

تحلیل عددی مکانیزم انتشار امواج حاصله از انفجار در یک

توده سنگ گرانیتی

حسن بخشنده امنیهⁱ؛ علی مرتضویⁱⁱ؛ کاظم نجمⁱⁱⁱ

چکیده

در این تحقیق انتشار امواج حاصل از انفجار و اندرکنش آن با محیط توده سنگ دربرگیرنده یک چال انفجاری توسط برنامه کامپیوتری UDEC شبیه سازی شده است. موج ضربه‌ای ناشی از انفجار بصورت یک پالس مثلثی ساده شده که حاصل از ماکزیم فشار انفجار، معادل ۱۸۶۰ مگاپاسکال است به دیواره یک چال انفجاری به قطر ۷۶ میلی‌متر وارد شده است. نتایج حاصله از تحلیل عددی با نتایج تجربی حاصل از ارتعاشات ثبت شده در یک توده سنگ گرانیتی مقایسه شده است. نتایج، انطباق خوبی را بین معیار حداکثر سرعت ذرات پیش بینی شده از روش عددی و روش تجربی نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی

تحلیل عددی، انتشار موج، انفجار، گرانیت

Numerical Analysis of Wave Propagation Mechanism in a Granite Rock Mass

H. Bakhshandeh A.; A. Mortazavi; K. Najm

ABSTRACT

In this research, the interaction of blast-induced stress wave with the surrounding media is investigated by the UDEC code. The stress wave resulting from the explosion of a cylindrical charge is simulated by a triangular pulse which is the result of an overpressure equivalent to 1860 MPa. This pressure is applied to the blasthole wall as a uniform load. Numerical results are compared with published empirical data for blasting in a granite rock mass. A good agreement between numerical and empirical results was achieved.

KEYWORDS

Numerical Analysis, Wave propagation, Blasting, Granite.

ⁱ دانشجوی دکتری استخراج معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر: habakhshandeh@yahoo.com

ⁱⁱ استادیار دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

ⁱⁱⁱ استادیار دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

حاصل از انفجار و زمان تکمیل فرآیند انفجار کنترل شده پیش‌شکافی را بررسی کردند [۱۹].

اولین مطالعات با استفاده از روش‌های تحلیلی توسط بردی^{۱۱} انجام گرفت. پس از آن یونیشی و روزمانیس^{۱۱} رابطه شدت تنش و حداکثر سرعت ذرات را برای پالس رایلی در جسم ایزوتروپ و الاستیک بررسی و ارائه کردند [۱]، [۲۰].

کاربرد مدلسازی عددی با استفاده از روش المان مرزی توسط فن^{۱۲} به منظور بررسی امواج سطح مشترک در یک شکستگی گزارش شده است [۶]. پس از آن کای و ژاو^{۱۲} اثرات شکستگی‌های صفحه‌ای متوالی و موازی را روی تضعیف امواج الاستیک یک بعدی که بطور عمود بر صفحات برخورد می‌کنند بررسی کردند [۲]. هو^{۱۳} و همکاران پاسخ دینامیکی توده سنگ نسبت به امواج تنش ناشی از انفجار را با استفاده از مکانیک تخریب آئیزوتروپی، تخریب اولیه آئیزوتروپی آماری، تخریب جمعی و خصوصیات معادل ماده سنگ که از داده‌های آزمایشگاهی و صحرایی بدست آمد به روش‌های تحلیلی و عددی بررسی و مدلسازی نمودند [۸]، [۹].

در این تحقیق با توجه به مکانیزم حاکم بر فرآیند انفجار و با استفاده از قابلیت‌های موجود در نرم‌افزار المان مجزای UDEC^{۱۵}، فرآیند انتشار امواج دینامیکی حاصل از انفجار در شرایط مختلف مدلسازی شده است. به این منظور یک محدوده به ابعاد ۲۰ متر در ۲۰ متر از گرانتیت سوئدی مشتمل بر یک چال به قطر ۷۶ میلی‌متر (معادل ۳ اینچ) و فشار انفجار ۱۸۶۰ مگاپاسکال مدلسازی شده و برای اولین بار اثر انتشار امواج ضربه‌ای حاصل از انفجار یک پالس مثلثی ساده شده بطور دینامیکی بررسی شده است. در این مدل عملکرد امواج حاصل از انفجار یک خرج استوانه‌ای شامل توزیع جابجایی افقی ذره، حداکثر سرعت ذرات نسبت به زمان، تغییرات بار اعمال شده به دیواره چال، تنشهای اعمالی به محیط بر اثر عبور جبهه موج و گسترش زون پلاستیک در محدوده انفجار و محدوده میدان تنش کششی در یک توده سنگ گرانتیتی بررسی شده است.

