تا شکست نمونه جهت تعیین ریزپارامترهای مقاومتی.

در جدول ۱ مقادیر پارامترهای برجای توده سنگ ساخته‌گاه مغار نیروگاه بختیاری که از آن‌ها جهت کالیبراسیون ریزپارامترهای مورد استفاده در مدل عددی استفاده خواهد شد ارائه شده است. با استفاده از نتایج آزمایش‌های عددی متعدد، مقادیر ریزپارامترهای مدل پیوند موازی طوری تعیین گردید (جدول ۲) که خواص مکانیکی کلی مدل نزدیک‌ترین به مقادیر برجای توده سنگ (جدول ۱) باشد.

تعداد ذرات کروی مورد استفاده در این مدل ۱۱۹۷ عدد بوده که دارای شعاعی متغیر بین ۰/۰۲۱ و ۰/۰۳۵ متر می‌باشند. از آنجایی که پرتابه مورد نظر می‌بایست صلب باشد، لذا از دستور (منطق) خوشه (Clump) جهت مدل‌سازی پرتابه استفاده می‌شود. با استفاده از این منطق، کلیه ذرات کروی پرتابه به عنوان یک شیء منسجم فرض می‌شوند که اجازه تغییرشکل نسبی بین اجزای آن (ذرات) داده نخواهد شد.



شکل ۴: پارامترهای هندسی یک پرتابه با دماغه مخروطی

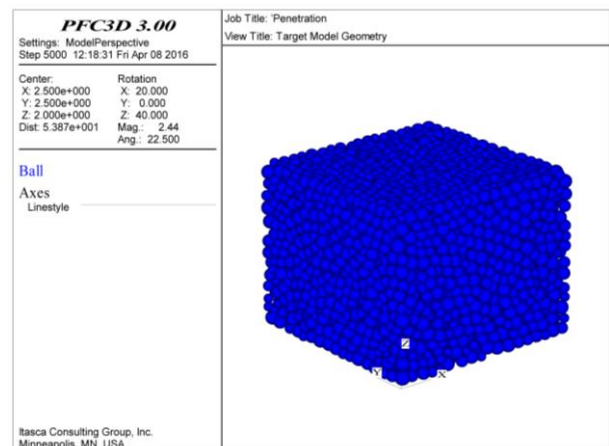
جدول ۳: مقادیر پارامترهای مربوط به پرتابه صلب

مقدار	پارامتر پرتابه صلب
۰/۳ m	d
۰/۲۵ m	s
۶۰ °	ϕ
۰/۳ m	l
۲۰۰ kg	W (وزن)
۴۰۰ m/s	V_0 (سرعت اولیه)

برجا در توده سنگ ساختگاه نیروگاه زیرزمینی؛ ۳- حذف ذرات کروی شناور باقی‌مانده در مدل؛ و ۴- ایجاد پیوند موازی بین ذرات کروی پیروی شده است.

ایجاد ذرات کروی و تراکم اولیه ذرات بایستی به گونه‌ای باشد که از همپوشانی بین ذرات و به تبع آن ایجاد نیروی عکس‌العمل ناخواسته بین آن‌ها (تنش قفل‌شدگی) جلوگیری به عمل آید. با توجه به نکته اخیر، ذرات کروی مدل نهایی پس از تراکم اولیه دارای شعاعی متغیر بین ۰/۱۷ و ۰/۳ متر بوده و تخلخل آن نیز برابر ۰/۳ می‌باشد.

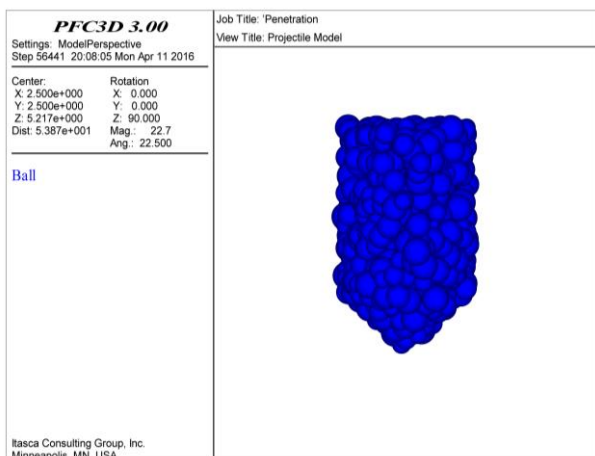
شرایط اولیه تنش در مدل، با ایجاد تنش‌های یکنواخت ثقلی منطبق بر تنش قائم وارده بر مرکز مدل در توده سنگ ایجاد شده است. شرایط مرزی مدل نیز متشکل از پنج المان دیوار (به جز در صفحه فوقانی xy که محل برخورد پرتابه به هدف است) با سختی برابر سختی ذرات کروی می‌باشد که تغییرشکل جانبی این ذرات را محدود می‌کند.



