

تحلیل عددی سازوکار انتشار امواج حاصل از انفجار در محیط‌های سنگی دارای صفحات لایه‌بندی

حسن بخشنده‌امینه (دانشجوی دکتری)

علی مرتضوی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

عبدالرحیم جواهریان (دانشیار)

مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

در این تحقیق انتشار امواج حاصل از انفجار و اندرکنش آن با محیط سنگی رسوبی با یک صفحه‌ی لایه‌بندی توسط برنامه‌ی رایانه‌ی UDEC شبیه‌سازی شده است. برای این منظور، موج ضربه‌ی ناشی از انفجار به صورت یک پالس مثالی ساده شده، که مشخصه‌ی انفجاری با فشار بیشینه‌ی ۱۶۳۵ مگاپاسکال است، به دیواره‌ی یک چال انفجاری به قطر ۷۶ میلی‌متر وارد شده است. ضرایب انعکاس و انتقال دو محیط (ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک) واقع در طرفین صفحه‌ی لایه‌بندی برای دو حالت رفتار کشسانی و خمیری محیط برآورد شده و با نتایج حاصل از روش تحلیلی مقایسه شده است. نتایج حاصل از روش عددی انطباق خوبی با نتایج حاصل از روش تحلیلی دارد.

مقدمه

بر اثر انفجار مواد منفجره در داخل چال حفر شده در یک توده‌سنگ، انرژی قابل توجهی در مدت زمان بسیار کوتاه آزاد می‌شود و بخشی از آن به شکل امواج در درون توده‌سنگ دربرگیرنده منتشر می‌شود و ذرات محیط را به ارتعاش درمی‌آورد. انتشار امواج در درون زمین به ویژگی‌های کشسانی محیط دربرگیرنده، و منبع ایجاد تنش بستگی دارد. در توده‌سنگ‌های ناهمگن^[۱] امواج در تمام جهات منتشر می‌شوند و ذرات محیط را به ارتعاش درمی‌آورند.^[۱] امواج حین انتشار در توده‌سنگ، به دلیل انعکاس و انتقال‌های متعدد موج و جذب انرژی در فصل مشترک سطوح، تضعیف می‌شوند.^[۲] از نقطه‌نظر طراحی ژئومکانیکی، توده‌سنگ‌ها عمدتاً ناپیوسته و اغلب ناهمگن‌اند و دارای خواص ناهمسانگرد^۲ هستند. طبیعت و توزیع عوارض ساختمانی در داخل توده‌سنگ — مانند لایه‌بندی‌ها، گسل‌ها و دسته‌درزه‌ها — بر پاسخ توده‌سنگ به بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی تأثیر می‌گذارند و در خلال انتشار موج از میان توده‌سنگ موجب تغییر پارامترهای موج (مانند دامنه‌ی جابه‌جایی ذره، حداکثر سرعت ذره، حداکثر شتاب ذره و دوام موج که از مهم‌ترین معیارهای پیش‌بینی میزان خسارت ناشی از انفجار به محیط هستند) خواهد شد.

از آن نیز به محیط اولیه بازمی‌گردد. میزان انرژی منتقل شده به عوامل محیطی، از جمله خصوصیات مقاومتی سطح مشترک، زاویه‌ی برخورد و ویژگی‌های محیط واقع در دو طرف سطح مشترک، وابسته است.^[۳] در این تحقیق چگونگی انتشار و اثر امواج ضربه‌ی حاصل از انفجار یک چال به قطر ۷۶ میلی‌متر و فشار انفجار ۱۶۳۵ مگاپاسکال در محدوده‌ی به ابعاد $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ در یک محیط رسوبی با استفاده از نرم‌افزار المان مجزای UDEC^۳ که قابلیت تحلیل دینامیکی دارد، بررسی شده و ضرایب انعکاس و انتقال و مقدار شار انرژی^۴ ورودی، انعکاسی و انتقالی از فصل مشترک دو محیط برآورد شده است. در این مدل عملکرد امواج حاصل از انفجار یک خرج استوانه‌ی، شامل توزیع جابه‌جایی، تغییرات سرعت ذرات نسبت به زمان، و تغییرات تنش‌های اعمالی به محیط بر اثر عبور موج در محدوده‌ی انفجار یک توده‌سنگ رسوبی متشکل از یک لایه ماسه‌سنگ و یک لایه سنگ‌آهک بررسی شده است.

تحلیل عددی فرایند انفجار یک چال در یک توده

سنگ رسوبی

از آنجا که نرم‌افزار UDEC که برای تحلیل عددی فرایند انفجار یک چال در توده‌سنگ رسوبی، با دو لایه‌ی ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک، به‌کارگرفته شده قابلیت شبیه‌سازی تمام فرایند انفجار را ندارد، اطلاعات اولیه‌ی شرایط انفجار باید توسط دیگر روش‌ها پیش‌بینی شوند.^[۴] در

هنگامی که موج به فصل مشترک دو محیط برخورد می‌کند، به دلیل تغییر خواص فیزیکی و ژئومکانیکی و در نتیجه تغییر امپدانس (مقاومت لرزه‌ی برق) دو محیط، بخشی از انرژی موج منتقل می‌شود و بخشی

جدول ۳. خصوصیات ماده منفجره‌ی آنفو و هندسه‌ی چال انفجاری. [۳]

| خصوصیات | نماد | مقدار | واحد |
|--------------------------|--------------|-------|----------------------|
| چگالی ماده منفجره‌ی آنفو | (ρ_e) | ۰٫۸۲ | (سانتی متر مکعب/گرم) |
| سرعت انفجار آنفو | (VOD) | ۳۱۰۰ | (متر/ثانیه) |
| شعاع چال انفجاری | (b) | ۳۸ | (میلی متر) |

قائم و با نسبت طول به قطر بسیار زیاد، حفر و با ماده‌ی منفجره‌ی آنفو خرج‌گذاری شود. همچنین فرض شده است که انفجار به صورت هم‌زمان در تمام طول خرج استوانه‌یی صورت می‌گیرد. مشخصات چال و خرج مورد استفاده در آن در جدول ۳ آورده شده است.