۲- تحلیل عددی فرایند انفجار یک چال در یک

توده سنگ گرانتیتی

برای تحلیل عددی فرایند انفجار یک چال در توده سنگ گرانتیتی از نرم افزار UDEC استفاده شده است. این نرم افزار دارای قابلیت شبیه‌سازی تمام فرایند انفجار نیست. به همین دلیل اطلاعات اولیه شرایط انفجار باید توسط دیگر روشها پیش‌بینی شوند [۳]. در این مدل، اطلاعات ورودی انفجار که بخشی از آن موج ضربه است، بصورت یک پالس مثلثی با

انفجار از روشهای عمده در عملیات استخراج معادن روباز، حفرتونل، حفرتراشه، سدسازی، احداث جاده و فضاهای زیر زمینی کوچک و بزرگ است. در اثر انفجار مواد منفجره در داخل یک توده سنگ، انرژی قابل توجهی در زمان بسیار کوتاه آزاد می‌شود و بخشی از آن به شکل امواج در درون توده سنگ دربرگیرنده منتشر می‌شود و ذرات محیط را به ارتعاش در می‌آورد. این لرزشها می‌توانند منبع نگرانی‌های زیست محیطی نیز باشند و باعث وارد آمدن خسارت به ساختمانها و تأسیسات اطراف منطقه انفجار و ناپایداری و شکست سازه‌های سطحی و زیرزمینی شوند. به همین دلیل به منظور کنترل عملیات انفجار، اثر امواج حاصل از انفجار در توده سنگ باید قبل از انفجار پیش‌بینی شود. مهمترین معیار برای ارزیابی و پیش‌بینی میزان خسارت ناشی از لرزش، بررسی حداکثر سرعت ذرات^۱ (PPV) است. فعالیت‌های انجام شده در این زمینه را می‌توان در چهار بخش اندازه‌گیری‌های صحرایی، مطالعات آزمایشگاهی، روش‌های تحلیلی و روش‌های عددی تقسیم‌بندی نمود.

تحقیقات در زمینه اندازه‌گیری صحرایی پارامتر حداکثر سرعت ذرات از سال ۱۹۳۰ توسط اداره معادن آمریکا شروع و نتایج آن در سال ۱۹۴۴ منتشر شد [۱۳]. پس از آن محققانی مانند لانگفورد^۲ و کیلستروم^۲ بر روی حداکثر سرعت ذرات تحقیق کردند. این محققان شدت ارتعاشات حاصل از انفجار را به فاصله نقطه اندازه‌گیری تا محل انفجار و مقدار وزن ماده منفجره مصرفی ارتباط دادند [۱۵]. دودینگ^۳، آمبراسیس و هندرون^۴ رابطه تجربی حداکثر سرعت ذرات را بترتیب بر اساس ریشه دوم و سوم فاصله مقیاس شده^۵ (نسبت فاصله نقاط اندازه‌گیری از محل انفجار به ریشه‌های دوم و سوم ماکزیمم وزن خرج به ازای هر تأخیر) پیشنهاد کردند [۴]. گوش و دیمن^۶ میزان کاهش نمایی حداکثر سرعت ذرات را نسبت به فاصله بیان کرده و معتقد به استفاده از ریشه دوم و سوم فاصله مقیاس شده بترتیب برای خرج‌های استوانه‌ای و کروی بودند [۷]. با توجه به نوع فعالیت معدنی روباز و زیرزمینی، رابطه تجربی حداکثر سرعت ذرات توسط روی^۷ ارائه شد [۱۸]. در نخستین گام فورنی^۸ و همکاران در زمینه مطالعات آزمایشگاهی امواج تنش ناشی از انفجار را با روش فتوالاستیک دو بعدی و برای مواد منفجره خاص به پنج فاز تقسیم و هر فاز را بطور جداگانه بررسی نمودند [۵]. پس از آن، سیمها^۹ و همکاران با روش آنالیز فتوالاستیک، مکانیزم انتشار امواج

ماکزیم فشار دینامیکی^{۱۶} وارد بر دیواره چال (فشار انفجار) و زمان دوام آن در نظر گرفته شده است. بنابراین فرض شده که فشار دینامیکی روی دیواره چال بصورت نرمال، شعاعی و بطور یکنواخت اعمال می شود.