شکل ۳: هندسه مدل سه بعدی ساخته‌شده از توده سنگ هدف

۲-۳-۲- پرتابه صلب

پرتابه مورد نظر در این مقاله از نوع دماغه مخروطی است که بیشترین شباهت را با راکت‌ها و موشک‌های نظامی معمول دارد. در شکل ۴ پارامترهای هندسی یک پرتابه با دماغه مخروطی نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود دماغه چنین پرتابه‌ای دارای سه پارامتر قطر بدنه (d)، طول دماغه (s) و زاویه آن (ϕ) می‌باشد. علاوه بر این سه پارامتر، خود پرتابه (بدنه استوانه‌ای آن) دارای طول (l) می‌باشد که در شبیه‌سازی‌ها اعمال خواهد شد. در جدول ۳ مقادیر پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی پرتابه صلب آورده شده است. در شکل ۵ مدل عددی ساخته‌شده از پرتابه صلب با استفاده از پارامترهای مندرج در این جدول نشان داده شده است.



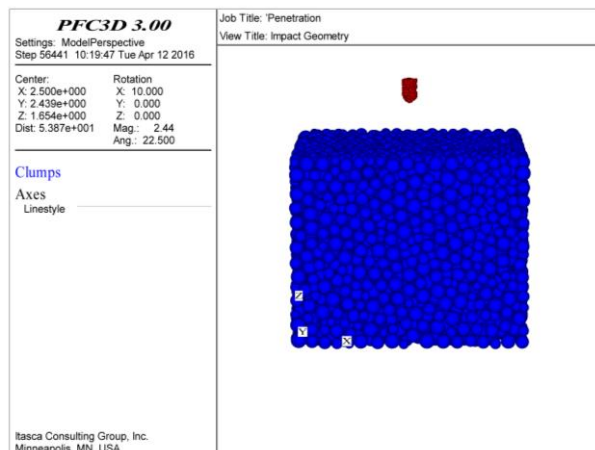
شکل ۵: نمای جانبی مدل عددی پرتابه صلب با دماغه مخروطی

۳- نتایج شبیه‌سازی عددی

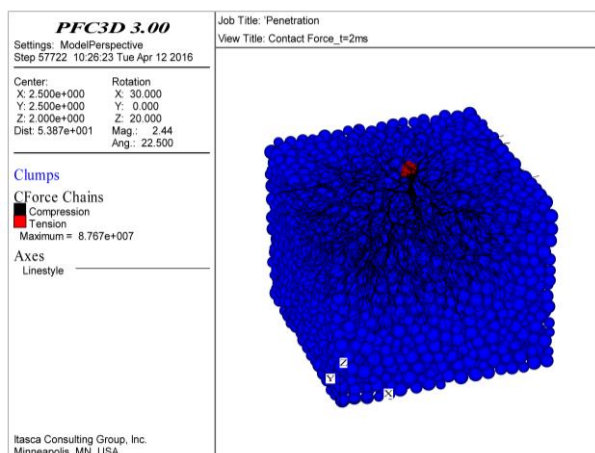
۳-۱- بررسی جزئی نتایج

پس از ساخت مدل عددی توده سنگ هدف، شرایط تعادل اولیه با اعمال شتاب گرانش به دست می‌آید. آنگاه، پرتابه صلب در بالای سطح توده سنگ قرار داده شده (شکل ۶) و سرعت اولیه موردنظر که منطبق با سرعت برخورد پرتابه به هدف (۴۰۰ m/s) می‌باشد به آن اعمال می‌شود. نهایتاً مدل عددی اجرا شده و برخورد پرتابه صلب به توده سنگ (زمان $t=0.0$ ms). هدف شبیه‌سازی می‌شود.

پس از گذشت ۲ میلی‌ثانیه ($t=2$ ms) از برخورد، نیروی تماسی بین ذرات در توده سنگ به حداکثر مقدار خود می‌رسد که در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تمرکز اصلی نیروها در اثر برخورد (خطوط ضخیم مشکی) در محدوده نوک دماغه پرتابه می‌باشد.



شکل ۶: مدل عددی پرتابه صلب و توده سنگ هدف قبل از برخورد



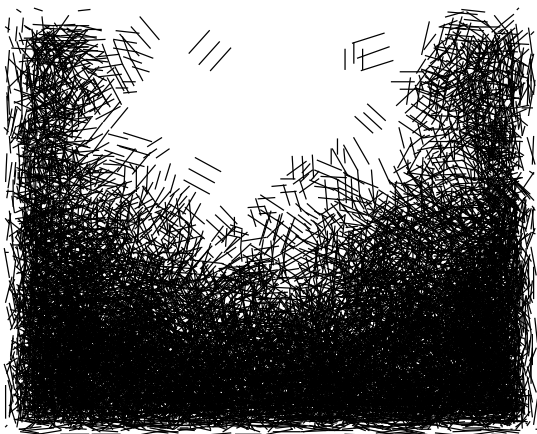
شکل ۷: مقادیر و نحوه توزیع نیروی تماسی بین ذرات کروی در اثر برخورد پرتابه ($t=2$ ms)

در اثر این افزایش در نیروهای تماسی بین ذرات، مقدار تنش‌های القایی به توده سنگ در اطراف دماغه پرتابه نیز به شدت افزایش خواهد یافت. در زیر تانسور تنش القایی به توده سنگ در محل نوک دماغه پرتابه آورده شده است (تنش‌های فشاری منفی):

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -16.73 & -7.92 & 15.65 \\ -8.79 & -26.40 & 18.30 \\ 10.38 & 15.38 & -35.71 \end{bmatrix} \text{ (MPa)}$$