سازوکار انفجار فرض شده برای یک چال با خرج استوانه‌یی طی فرایند انفجار، محیط به‌طور تقریبی در دو مرحله بارگذاری می‌شود. در مرحله‌ی اول، بارگذاری توسط موج ضربه انجام می‌شود و در مرحله‌ی بعدی، انبساط گازهای حاصل از انفجار باعث بارگذاری مجدد محیط اطراف شده و منجر به خردشدن نهایی سنگ می‌شود. بعد از تولید موج ضربه و انتشار آن در محیط، فشار ناشی از برخورد مولکول‌های گاز بر دیواره‌ی چال موجب می‌شود که شعاع چال انفجاری از مقدار اولیه‌ی b به مقدار $b + \Delta b$ افزایش یابد. بیشینه‌ی فشار دینامیکی^۵ اعمالی بر دیواره‌ی محفظه‌ی انفجار (فشار انفجار) را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی نیمه‌تجربی لیو و تیدمان^۶ ارزیابی کرد. [۶] در این رابطه از ویژگی‌های توده سنگ و ماده‌ی منفجره برای محاسبه‌ی فشار انفجار استفاده شده است.

$$P_m = 1.62 \times (\rho_e \times VOD^2) \times \left(\frac{\rho_r \times V_p}{\rho_e \times VOD} \right)^{0.25} \quad (1)$$

که در آن:

ρ_e : چگالی ماده‌ی منفجره برحسب گرم بر سانتی متر مکعب
 VOD : سرعت انفجار ماده‌ی منفجره^۷ برحسب کیلومتر بر ثانیه
 ρ_r : چگالی سنگ برحسب گرم بر سانتی متر مکعب
 V_p : سرعت موج طولی برحسب کیلومتر بر ثانیه و
 P_m : بیشینه‌ی فشار دینامیکی روی دیواره‌ی چال برحسب کیلو بار است.

مقادیر عددی پارامترهای فوق به‌عنوان خصوصیات توده‌سنگ، ماده‌ی منفجره و هندسه‌ی چال انفجار در جداول ۱ و ۲ و ۳ آمده است. با قرار دادن مقادیر پارامترهای فوق در معادله‌ی ۱ مقدار بیشینه‌ی فشار دینامیکی (فشار انفجار) برابر ۱۶۳۵ مگاپاسکال محاسبه می‌شود. موج ضربه‌یی ناشی از انفجار نیز به‌صورت یک پالس مثلثی ساده شده که حاصل از بیشینه‌ی فشار انفجار معادل ۱۶۳۵ مگاپاسکال است به دیواره‌ی چال انفجاری به‌قطر ۷۶ میلی‌متر وارد شده است.

این مدل، اطلاعات ورودی انفجار که بخشی از آن مشخصات موج ضربه است به‌صورت یک پالس مثلثی با فشار بیشینه‌ی دینامیکی وارد بر دیواره‌ی چال (فشار انفجار) و زمان دوام آن در نظر گرفته شده است. بنابراین فرض شده که فشار دینامیکی به‌صورت نرمال، شعاعی و به‌طور یکنواخت روی دیواره‌ی چال اعمال می‌شود.

شبیه‌سازی مسئله

به‌منظور حل عددی مسئله، نمونه‌یی از توده‌سنگ رسوبی شامل یک لایه ماسه‌سنگ و یک لایه سنگ آهک - که اطلاعات فیزیکی و ژئومکانیکی آن در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده - انتخاب شده است. [۵] فرض بر این است که در این سنگ یک چال استوانه‌یی به شعاع b به‌صورت

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و ژئومکانیکی ماسه سنگ. [۵]

| خصوصیات ماسه‌سنگ | نماد | مقدار | واحد |
|---------------------------|----------------|-------|------------------------|
| چگالی سنگ | (ρ_r) | ۱٫۹ | (سانتی متر مکعب / گرم) |
| مدول یانگ | (E_r) | ۱۶ | (گیگاپاسکال) |
| مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ | (σ_c) | ۲۵ | (مگاپاسکال) |
| نسبت پواسون | (ν) | ۰٫۳۴ | - |
| مدول حجمی | (K) | ۱۶٫۷ | (گیگاپاسکال) |
| مدول برشی | (G) | ۵٫۹۷ | (گیگاپاسکال) |
| مقاومت کششی | (σ_t) | ۲ | (مگاپاسکال) |
| سرعت امواج طولی | (C_p) | ۳۶۰۰ | (متر/ثانیه) |
| چسبندگی | (C_0) | ۴ | (مگاپاسکال) |
| زاویه اصطکاک داخلی | (ϕ) | ۳۹ | (درجه) |

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و ژئومکانیکی سنگ آهک. [۵]

| خصوصیات سنگ آهک | نماد | مقدار | واحد |
|---------------------------|----------------|-------|----------------------|
| چگالی سنگ | (ρ_r) | ۲٫۵ | (سانتی متر مکعب/گرم) |
| مدول یانگ | (E_r) | ۵۴ | (گیگاپاسکال) |
| مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ | (σ_c) | ۵۸ | (مگاپاسکال) |
| نسبت پواسون | (ν) | ۰٫۲۵ | - |
| مدول حجمی | (K) | ۳۶ | (گیگاپاسکال) |
| مدول برشی | (G) | ۲۱٫۶ | (گیگاپاسکال) |
| مقاومت کششی | (σ_t) | ۴ | (مگاپاسکال) |
| سرعت امواج طولی | (C_p) | ۵۰۹۱ | (متر/ثانیه) |
| چسبندگی | (C_0) | ۸ | (مگاپاسکال) |
| زاویه اصطکاک داخلی | (ϕ) | ۵۰ | (درجه) |

از طرفی با توجه به پارامترهای ژئومکانیکی محیط سرعت موج فشاری از رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید.

$$C_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} \quad (3)$$

با قراردادن خصوصیات کشسانی در رابطه‌ی فوق سرعت موج فشاری در محیط توده‌سنگ شامل ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک به ترتیب برابر متر بر ثانیه 3600° و متر بر ثانیه 5091° محاسبه می‌شود. با توجه به فرکانس طبیعی مدل (هرتز 130°)، اندازه‌ی مش سانتیمتر ۱۶ انتخاب شد.