۱-۲- شبیه سازی مسئله

به منظور حل عددی مسأله یک نمونه سنگ گرانیت سوئدی بنام گرانیت اجبی^{۱۷} که اطلاعات فیزیکی و ژئومکانیکی آن در دسترس بوده و در جدول (۱) آورده شده انتخاب شده است. این گرانیت، سنگی سخت با بافت متراکم و ایزوتروپ می باشد [۱۶]. فرض بر این است که در این سنگ یک چال استوانه ای بصورت قائم، با نسبت طول به قطر بسیار زیاد و جفت شدگی کامل حفر و خرج گذاری شود. مشخصات چال و خرج مورد استفاده آن در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۱): خصوصیات فیزیکی و ژئومکانیکی گرانیت سوئدی [۱۶].

واحد	مقدار	نماد	خصوصیات گرانیت سوئدی
(gr/cm^3)	۲/۶۴۴	(ρ_r)	چگالی سنگ
(GPa)	۵۲/۴	(E_r)	مدول یانگ
(MPa)	۱۸۸	(σ_c)	مقاومت فشاری تک محوری سنگ
-	۰/۱۷	(ν)	نسبت پواسون
(GPa)	۲۶/۵	(K)	مدول حجمی
(GPa)	۲۲/۴	(G)	مدول برشی
(MPa)	۱۰/۵	(σ_t)	مقاومت کششی
(m/s)	۴۷۹۰	(C_p)	سرعت امواج طولی
(MPa)	۲۴/۳	(C_n)	چسبندگی
$(degree)$	۶۰	(ϕ)	زاویه اصطکاک داخلی

جدول (۲): خصوصیات ماده منفجره آنفو و هندسه چال [۱۰].

واحد	مقدار	نماد	خصوصیات
(gr/cm^3)	۷۸۲	(ρ_e)	دانشیته ماده منفجره آنفو
(m/s)	۳۱۰۰	(VOD)	سرعت انفجار آنفو
(mm)	۲۸	(b)	شعاع چال

۲-۲- مکانیزم انفجار در نظر گرفته شده برای یک چال

با خرج استوانه ای

انفجار یک خرج استوانه ای متشکل از ماده منفجره آنفو^{۱۸} (ANFO) در یک چال به شعاع b در نظر گرفته شده است. همچنین فرض شده است که انفجار بصورت همزمان در تمام

طول خرج استوانه ای صورت می گیرد. طی فرآیند انفجار، محیط بطور تقریبی در دو مرحله بارگذاری می شود. در مرحله اول، بارگذاری توسط موج ضربه انجام می شود و در مرحله بعدی، انبساط گازهای حاصل از انفجار باعث بارگذاری مجدد محیط اطراف شده و منجر به خردایش نهایی سنگ می شود. بعد از تولید موج ضربه و انتشار آن در محیط، فشار ناشی از برخورد مولکولهای گاز بر دیواره چال موجب می شود که شعاع چال انفجاری از مقدار اولیه b به مقدار $b + \Delta b$ افزایش یابد. ماکزیم فشار دینامیکی اعمالی بر دیواره محفظه انفجار (فشار انفجار) را می توان با استفاده از رابطه نیمه تجربی لیو و تیدمان^{۱۹} ارزیابی کرد [۱۷]. در این رابطه از ویژگی های توده سنگ و ماده منفجره برای محاسبه 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 دانشیته ماده منفجره بر حسب gr/cm^3 و VOD سرعت انفجار ماده منفجره^{۲۰} بر حسب km/s و ρ_r چگالی سنگ بر حسب gr/cm^3 و V_p سرعت موج طولی بر حسب km/s و P_m ماکزیم فشار دینامیکی روی دیواره چال برحسب $Kbar$ می باشد.