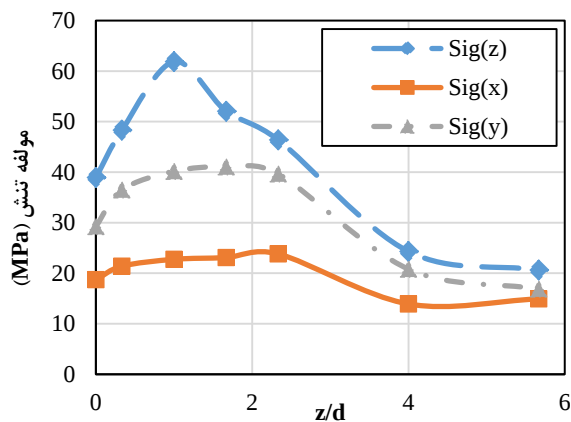
همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مقادیر تنش‌های قائم (نرمال) در جهت محورهای مختصات x ، y و z همگی فشاری (منفی) بوده و حداکثر مقدار این تنش‌ها به موازات راستای برخورد (محور z) با مقدار $\sigma_{zz} = -35.17 \text{ MPa}$ می‌باشد. حداکثر مقدار تنش‌های برشی القایی به توده سنگ نیز برابر $\sigma_{xz} = 18.30 \text{ MPa}$ است.

با ادامه نفوذ پرتابه به درون توده سنگ و گسترش تنش‌ها در آن، مقادیر تنش‌های القایی از مقاومت توده سنگ تجاوز کرده و دچار شکست خواهد شد. آسیب‌دیدگی و شکست توده سنگ نیز با شکسته شدن پیوندهای موازی بین ذرات کروی شبیه‌سازی خواهد شد (شکل ۸). همان‌طور که ملاحظه می‌شود ناحیه آسیب‌دیده، که در آن پیوندهای موازی شکسته شده است، بصورت استوانه‌ای با سر مخروطی‌شکل به قطر حدود ۳/۵ متر در سطح سنگ (بیش از ۱۰ برابر قطر پرتابه) و عمق تقریباً سه متری مدفون درون زمین تشکیل شده است.



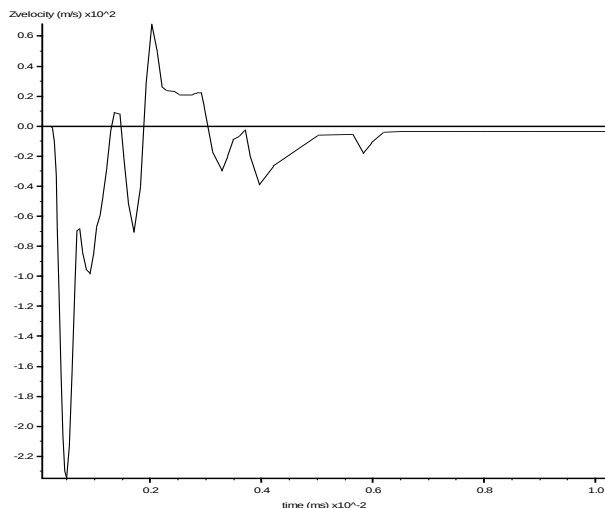
شکل ۸: موقعیت پیوندهای موازی سالم (خطوط مشکی) بین ذرات کروی در زمان $t=2$ ms

مشابه هم بوده (شکل ۱۱) و حداکثر مقدار تنش قائم در عمق d از نوک پرتابه ثبت شده است.



شکل ۱۱: تغییر مقادیر مولفه‌های تنش با دور شدن از پرتابه در عمق و در امتداد محور z .

علاوه بر شکست و تخریب توده سنگ، برخورد پرتابه موجب ایجاد و گسترش موجی دینامیکی از سرعت ذرات به درون توده سنگ می‌شود. در شکل ۱۲ تاریخچه زمانی مولفه قائم سرعت ذرات V_z (با حداکثر مقدار $234/4$ m/s) در محل نوک پرتابه که به توده سنگ منتقل می‌شود آورده شده است.

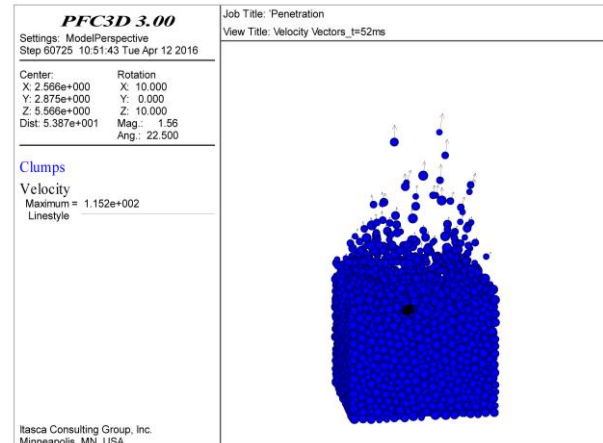


شکل ۱۲: نمودار تاریخچه زمانی مولفه قائم سرعت ذره (V_z) در محل نوک پرتابه

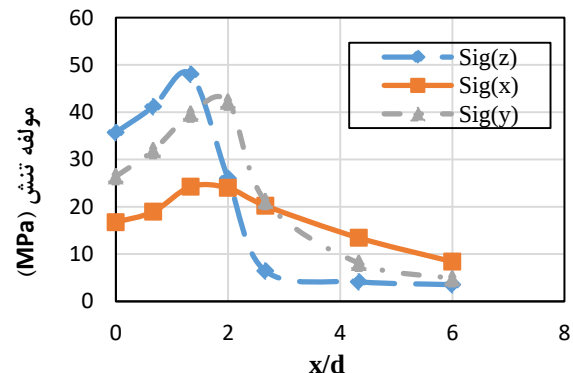
۳-۲- بررسی تاثیر سرعت اولیه پرتابه بر نفوذ