انتخاب مدل رفتاری

در این تحقیق رفتار توده‌سنگ مورد مطالعه تحت عملکرد انفجار در دو سری تحلیل جداگانه به صورت کشسانی 1° و خمیری 11° بررسی شده است. مدل کشسان ساده‌ترین شکل رفتار ماده را نشان می‌دهد و برای مواد همگن، ایزوتروپ و پیوسته معتبر است. مدل موهر-کولمب 12° نیز که از جمله مدل‌های بیان‌کننده‌ی رفتار خمیری برای مدل‌سازی توده‌های سنگی است، برای توصیف رفتار ماده‌ی مورد استفاده در محدوده‌ی مدل‌سازی به کار گرفته شده است. این مدل دارای یک سطح تسلیم برشی 13° است که با پارامترهای چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی تعریف می‌شود.

نتایج تحلیل عددی حاصل از مدل رفتاری کشسان و خمیری

نتایج به دست آمده، حاصل اجرای نرم‌افزار UDEC با استفاده از مدل رفتاری کشسان و خمیری است. نتایج شامل تغییرات حداکثر جابه‌جایی ذره، حداکثر سرعت ذره 14° (PPV) نسبت به فاصله از محل انفجار، تغییرات تنش‌های اعمالی به مدل بر اثر عبور موج، گسترش منطقه‌ی خمیری در اطراف چال، تخمین ضرایب انعکاس، و انتقال، و برآورد مقدار انرژی انعکاسی و انتقالی در فصل مشترک دو محیط است. نتایج حاصله در شکل‌های ۲ تا ۱۴ ارائه شده‌اند.

تغییرات جابه‌جایی افقی ذره بر اثر عبور موج از فصل مشترک در لایه

نمودار حداکثر جابه‌جایی ذره در بلوک انفجاری مورد نظر در فاصله‌ی ۲ تا ۹ متری از مرکز چال در لایه‌های ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک و به فواصل ۱ متری در جهت شعاعی برای زمان‌های $2/72^\circ$ و $2/8^\circ$ میلی‌ثانیه محاسبه شده و در شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب برای حالت‌های کشسان و خمیری آورده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها ملاحظه می‌شود، با انفجار ماده‌ی منفجره در محیط ماسه‌سنگ و انتشار موج، جابه‌جایی افقی ذره افزایش می‌یابد و حداکثر جابه‌جایی افقی ذره

تحلیل عددی انتشار امواج حاصل از انفجار

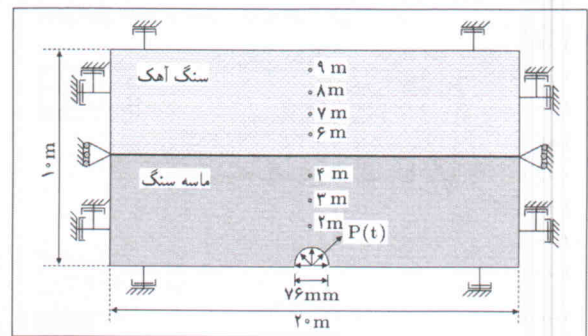
هندسه‌ی مدل و شرایط مرزی

برای تحلیل فرایند انتشار امواج حاصل از انفجار در توده‌سنگ مدل‌سازی شده، محدوده‌ی به ابعاد $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ در نظر گرفته شده است. خرج انفجاری به صورت استوانه‌ی در لایه ماسه‌سنگ جانمایی شده و با توجه به طول زیاد چال انفجاری نسبت به قطر آن مسئله به صورت کرنش صفحه‌ی تحلیل شده است. به منظور کاهش حجم محاسبات، نصف محدوده‌ی مورد نظر شبیه‌سازی شده و با توجه به ماهیت مسئله یک مقطع دوبعدی در میان ارتفاع چال در نظر گرفته شده است. از نظر وضعیت قرارگیری لایه‌ها فرض شده است که لایه‌ی ماسه‌سنگ به ضخامت ۵ متر در کنار لایه‌ی سنگ‌آهک قرار گرفته است. ابعاد مدل با اعمال شرایط مرزی محدود شده است، و برای جلوگیری از انعکاس ناخواسته‌ی امواج از مرزهای مدل به داخل مدل، از مرزهای میراگر^۸ استفاده شده است.^[۷] بنابراین شرایط مرزی میراگر برای مرزهای دو طرف مدل و مرز پایینی و بالایی مدل اعمال شده است. همچنین برای جلوگیری از جابه‌جایی‌های برشی، مرزهای دو طرف مدل ثابت شده‌اند. در شکل ۱ هندسه‌ی مدل شامل ابعاد مدل، موقعیت چال، ابعاد چال، وضعیت لایه‌بندی، موقعیت فصل مشترک، شرایط مرزی و نقاط اندازه‌گیری در فواصل ۲ تا ۹ متری از مرکز چال در لایه‌های ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک و به فواصل ۱ متری عمود بر فصل مشترک آورده شده است.

کولمیر و لیسیمیر^۹ (۱۹۷۳) نشان دادند که برای تحلیل درست و منطقی انتشار موج به روش عددی، اندازه‌ی المان استفاده شده برای مش‌بندی محیط، Δl ، باید کوچک‌تر از $\frac{1}{8}$ تا $\frac{1}{10}$ طول موج منتشره در محیط باشد.^[۸]

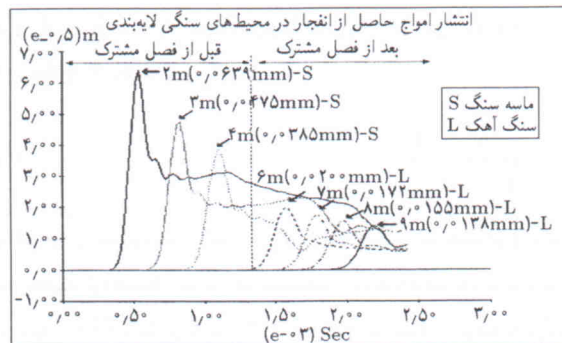
$$\Delta l \leq \left(\frac{1}{8} - \frac{1}{10}\right)\lambda \quad (2)$$

که در آن: λ طول موج ورودی است.