خصوصیات توده سنگ، ماده منفجره و هندسه چال انفجار در جدول (۱) و (۲) آمده است. با قرار دادن مقادیر فوق در (۱) مقدار ماکزیم فشار دینامیکی (فشار انفجار) برابر ۱۸۶۰ مگاپاسکال محاسبه می شود. موج ضربه ای ناشی از انفجار نیز بصورت یک پالس مثلثی ساده شده که حاصل از ماکزیم فشار انفجار معادل ۱۸۶۰ مگاپاسکال می باشد به دیواره یک چال انفجاری به قطر ۷۶ میلی متر وارد شده است.

۳- تحلیل عددی انتشار امواج حاصله از انفجار

۱-۳- هندسه مدل و شرایط مرزی

برای تحلیل فرآیند انتشار امواج حاصل از انفجار در توده سنگ، محدوده ای به ابعاد ۲۰ متر در ۲۰ متر در نظر گرفته شد. خرج انفجاری بصورت استوانه ای در نظر گرفته شده و با توجه به طول زیاد چال انفجاری نسبت به قطر آن مسأله بصورت کرنش صفحه ای تحلیل شده است. به منظور کاهش حجم محاسبات نصف محدوده مورد نظر شبیه سازی شده و با توجه به ماهیت مسئله یک مقطع دو بعدی در میان ارتفاع چال در نظر گرفته شده است.

ابعاد مدل با اعمال شرایط مرزی محدود شده است. برای جلوگیری از انعکاس ناخواسته امواج از مرزهای مدل به داخل

معیار موهر - کولمب برآورد گردید و مقادیر آن در جدول (۱) آمده است.

۴- نتایج حاصل از تحلیل عددی

نتایج ارائه شده، از اجرای نرم افزار UDEC با استفاده از مدل رفتاری موهر- کولمب حاصل شده است که شامل تغییرات حداکثر جابجائی ذره، حداکثر سرعت ذره نسبت به فاصله از محل انفجار، تغییرات تنش‌های اعمالی به مدل بر اثر عبور موج و گسترش زون پلاستیک در اطراف چال می‌باشد. موارد فوق، حاصل اجرای برنامه از زمان صفر (شروع فرایند) تا ۲/۵۶۹ میلی ثانیه (۱۰۰۰۰ سیکل) بوده و در شکل های (۲) تا (۱۶) نشان داده شده است.

۴-۱- تغییرات حداکثر جابجائی ذره نسبت به فاصله از

محل انفجار

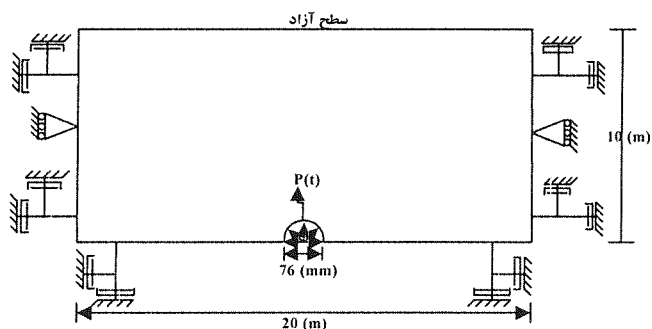
نمودار حداکثر جابجائی افقی ذره در بلوک انفجاری به ابعاد ۲۰ متر در ۱۰ متر از فاصله ۲ متر تا ۱۰ متر (سطح آزاد) و به فاصله ۱ متر در جهت شعاعی برای زمان های فوق در شکلهای (۲) و (۳) آورده شده است. همانطورکه در شکل (۲) ملاحظه می‌شود با انفجار ماده منفجره و انتشار موج در مدل، جابجائی افقی ذره افزایش یافته و پس از ۰/۸۹۸ میلی‌ثانیه حداکثر جابجائی افقی ذره در فاصله ۲ متری از محل انفجار ۰/۶۶۴ میلی‌متر می‌شود. مقادیر جابجائی افقی ذره برای فواصل ۲ تا ۱۰ متری از محل انفجار در شکل (۳) نشان داده شده است. همانطورکه در شکل (۳) ملاحظه می‌شود با دور شدن از محل انفجار مقدار ماکزیمم جابجائی افقی ذره کاهش یافته و با نزدیک شدن به سطح آزاد بدلیل عدم محصوریت، مقدار حداکثر جابجائی ذره افزایش یافته است.