در این بخش اثر سرعت اولیه (یا سرعت برخورد) بر عمق نهایی نفوذ پرتابه در توده سنگ بررسی می‌شود. همان طور که در نمودار شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، به طور کلی با افزایش سرعت اولیه عمق

حداکثر عمق نفوذ پرتابه برابر $0/78$ متر ثبت شده که در زمان $t=52$ ms پس از برخورد اولیه رخ می‌دهد. در شکل ۹ بردارهای سرعت ذرات در مدل در زمان $t=52$ ms نشان داده شده است که در آن با از بین رفتن پیوند موازی بین ذرات کروی، قطعات توده سنگ در اثر انرژی جنبشی وارده از پرتابه و نیروی عکس‌العمل ناشی از سایر ذرات با سرعت $115/2$ m/s به سمت خارج پرتاب می‌شوند.

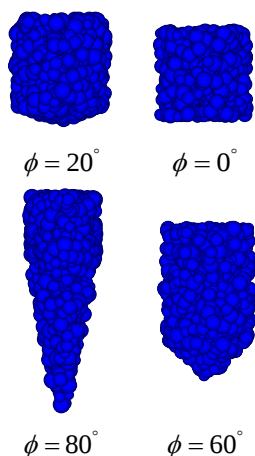


شکل ۹: شکست و پرتاب قطعاتی از توده سنگ در اثر برخورد پرتابه در زمان $t=52$ ms



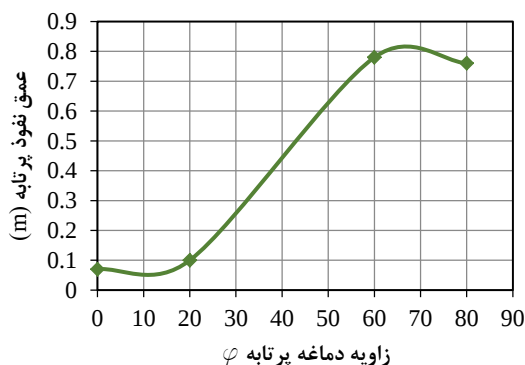
شکل ۱۰: تغییر مقادیر مولفه‌های تنش با دور شدن از پرتابه در جهت افق و در امتداد محور x .

نمودار تغییرات مقادیر مولفه‌های مختلف تنش در جهت افقی و عمقی (قائم) به ترتیب در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ رسم شده است. همان طور که از شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، حداکثر مقدار تنش قائم σ_{zz} در فاصله افقی برابر $1/33d$ (از قطر پرتابه) از نقطه برخورد پرتابه رخ می‌دهد و پس از آن مقادیر تنش‌ها با دور شدن از پرتابه به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. این درحالیست که برای مولفه‌های افقی تنش، حداکثر مقدار در فاصله حدود دو برابر قطر پرتابه یعنی $2d$ مشاهده می‌شود. روند تغییرات مولفه‌های مختلف تنش در عمق

شکل ۱۵: پرتابه با زاویه دماغه (ϕ) مختلف

۳-۴- بررسی تاثیر زاویه دماغه پرتابه (ϕ) بر نفوذ

تغییرات عمق نفوذ پرتابه صلب با زوایای مختلف دماغه (شکل ۱۵) در نمودار شکل ۱۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که عمق نفوذ در پرتابه‌های با دماغه تخت و یا نزدیک به تخت ($\phi \leq 20^\circ$) به شدت تحت تاثیر قرار گرفته و کم می‌باشد. با افزایش زاویه دماغه، عمق نفوذ نیز به تبع آن افزایش یافته و حداکثر عمق نفوذ در محدوده زاویه $60^\circ \leq \phi \leq 70^\circ$ مشاهده می‌شود. در زوایای دماغه بیشتر از 70° درجه نیز شاهد کاهشی نسبی در عمق نفوذ پرتابه می‌باشیم.

شکل ۱۶: تغییرات عمق نفوذ با تغییرات زاویه دماغه ϕ

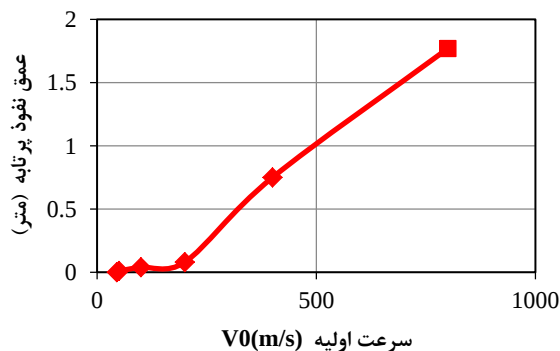
۳-۵- بررسی تاثیر نسبت لاغری پرتابه ($\frac{l}{d}$) بر نفوذ

در شکل ۱۷ نمودار تغییرات عمق نفوذ پرتابه صلب با نسبت لاغری پرتابه ($\frac{l}{d}$) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که عمق نفوذ نهایی پرتابه به شدت تحت تاثیر نسبت لاغری آن قرار دارد. در واقع با افزایش لاغری پرتابه، عمق نهایی نفوذ آن به شدت کاهش می‌یابد به طوریکه با افزایش نسبت لاغری از ۱ به ۲، عمق نفوذ پرتابه از 0.78 متر به 0.18 متر کاهش می‌یابد (حدود 78% کاهش).