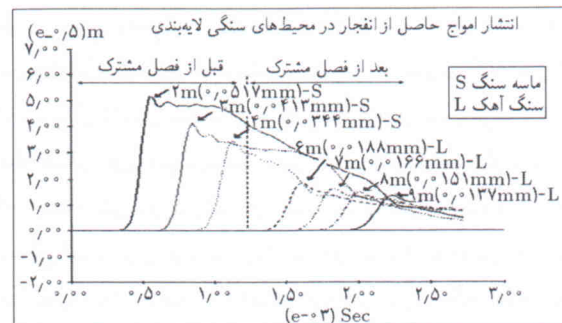


شکل ۱. هندسه‌ی مدل شامل ابعاد مدل، موقعیت چال، ابعاد چال، وضعیت لایه‌بندی و شرایط مرزی و نقاط اندازه‌گیری.

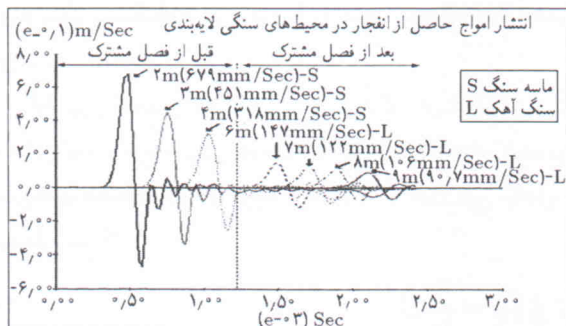
حالت‌های کشسان و خمیری به‌ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ آورده شده است. با شروع انفجار، حداکثر سرعت ذره برای نقاط در نظر گرفته شده در فاصله‌ی ۱ متری قبل و بعد از فصل مشترک در حالت کشسان از ۳۱۸ میلی‌متر بر ثانیه به ۱۴۷ میلی‌متر بر ثانیه، و در حالت خمیری از ۲۷۲ میلی‌متر بر ثانیه به ۱۳۴ میلی‌متر بر ثانیه کاهش یافته است. با توجه به این شکل‌ها با افزایش فاصله از محل انفجار حداکثر سرعت ذره به‌طور نمایی کاهش یافته است. توزیع حداکثر سرعت ذره و نحوه‌ی انتشار موج در اطراف چال انفجاری پس از گذشت زمان ۱/۴۷۱ میلی‌ثانیه به‌ترتیب برای حالت کشسان و خمیری در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. جبهه‌ی موج پس از رسیدن به فصل مشترک دو محیط و انتقال بخشی از انرژی موج به سنگ‌آهک در زمان ۱/۴۷۱ میلی‌ثانیه در حالت کشسان و خمیری به‌ترتیب در فواصل ۶/۶ متر و ۶/۲ متر از مرکز چال است. همان‌طور که در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود با انتشار موج در توده‌سنگ در برگیرنده‌ی منبع ایجاد اغتشاش و برخورد آن به فصل مشترک دو لایه به‌دلیل تغییر خصوصیات فیزیکی و ژئومکانیکی توده‌سنگ و تغییر امدانس دو محیط، بخشی از انرژی موج در فصل مشترک جذب می‌شود، و بخشی از انرژی نیز منتقل می‌شود، در حالت کشسان بخشی نیز از فصل مشترک دو لایه منعکس می‌شود. در حالت کشسان



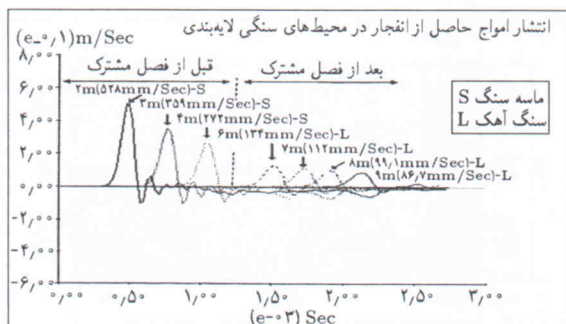
شکل ۲. نمودار تغییرات جابه‌جایی افقی ذره در فاصله‌ی ۲ تا ۹ متری از محل انفجار در حالت کشسان.



شکل ۳. نمودار تغییرات جابه‌جایی افقی ذره در فاصله‌ی ۲ تا ۹ متری از محل انفجار در حالت خمیری.



شکل ۴. نمودار تغییرات سرعت ذره در توده‌سنگ رسوبی برای فواصل ۲ تا ۹ متری در حالت کشسان.

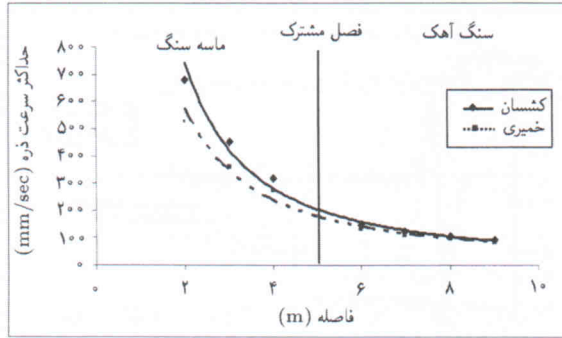


شکل ۵. نمودار تغییرات سرعت ذره در توده‌سنگ رسوبی برای فواصل ۲ تا ۹ متری در حالت خمیری.

در فاصله‌ی ۱ متری قبل و بعد از فصل مشترک، در حالت کشسان از ۰/۳۸۵ میلی‌متر به ۰/۲۰۰ میلی‌متر و در حالت خمیری از ۰/۳۴۴ میلی‌متر به ۰/۱۸۸ میلی‌متر کاهش یافته است. شیب نمودار حداکثر جابه‌جایی افقی ذره نسبت به زمان پس از عبور جبهه موج در حالت خمیری به‌دلیل کم‌بودن مدول تغییر شکل توده‌سنگ نسبت به مدول کشسانی، کم‌تر و یکنواخت‌تر از حالت کشسان است. همچنین این عامل منجر به کاهش سرعت انتشار موج در محدوده‌ی خمیری سنگ نسبت به محدوده‌ی کشسان می‌شود. با عبور موج از محیط ماسه‌سنگی و برخورد آن به فصل مشترک دو لایه، بخشی از انرژی موج فشاری منعکس می‌شود. همان‌طور که در شکل‌های ۲ و ۳ ملاحظه می‌شود، با دور شدن از محل انفجار حداکثر جابه‌جایی افقی ذره کاهش می‌یابد، به‌طوری که در لایه‌ی سنگ‌آهک به‌دلیل شرایط بهتر ژئومکانیکی و میرایی کم‌تر نسبت به ماسه‌سنگ، میزان جابه‌جایی افقی ذره بسیار کم‌تر است.