نهایی نفوذ پرتابه افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه اینست که در سرعت‌های اولیه کم (کمتر از 200 m/s)، تاثیر افزایش سرعت اولیه بر عمق نفوذ بسیار کم و ناچیز می‌باشد اما در سرعت‌های بالاتر تاثیر آن بسیار زیاد و قابل توجه می‌باشد. به طور مثال، با افزایش سرعت اولیه پرتابه از 200 m/s به 400 m/s عمق نهایی نفوذ از 0.08 متر به 0.78 متر یعنی حدود ۱۰ برابر افزایش می‌یابد.

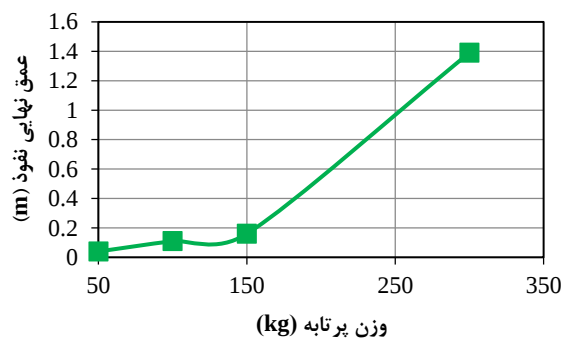
۳-۳- بررسی تاثیر وزن پرتابه بر نفوذ

در شکل ۱۴ نمودار تغییرات عمق نفوذ پرتابه صلب با افزایش وزن آن ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که افزایش وزن پرتابه در وزن‌های سبک (کمتر از 150 kg) تاثیر قابل توجهی بر عمق نهایی نفوذ پرتابه ندارد. از طرف دیگر در وزن‌های کم، عمق نفوذ کم بوده و بیشتر برجهش پرتابه در اثر برخورد آن به توده سنگ مشاهده می‌شود که ناشی از انرژی کم پرتابه است.



شکل ۱۳: تغییرات عمق نفوذ پرتابه با افزایش سرعت اولیه آن

با افزایش وزن پرتابه از 150 kg عمق نهایی نفوذ به شدت افزایش می‌یابد به طوریکه با افزایش وزن از 150 kg به 300 kg عمق نفوذ از 0.16 متر به 1.39 متر افزایش می‌یابد (بیش از ۸ برابر).



شکل ۱۴: تغییرات عمق نفوذ با افزایش وزن پرتابه

که در آن؛

$$N = \frac{\lambda}{BN_2}; \quad \lambda = \frac{M}{\rho d^3}; \quad I = \frac{MV_0^2}{d^3 YAN_1}$$

$$N_1 = 1 + 2\mu_m \psi; \quad N_2 = N^* + \frac{2\mu_m \psi}{1 + 4\psi^2}$$

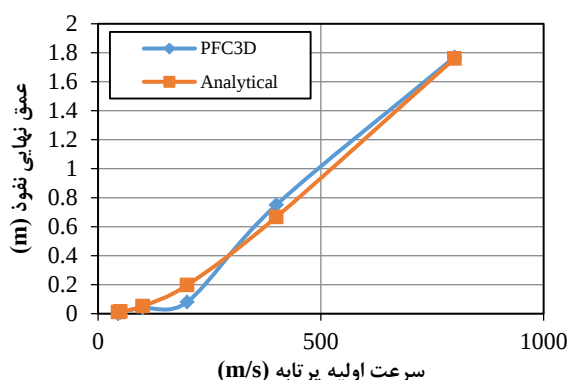
$$N^* = \frac{1}{1 + 4\psi^2}; \quad 0 < N^* \leq 1$$

d, M و V_0 به ترتیب جرم، قطر و سرعت اولیه پرتابه،

$\psi = \frac{S}{d}$ (شکل ۴)، ρ چگالی هدف، μ_m ضریب اصطکاک

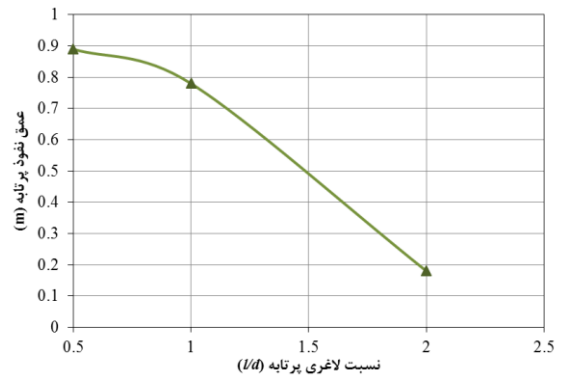
لغزشی برخورد، Y تنش تسلیم مصالح هدف می‌باشد که برای سنگ‌ها می‌توان معادل مقاومت فشاری تک‌محوره در نظر گرفت، A و B نیز ثوابت بدون بعد هدف می‌باشند که مقادیر آن‌ها را می‌توان [۴۷] $A = 82.6\sigma_c^{-0.5}$ (σ_c مقاومت فشاری سنگ است) و $B = 1$ در نظر گرفت.