تغییرات حداکثر سرعت ذره‌ی بر اثر عبور موج از فصل مشترک دو لایه

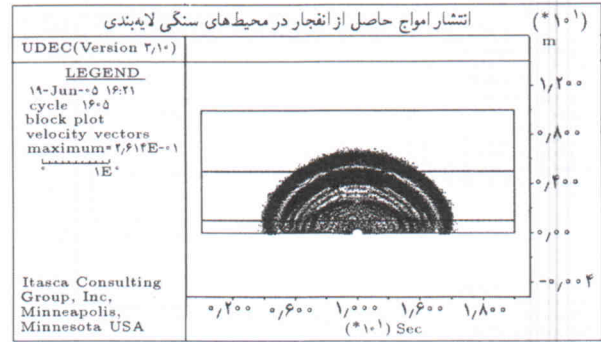
نمودار حداکثر سرعت ذره در بلوک مدل‌سازی شده در فواصل ۲ تا ۹ متری از مرکز چال برای زمان‌های ۲/۸۰ و ۲/۷۲ میلی‌ثانیه برای



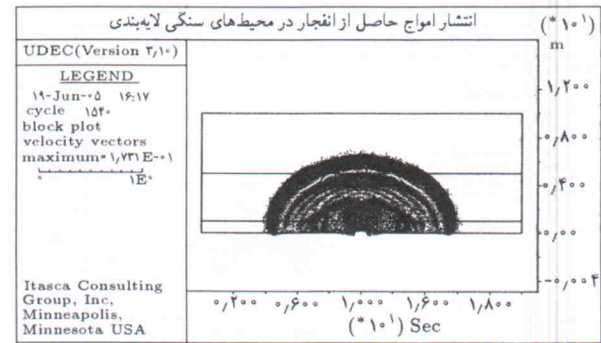
شکل ۱۰. مقایسه‌ی منحنی تغییرات حداکثر سرعت ذرات به‌ازاء فاصله از محل انفجار در دو حالت کشسان و خمیری.

شکل انتشار جبهه موج انعکاسی و انتقالی پس از برخورد به فصل مشترک دو لایه منظم است، در حالی که در حالت خمیری جبهه موج انعکاسی و انتقالی دچار آشفتگی می‌شود که علت آن تغییر شکل‌های نسبی بیشتر در ماده، در دو طرف فصل مشترک در حالت خمیری است. به‌طور کلی در حالت کشسان و خمیری دامنه‌ی موج انتقالی کم‌تر از دامنه‌ی موج ورودی است. در حالت کشسان به‌علت جذب درصد بیشتری از انرژی در مرز لایه‌بندی، درصد کاهش دامنه نسبت به حالت خمیری بیشتر است. در شکل ۱۰ نیز مقایسه‌ی تغییرات حداکثر سرعت ذرات به‌ازای فاصله از محل انفجار در دو حالت کشسان و خمیری آمده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود مقادیر حداکثر سرعت ذرات ثبت شده در نقاط مختلف محیط در حالت کشسان بیشتر از حالت خمیری است.

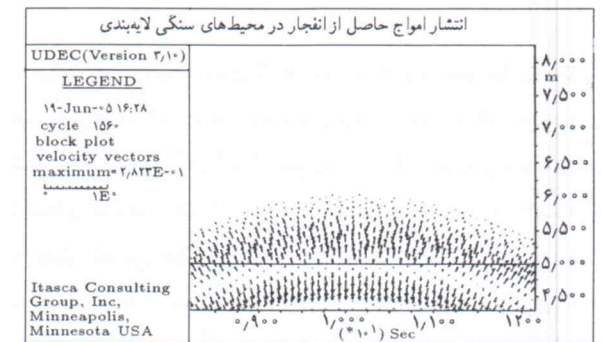
تغییرات تنش در مدل بر اثر عبور موج از فصل مشترک دو لایه اشکال ۱۱ و ۱۲ تغییرات تنش فشاری اعمال شده به محیط بر اثر عبور موج در فواصل ۲ تا ۹ متری از مرکز چال انفجاری را در حالت‌های کشسان و خمیری نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود در حالت کشسان حداکثر تنش فشاری به‌ترتیب در فاصله‌ی ۱ متری قبل و بعد از فصل مشترک، از ۲٫۲۵ مگاپاسکال به ۱٫۸۹ مگاپاسکال و در حالت خمیری مقدار حداکثر تنش فشاری به‌ترتیب در فاصله ۱ متری قبل و بعد از فصل مشترک از ۱٫۹۲ مگاپاسکال به ۱٫۶۲ مگاپاسکال کاهش یافته است، در حالی که مقدار فشار اولیه‌ی وارد بر دیواره‌ی چال ۱۶۳۵ مگاپاسکال بوده است. در حالت کشسان در اثر عبور جبهه موج از یک نقطه، تنش فشاری ایجاد می‌شود و تغییر شکل‌های کشسان ایجاد شده بعد از عبور جبهه موج از آن نقطه تقریباً برگشت‌پذیر است. تغییر شکل‌های برگشتی نشان‌دهنده‌ی وجود تنش کششی در آن نقطه است. به‌همین دلیل منحنی تغییرات تنش نسبت به زمان متقارن است و به‌ازاء یک نقطه‌ی قعر در منحنی فشار یک نقطه‌ی اوج در منحنی کشش



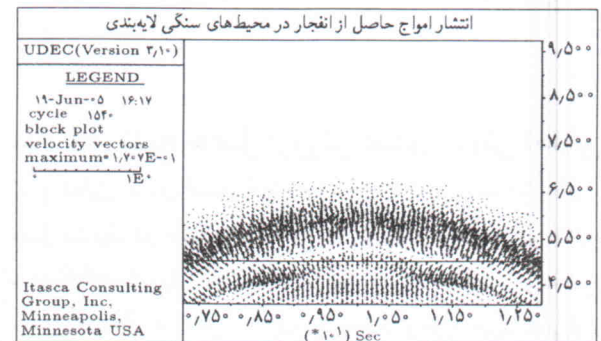
شکل ۶. توزیع بردار حداکثر سرعت ذره در اطراف فصل مشترک دو لایه ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک در زمان ۱٫۴۷۱ میلی‌ثانیه در حالت کشسان.



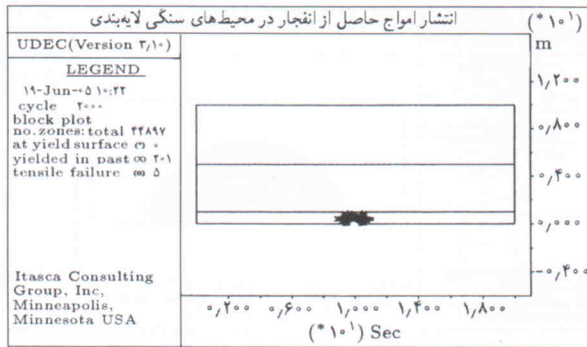
شکل ۷. توزیع بردار حداکثر سرعت ذره در اطراف فصل مشترک دو لایه ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک در زمان ۱٫۴۷۱ میلی‌ثانیه در حالت خمیری.



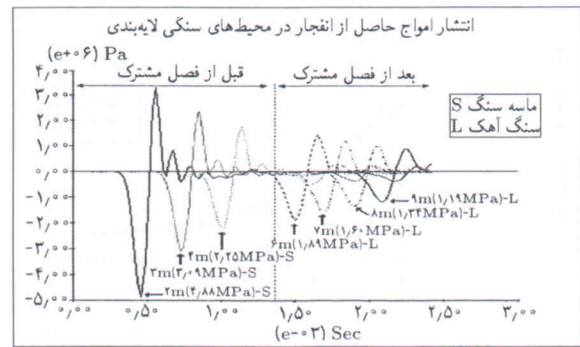
شکل ۸. بزرگ‌نمایی برخورد موج و انعکاس و انتقال آن از فصل مشترک دو لایه در حالت کشسان.



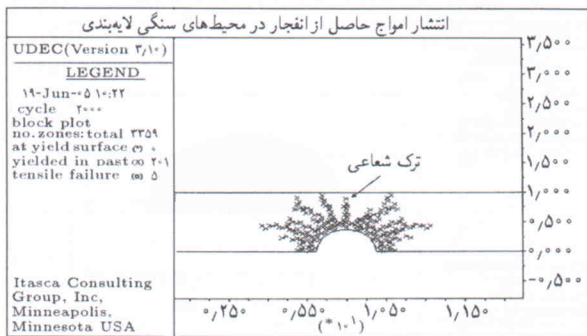
شکل ۹. بزرگ‌نمایی برخورد موج و انعکاس و انتقال آن از فصل مشترک دو لایه در حالت خمیری.



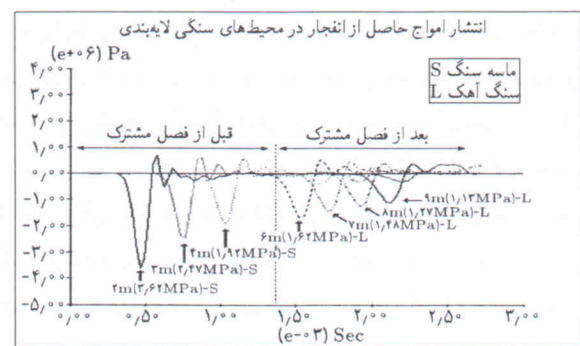
شکل ۱۳. محدوده‌ی منطقه‌ی خمیری اطراف چال انفجاری در زمان ۲٫۷۲ میلی‌ثانیه.



شکل ۱۱. نمودار تغییرات تنش فشاری در فاصله‌ی ۲ تا ۹ متری در توده‌سنگ رسوبی در حالت کشسان.



شکل ۱۴. بزرگ‌نمایی محدوده‌ی منطقه‌ی خمیری اطراف چال انفجاری در زمان ۲٫۷۲ میلی‌ثانیه.



شکل ۱۲. نمودار تغییرات تنش فشاری در فاصله‌ی ۲ تا ۹ متری در توده‌سنگ رسوبی در حالت خمیری.

ضعیف محدوده‌ی منطقه‌ی کاملاً خمیری ۸ برابر قطر چال است. [۳] همان‌طورکه در این شکل دیده می‌شود در ماسه‌سنگ شبیه‌سازی شده، محدوده منطقه‌ی کاملاً خمیری برابر ۶۰ سانتی‌متر و محدوده‌ی ترک‌های توسعه یافته از این منطقه برابر ۴۰ سانتی‌متر است که با معیار تجربی دوال و اتکیسون مطابقت دارد. در ضمن انتشار شعاعی ترک‌ها از منطقه‌ی کاملاً خردشده در شکل مشاهده می‌شود. براساس قاعده‌ی سرانگشتی محدوده‌ی منطقه‌ی خمیری ۱۵ تا ۲۰ برابر شعاع چال برآورد می‌شود. [۳] این مقدار با استفاده از روش عددی ۲۵ برابر شعاع چال برآورد شده که نزدیک به مقدار تجربی فوق است.

مقایسه‌ی نتایج حاصل از روش عددی و روش تحلیلی
نتایج تحلیل عددی انتشار امواج حاصل از انفجار و اندرکنش آن با فصل مشترک دو محیط توده‌سنگ، ماسه‌سنگ و سنگ آهک با نتایج به دست آمده از روش تحلیلی مقایسه شده است. هنگامی که یک موج به‌صورت نرمال به فصل مشترک دو محیط برخورد می‌کند می‌توان توسط معادلات زئوپریتر^{۱۶} دامنه‌های امواج منعکس شده و منتقل شده را در فصل مشترک دو لایه تعیین کرد. [۵] بنابراین در حالت برخورد

وجود دارد. اما در محیط‌های خمیری فقط بخش کمی از تغییر شکل‌ها برگشت‌پذیر خواهد بود که نشان‌دهنده‌ی تنش کششی بسیار کم در اثر عبور جبهه موج است. همچنین در حالت خمیری وجود اختلاف محسوس بین نقاط اوج و قعر منحنی مؤید وجود تغییر شکل کشسان بسیار اندکی در انفجار محیط‌های واقعی است و بنابراین بخش اعظم انرژی صرف تغییر شکل خمیری در محیط خواهد شد.