در شکل ۱۸ مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی PFC3D و روش تحلیلی فوق برای عمق نهایی نفوذ نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی‌ها، نفوذ پرتابه‌ای با پارامترهای هندسی مندرج در جدول ۳ با سرعت‌های اولیه ۵۰ m/s، ۴۵ m/s، ۱۰۰ m/s، ۲۰۰ m/s، ۴۰۰ m/s و ۸۰۰ m/s مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی تطابق بسیار خوبی با نتایج تحلیلی به دست آمده دارد. این نتایج همچنین نشان‌دهنده صحت روند مدل‌سازی و فرضیات انجام شده در این تحقیق می‌باشد که نهایتاً منجر به دقت خوب و قابل قبول برای نتایج شبیه‌سازی‌ها می‌شود.



شکل ۱۸: مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی در این تحقیق با روش تحلیلی [۴۷] برای عمق نفوذ در سرعت‌های اولیه مختلف پرتابه

از طرف دیگر، نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که با افزایش لاغری پرتابه، پایداری خود پرتابه در حین برخورد نیز کم شده و احتمال تغییر مسیر آن نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۱۷: تغییرات عمق نفوذ با تغییرات نسبت لاغری پرتابه (l/d)

۴- مقایسه نتایج عددی با روش تحلیلی

هدف از این بخش مقایسه و همچنین اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی المان مجزا برای نفوذ پرتابه صلب در توده سنگ با سایر روش‌ها می‌باشد. با توجه به اینکه امکان مقایسه نتایج عددی با آزمایش‌های میدانی، به دلیل محدودیت‌های موجود، وجود ندارد به همین دلیل در این مقاله از روش‌های تحلیلی به منظور اعتبارسنجی نتایج به دست آمده استفاده خواهد شد.

از میان روش‌های تحلیلی موجود، از روابط ارائه شده توسط آقایان چن و لی [۴۷] که برای سنگ‌ها نیز قابل تعمیم می‌باشند استفاده خواهد شد. چن و لی [۴۷] بر اساس مدل انبساط کروی دینامیکی رابطه کلی بدون بعدی را جهت برآورد عمق نفوذ پرتابه صلب در مصالح مختلف ارائه دادند. این رابطه بستگی به دو عدد بدون بعد N_1 و N_2 داشته و برای پرتابه با دماغه مخروطی شکل بصورت زیر می‌باشد:

$$\frac{X}{d} = \frac{2}{\pi} N \ln \left(1 + \frac{I}{N} \right) \quad (۸)$$

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش نفوذ پرتابه صلب با سرعت بالا در توده سنگ با استفاده از روش عددی المان مجزا با قابلیت جریان-ذرات (نرم‌افزار PFC3D) بصورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شد. با توجه به ماهیت روش المان مجزا و اینکه امکان ترک خوردگی و جدایش المان‌ها تحت بارگذاری‌های مختلف وجود دارد، این روش در مقایسه با سایر روش‌های عددی برای شبیه‌سازی محیط‌های ناپیوسته تحت بارهای دینامیکی مناسب‌تر می‌باشد.

نظر به اینکه مدل‌سازی توده سنگ هدف با استفاده از ذرات کروی مجزا و با استفاده از ریزپارامترهای مدل پیوند موازی انجام خواهد شد، کالیبراسیون مقادیر این ریزپارامترها با استفاده از شبیه‌سازی عددی آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ در کد PFC^{3D} انجام شد که این خود گامی اضافه در مراحل مدل‌سازی بوده که در سایر روش‌های عددی همچون المان محدود وجود ندارد. شبیه‌سازی عددی برخورد و نفوذ پرتابه با دماغه مخروطی با سرعت بالا در توده سنگ ساختگاه مغار نیروگاه پروژه سد و نیروگاه بختیاری (به عنوان مطالعه موردی) انجام شد. با انجام این شبیه‌سازی‌ها، پارامترهای مختلف نفوذ مانند عمق نهایی نفوذ پرتابه در توده سنگ، تانسور تنش القایی در اطراف دماغه پرتابه، شکست توده سنگ و غیره بررسی شد.

نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که با افزایش سرعت اولیه پرتابه، عمق نهایی نفوذ افزایش می‌یابد. در سرعت‌های اولیه کم (کمتر از ۲۰۰ m/s)، تاثیر افزایش سرعت اولیه بر عمق نفوذ بسیار کم است اما در سرعت‌های بالاتر تاثیر آن قابل توجه می‌باشد. وزن پرتابه از جمله پارامترهای بسیار مهم و تاثیر گذار بر نفوذ آن در توده سنگ می‌باشد. با افزایش وزن پرتابه عمق نهایی نفوذ آن به شدت افزایش می‌یابد به طوریکه با افزایش وزن از ۱۵۰ kg به ۳۰۰ kg در مثال مورد مطالعه، عمق نفوذ بیش از ۸ برابر افزایش می‌یابد. یکی دیگر از پارامترهای هندسی مهم موثر در پدیده نفوذ زاویه دماغه پرتابه است. بررسی‌ها نشان داد که با افزایش زاویه دماغه، عمق نفوذ نیز افزایش یافته و حداکثر عمق نفوذ پرتابه نیز در محدوده زاویه دماغه $60^\circ \leq \phi \leq 70^\circ$ مشاهده می‌شود. از طرف دیگر، افزایش نسبت لاغری پرتابه (نسبت l/d) عمق نهایی نفوذ آن در توده سنگ را به شدت کاهش می‌دهد. با افزایش لاغری پرتابه، پایداری خود پرتابه در حین برخورد به توده سنگ کم شده و احتمال تغییر مسیر آن افزایش نیز می‌یابد. نهایتاً، به منظور اعتبار سنجی نتایج حاصل شبیه‌سازی‌ها، این نتایج با استفاده از روابط تحلیلی موجود مقایسه شد و مشخص گردید که تطابق بسیار خوبی با نتایج روش‌های تحلیلی دارد.

۶- منابع

- [1] Shiu, W., Donze, F.V. & Daudeville, L. (2008). Penetration prediction of missiles with different nose shapes by the discrete element numerical approach, *Journal of Computers & Structures*, 86, pp. 2079-2086
- [2] Young, C.W., (1972). *Empirical Equations for Predicting Penetration Performance in Layered Earth Materials for Complex Penetrator Configurations*, National Technical Reports Library, U.S. Department of Commerce, pp. 50
- [3] Young, C.W., (1976). Development of empirical equations for predicting depth of an earth penetrating projectile, U.S. Department of Energy, pp. 40
- [4] Bernard, R. S., (1977). *Empirical Analysis of Projectile Penetration in Rock*. United States: pp. 23
- [5] Forrestal, M.J., Altman, B.S., Cargile, J.D. & Hanchak, S.J., (1994). An empirical equation for penetration depth of Ogive-nose projectiles into concrete target, *Int. J. Impact Eng.*, 15(4), pp. 395-405.
- [6] Bernard, R.S., (1978). *Depth and Motion Prediction for Earth Penetrators*, United States, pp. 31
- [7] Chang, W.S. (1981). Impact of solid missiles on concrete barriers, *J Struct Div ASCE*, 107(ST2), pp. 257-71
- [8] Hughes, G. (1984). Hard missile impact on reinforced concrete, *Nucl Eng Des*, 77, pp. 23-35
- [9] Kojima, I. (1991). An experimental study on local behaviour of reinforced concrete slabs to missile impact", *Nucl Eng Des*, 130, pp. 121-32.
- [10] Rosenberg, Z. & Dekel, E., (2016). *Terminal Ballistics, Second Edition, Springer Science Business Media Singapore*
- [11] Ben-Dor, G., Dubinsky, A. & Elperin, T., (2013). High-speed penetration dynamics: engineering models and methods, *World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore*
- [12] Feldgun, V.R., Yankelevsky, D.Z. & Karinski, Y.S. (2017). A New Simplified Analytical Model for Soil Penetration Analysis of Rigid Projectiles Using the Riemann Problem Solution, *International Journal of Impact Engineering*, 101, pp. 49-65
- [13] Warren, T.L., Hanchak, S.J. & Poormon K.L. (2004). Penetration of limestone targets by ogive-nosed VAR 4340 steel projectiles at oblique angles: experiments and simulations, *Int J Impact Eng*, 30(10), pp. 1307-31.
- [14] Forrestal, M.J., Longscope, D.B. & Norwood, FR. (1981). A model to estimate forces on conical penetrators into dry porous rock, *J Appl Mech, ASME*, 48, pp. 25-9
- [15] Forrestal, M.J. & Longscope, D.B. (1982). Closed-form solutions for forces on conical-nosed penetrators into