تغییرات محدوده‌ی منطقه‌ی خمیری

در مرحله‌ی اولیه‌ی فرایند انفجار که بارگذاری توسط موج ضربه‌یی انجام می‌شود، مقدار تنش ناشی از جبهه موج فشاری بیش از مقاومت کششی دینامیکی توده‌سنگ است و موجب تخریب سنگ در مقیاس میکروسکوپی می‌شود و منطقه‌ی ایجادشده، منطقه‌ی کاملاً خمیری یا منطقه‌ی کاملاً خردشده است. [۳] محدوده‌ی منطقه‌ی خمیری ناشی از انتشار موج حاصل از انفجار پس از گذشت زمان ۲٫۷۲ میلی‌ثانیه در شکل ۱۳ نشان داده شده است. این محدوده حاوی ۶ ترک شعاعی و متوسط زاویه بین ترک‌های شعاعی ۴۰ درجه است. بزرگ‌نمایی محدوده‌ی منطقه‌ی خمیری اطراف چال انفجاری در شکل ۱۴ آمده است. طبق نظریه‌ی دوال و اتکیسون^{۱۵} در توده‌سنگ‌های

جدول ۴. مقادیر ضریب انعکاس، انتقال و جذب در فصل مشترک دو محیط به روش عددی و تحلیلی.

| محیط | نوع محیط | خصوصیات فیزیکی | | نسبت امپدانس محیط اول به دوم (Z_1/Z_2) | ضریب انعکاس | | ضریب انتقال | |
|------|----------|-----------------------|----------------------|---|-------------|-------|-------------|-------|
| | | موج (سرعت) m/sec | (چگالی) gr/cm^3 | | روش عددی | | روش تحلیلی | |
| | | | | | کشسان | خمیری | کشسان | خمیری |
| ۱ | ماسه‌سنگ | ۳۶۰۰ | ۱٫۹ | ۰٫۵۴ | ۰٫۴۰ | ۰٫۳۰ | ۰٫۷۰ | ۰٫۷۲ |
| ۲ | سنگ آهک | ۵۰۹۱ | ۲٫۵ | | ۰٫۸۴ | ۰٫۷۲ | | |

جدول ۵. مقادیر شار انرژی ورودی، انتقالی، انعکاسی و درصد انرژی انتقالی، انعکاسی و جذب شده از فصل مشترک.

| محیط | شار انرژی ورودی $(\frac{j}{m^2 \cdot sec})$ | شار انرژی انتقالی $(\frac{j}{m^2 \cdot sec})$ | شار انرژی انعکاسی $(\frac{j}{m^2 \cdot sec})$ | درصد انرژی انتقالی | درصد انرژی انعکاسی | درصد انرژی جذب شده |
|---------|--|--|--|--------------------|--------------------|--------------------|
| کشسان | ۷۵ | ۳۹٫۳ | ۶٫۹ | ٪۵۲ | ٪۹٫۲ | ٪۳۸٫۸ |
| پلاستیک | ۳۵٫۴ | ۲۵٫۱ | ۵٫۸ | ٪۷۰ | ٪۱۶ | ٪۱۴ |

چنان که ملاحظه می‌شود نتایج حاصل از مدل عددی کشسان با نتایج تحلیل کشسان که مبانی و فرضیات مشترکی دارند، به خوبی سازگار است. مقدار ضرایب انتقال و انعکاس در حالت کشسان نزدیک به ضرایب محاسبه شده از طریق روش تحلیلی است. با وجود این که اندازه ضرایب انتقال و انعکاس در حالت خمیری بیشتر است، مقدار انرژی انتقالی و انعکاسی به محیط کم‌تر از حالت کشسان است، زیرا در حالت کشسان تفاوت رفتار مکانیکی محیط دو طرف فصل مشترک بیشتر از حالت خمیری است و سهم بیشتری از این انرژی در فصل مشترک دو لایه جذب می‌شود. نتایج حاصل از روش عددی با استفاده از مدل رفتاری خمیری که به شرایط واقعی سنگ نزدیک‌تر است تا اندازه‌ی با نتایج روش‌های تحلیلی و عددی با فرض استفاده از محیط کشسان متفاوت است.

نتیجه‌گیری

در این نوشتار سازوکار انتشار امواج حاصل از انفجار در یک توده سنگ رسوبی شامل ماسه‌سنگ و سنگ آهک با استفاده از روش عددی المان‌های مجزا و با کاربرد نرم‌افزار UDEC مدل‌سازی شده و نتایج به دست آمده ابتدا با قوانین انتشار موج و نظریه‌های موجود در این زمینه، به‌ویژه انعکاس و انتقال موج از فصل مشترک دو لایه تطبیق داده شده است. با استفاده از نتایج حاصل، شکل و وسعت محدوده‌ی خمیری در اطراف چال انفجاری و نیز چگونگی تشکیل و انتشار جبهه موج فشاری بررسی شده است. نتایج حاصله از این تحقیق را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

۱. مقادیر ضرایب انعکاس و انتقال انرژی در محیط‌های رسوبی شبیه‌سازی شده در حالت کشسان با مقادیر حاصل از روش تحلیلی منطبق است. اما این مقادیر در حالت خمیری با مقادیر

نرمال موج به فصل مشترک دو محیط، روابط ۴ تا ۷ حاکم است:

$$A_1 + A_2 = A_0 \quad (4)$$

$$Z_1 A_1 - Z_2 A_2 = -Z_1 A_0 \quad (5)$$

$$R = \frac{A_1}{A_0} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (6)$$

$$T = \frac{A_2}{A_0} = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (7)$$

که در آن‌ها A_2 ، A_1 ، A_0 به ترتیب دامنه‌های امواج فشاری ورودی، منعکس شده و منتقل شده‌اند و Z_2 ، Z_1 به ترتیب امپدانس‌های محیط اول و محیط دوم هستند که از روابط ۸ و ۹ به دست می‌آیند.