- [30] Tham, C. Y. (2006). Numerical and empirical approach in predicting the penetration of a concrete target by an ogive-nosed projectile, *Finite Elements in Analysis and Design*, 42(14-15), pp. 1258-1268
- [31] Pi, A. and Huang, F. (2007). Based on Variation Method for the Shape Optimization of Penetrator Nose Shape, *Danjiang Zhidao Xuebao*, 27(4), pp. 126-130
- [32] Wang, Zh., Li, Y., Shen, R.F. & Wang, J.G. (2007). Numerical study on craters and penetration of concrete slab by ogive-nose steel projectile, *Computers and Geotechnics*, 34, pp. 1-9
- [33] Brun, M., Combescure, A., Baillis, C., Limam, A. & Buzaud, E. (2008). Simulations of the penetration of limestone targets using two-dimensional multimodal Fourier analysis, *International Journal of Impact Engineering*, 35, pp. 251-268
- [34] Liu, Y., Huang, F. & Ma, A. (2011). Numerical simulations of oblique penetration into reinforced concrete targets", *Computers and Mathematics with Applications*, 61, pp. 2168-2171
- [35] Fang, Q. & Zhang, J. (2014). 3D numerical modeling of projectile penetration into rock-rubble overlays accounting for random distribution of rock-rubble, *International Journal of Impact Engineering*, 63, pp. 118-128
- [36] Cundall, P.A. & Strack, O.D.L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies, *Géotechnique*, 29(1), pp. 47-65
- [37] Chen, S.G. & Zhao, J. (1998). A study of UDEC modelling for blast wave propagation in jointed rock masses, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 35(1), pp. 93-99
- [38] Riera, J.D. & Iturrioz, I. (1998). Discrete elements model for evaluating impact and impulsive response of reinforced concrete plates and shells subjected to impulsive loading, *Nucl Eng Des*, 179(2), pp. 135-44
- [39] Iwashita, K. & Oda, M. (2000). Micro-deformation mechanism of shear banding process based on modified distinct element method, *Powder Technology*, 109, pp. 192-205
- [40] Hentz, S., Daudeville, L. & Donzé, F.V. (2004). Identification and validation of a discrete element model for concrete, *J Eng Mech*, 130(6), pp. 709-19
- [41] Morris, J.P., Rubin, M.B., Blair, S.C., Glenn, L.A. & Heuze, F.E. (2004). Simulations of underground structures subjected to dynamic loading using the distinct element method, *Engineering Computations*, 21, pp. 384-408
- [42] Bulson, P.S., (1997). Explosive loading of engineering structures, *E & FN Spon press*
- [43] Gran, J.K., Senseny, P.E., Groethe, M.A., Chitty, D. & Trulio, J. (1998). Dynamic response of an opening in jointed rock, *Int. J. of Rock Mech. & Mining Sci.*, 35(8), pp. 1021-1035
- geological targets with constant shear strength, *Mechanics of Materials*, 1, pp. 285-295
- [16] Siddiqui, N.A., Choudhury, H. & Abbas, H. (2002). Reliability analysis of projectile penetration into geological targets. *Reliability Eng & System Safety*, 78, pp. 13-19.
- [17] Vorobiev, O.Yu., Liu, B.T., Lomov, I. & Antoun, T.H. (2007). Simulation of penetration into porous geologic media" *International Journal of Impact Engineering*, 34(4), pp. 721-731
- [18] Forrestal M.J. & Luk., VK. (1992). Penetration into soil targets, *International Journal of Impact Engineering*, 12(3), pp. 427-444
- [19] Forrestal, M.J., Frew, D.J., Hanchak, S.J. & Bar, NS. (1996). Penetration of grout and concrete target with ogive-nose steel projectiles, *Int J Impact Engng*, 18(5), pp. 465-76
- [20] Forrestal, M.J. & Tzou, D.Y. (1997). A spherical cavity-expansion penetration model for concrete targets, *International Journal of Solids Structures*, 34(31-32), pp. 4127-4146
- [21] Yankelevsky, D.Z. (1997). Local response of concrete slabs to low velocity projectile impact, *Int J Impact Engng*, 19(4), pp. 331-43
- [22] Frew, D.J., Hanchak, S.J., Green, M.L. & Forrestal, M.J. (1998). Penetration of concrete target with ogive-nose steel rods, *Int J Impact Engng*, 21(6), pp. 489-97
- [23] Forrestal, M.J., Frew, D.J., Hickerson, J.P. & Rohwer, TA. (2003). Penetration of concrete targets with deceleration-time measurements, *Int J Impact Eng*, 28(5), pp. 479-97
- [24] Frew, D.J., Forrestal, M.J. and Cargile, J.D. (2006). The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth, *Int J Impact Eng*, 32(10), pp. 1584-94
- [25] Wu, H., Fang, Q., Zhang, Y.D. and Gong, ZM. (2012). Semi-theoretical analyses of the concrete plate perforated by a rigid projectile, *Acta Mech Sin*, 28(6), pp. 1630-43
- [26] Chen, X.W., Li, X.L., Huang, F.L., Wu, H.J. & Chen, Y.Z. (2008). Normal perforation of reinforced concrete target by rigid projectile, *Int J Impact Eng*, 35(10), pp. 1119-2
- [27] Wu, H., Fang, Q., Peng, Y., Gong, Z.M. & Kong, X.Z. (2015). Hard projectile perforation on the monolithic and segmented RC panels with a rear steel liner, *Int J Impact Eng*, 76, pp. 232-50
- [28] Peng, Y., Wu, H., Fang, Q., Gong, Z.M. & Kong, X.Z. (2015). A note on the deep penetration and perforation of hard projectiles into thick targets, *International Journal of Impact Engineering*, 85, pp. 37-44
- [29] Huang, F., Wu, H., Jinb, Q. & Zhang, Q. (2005). A numerical simulation on the perforation of reinforced concrete targets, *Int J Impact Eng*, 32(1-4), pp. 173-187

- [46] Itasca Consulting Group, (2005). *PFC3D (Particle Flow Code in 3 Dimensions) User's Manual*, Minneapolis, Minnesota
- [47] Chen, X.W. & Li, Q.M. (2002). Deep penetration of a non-deformable projectile with different geometrical characteristics, *Int. J. Impact Eng.*, 27, pp. 619-637
- [44] Jiao, Y.Y., Zhang, X.L., Zhao, J., Q.S. & Liu, Q.S. (2007). Viscous boundary of DDA for modeling stress wave propagation in jointed rock, *Int. J. Rock Mech. & Mining Sci.*, 44, pp. 1070-1076.
- [45] Wang, Z., Li, Y. & Wang, J.G. (2008). Numerical analysis of blast-induced wave propagation and spalling damage in a rock plate, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 45, pp. 600-608