$$Z_1 = \rho_1 \cdot C_{P1} \quad (8)$$

$$Z_2 = \rho_2 \cdot C_{P2} \quad (9)$$

در یک محیط کشسان درصد انرژی منعکس شده (E_R) و انرژی منتقل شده (E_T) از فصل مشترک دو محیط از روابط ۱۰ و ۱۱ به دست می‌آیند. [۵]

$$E_R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (10)$$

$$E_T = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (11)$$

در این محیط مجموع انرژی‌های منعکس شده و منتقل شده و جذب شده روی فصل مشترک دو محیط برابر واحد است. [۷] مقادیر ضرایب انعکاس و انتقال برای دو محیط ماسه‌سنگ و سنگ آهک برای روش‌های عددی و تحلیلی در جدول ۴ آورده شده است. همچنین شار انرژی ورودی، انتقالی، انعکاسی و درصدهای انرژی انتقال و انعکاسی در جدول ۵ آورده شده است.

برابر 6° سانتی‌متر و محدوده‌ی ترک‌های توسعه یافته در اطراف این منطقه برابر با 4° سانتی‌متر است.

۶. در حالت کشسان تغییر شکل‌های برگشتی نشان‌دهنده‌ی وجود تنش کششی در آن نقطه است. به همین دلیل منحنی تغییرات تنش نسبت به زمان متقارن است و به ازاء یک نقطه‌ی قعر در منحنی فشار یک نقطه‌ی اوج در منحنی کشش وجود دارد.

۷. به‌طور کلی در حالت کشسان و خمیری دامنه‌ی موج انتقالی کم‌تر از دامنه‌ی موج ورودی است. در حالت کشسان به‌علت جذب درصد بیشتری از انرژی در مرز لایه‌بندی درصد کاهش دامنه نسبت به حالت خمیری بیشتر است.

۸. شیب نمودار حداکثر جابه‌جایی افقی ذره نسبت به زمان پس از عبور جبهه موج در حالت خمیری به‌دلیل کم بودن مدول تغییر شکل توده‌سنگ نسبت به مدول کشسانی، کم‌تر و یکنواخت‌تر از حالت کشسان است. این عامل منجر به کاهش سرعت انتشار موج در محدوده‌ی خمیری سنگ نسبت به محدوده‌ی کشسان می‌شود.

۹. سرعت انتشار موج فشاری در محیط ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک مدل‌سازی شده به‌ترتیب برابر 366° متر بر ثانیه و 494° متر بر ثانیه محاسبه شده است که بسیار نزدیک به سرعت انتشار موج در توده سنگ، ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک است.

حاصل از روش تحلیلی متفاوت است. با توجه به این‌که پس از انفجار و انتشار امواج به درون توده‌سنگ بروز شرایط محیط خمیری واقع بینانه‌تر است، نتایج تحلیل عددی با استفاده از مدل رفتاری خمیری به واقعیت نزدیک‌تر است.

۲. با وجود بالا بودن مقدار ضرایب انعکاس و انتقال در حالت خمیری نسبت به حالت کشسان، مقدار انرژی انتقالی و انعکاسی در حالت خمیری کم‌تر است.

۳. در حالت کشسان تفاوت رفتار مکانیکی محیط دو طرف فصل مشترک بیشتر از حالت خمیری است و سهم بیشتری از این انرژی در فصل مشترک دو لایه جذب می‌شود.

۴. در حالت کشسان، شکل انتشار جبهه موج انعکاسی و انتقالی پس از برخورد به فصل مشترک دو لایه منظم است، در حالی‌که در حالت خمیری جبهه موج انعکاسی و انتقالی به‌علت تغییر شکل‌های نسبی بیشتر در ماده دو طرف فصل مشترک دچار آشفتگی می‌شود.

۵. بر اساس یک قاعده سرانگشتی محدوده‌ی منطقه‌ی خمیری ۱۵ تا 2° برابر شعاع چال برآورد می‌شود. این مقدار با استفاده از روش عددی، 25° برابر شعاع چال برآورد شده که نزدیک به مقدار تجربی فوق است. محدوده‌ی منطقه‌ی خمیری در توده سنگ رسوبی شبیه‌سازی شده تقریباً 1° متر، محدوده‌ی منطقه‌ی کاملاً خمیری

پانویس

1. heterogenous
2. anisotropic
3. Universal Distinct Element Code (UDEEC)
4. energy flux
5. dynamic pressure
6. liu and tidman
7. velocity of detonation
8. viscous damping
9. kuhlemeyer and lysmeyer
10. elastic
11. plastic
12. mohr - coulomb material model
13. shear yield surface
14. Peak Particle Velocity
15. duvall and atchison
16. zoeppritz

منابع

1. Jimeno, C.L. and Jimeno, E.L. *Drilling and Blasting of Rocks*, A.A Balkema Rotterdam, pp. 335-365 (1995).
2. Cai J.G., and Zhao., J. "Effects of multiple parallel fractures on apparent attenuation of stress waves in rock masses", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Elsevier Science Ltd.*, **37**, pp. 661-682 (2000).

3. Hustrulid W., *Blasting Principles for Open pit Mining*, A.A. Balkema Rotterdam Brookfield, pp. 416-443 (1999).
4. Chen S.G. and Zhao., J. A study of UDEEC modelling for blast wave propagation in jointed rock masses, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Elsevier Science Ltd.*, **35** (1) pp. 93-99 (1998).
5. Sheriff R.E. and Geldart, L.P. *Exploration seismology*, Cambridge university press, pp.33-83 (1995).
6. Liu Q., P. Tidman., "Estimation of the dynamic pressure around a fully loaded blasthole", <http://www.nrcan.gc.ca>, Canmet/Mrl Experimental Mine. (1995).
7. Itasca Consulting Group, Inc. "Universal distinct element code", Version 3.01, Minneapolis, Minnesota. (2000).
8. Olofsson S.O., L. Rosengren, G. Svedbjork., "Modeling of ground-shock wave propagation in soil using FLAC", *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics*, Balkema Rotterdam, pp. 401-405. (1999).