۴-۲- تغییرات حداکثر سرعت ذره‌ای نسبت به فاصله

از محل انفجار

پس از تشکیل موج ضربه‌ای ناشی از انفجار و انتشار آن در توده سنگ دربرگیرنده چال انفجار، انرژی موج ۰/۸۹۸ میلی‌ثانیه پس از لحظه انفجار به فاصله ۲ متری از محل انفجار رسیده و حداکثر سرعت ذره در این فاصله برابر ۵۱۸ میلی‌متر بر ثانیه می‌شود. شکل (۴) تغییرات حداکثر سرعت ذره در فاصله ۲ متری از محل انفجار پس از عبور جبهه موج را نشان می‌دهد. شکل (۵) نیز تغییرات حداکثر سرعت ذره پس از عبور جبهه موج فشاری برای فواصل ۲ تا ۱۰ متری از محل انفجار در زمان ۲/۵۶۹ میلی‌ثانیه را نشان می‌دهد. همانطورکه در شکل (۵) ملاحظه می‌شود حداکثر سرعت ذره با افزایش فاصله

مدل، از مرزهای میراگر^{۱۱} استفاده شده است [۱۱]. بنابراین شرایط مرزی میراگر برای مرزهای دو طرف مدل و مرز پایینی مدل اعمال شده است. همچنین مرزهای دو طرف مدل ثابت شده‌اند تا مانع جابجائی‌های برشی شوند. مرز بالائی مدل نیز سطح آزاد بوده و فاقد هر گونه محدودیتی است. در شکل (۱) هندسه مدل شامل ابعاد، موقعیت چال، ابعاد چال و شرایط مرزی آورده شده است.



شکل (۱): هندسه مدل شامل ابعاد، موقعیت، ابعاد چال و شرایط مرزی.

کولمبیر و ایسمر^{۱۲} نشان دادند که برای تحلیل درست و منطقی انتشار موج به روش عددی، اندازه المان استفاده شده برای مش بندی محیط، Δl ، بایستی کوچکتر از $\frac{1}{8}$ تا $\frac{1}{10}$ طول موج منتشره در محیط باشد [۱۴].

$$\Delta l \leq \left[\frac{\lambda}{8}, \frac{\lambda}{10} \right] \quad (2)$$

که در آن λ طول موج ورودی است. از طرفی با توجه به پارامترهای ژئومکانیکی محیط سرعت موج فشاری از رابطه زیر بدست می‌آید.

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

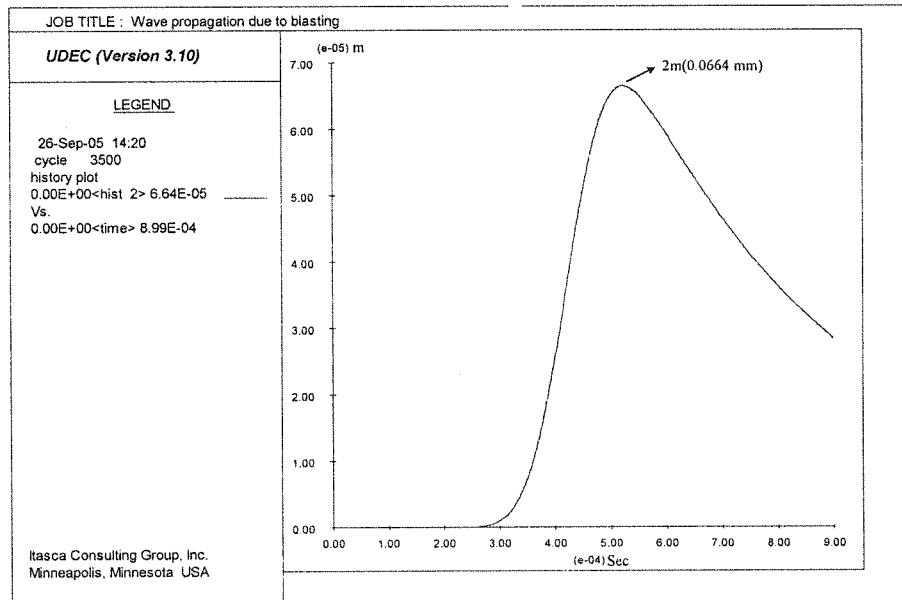
با قراردادن خصوصیات الاستیک محیط در (۳) سرعت موج فشاری برابر 4792 m/s می‌شود. با توجه به اینکه فرکانس طبیعی مدل برابر 1000 Hz شده است، اندازه مش 16 cm انتخاب شد.

۲-۳- انتخاب مدل رفتاری

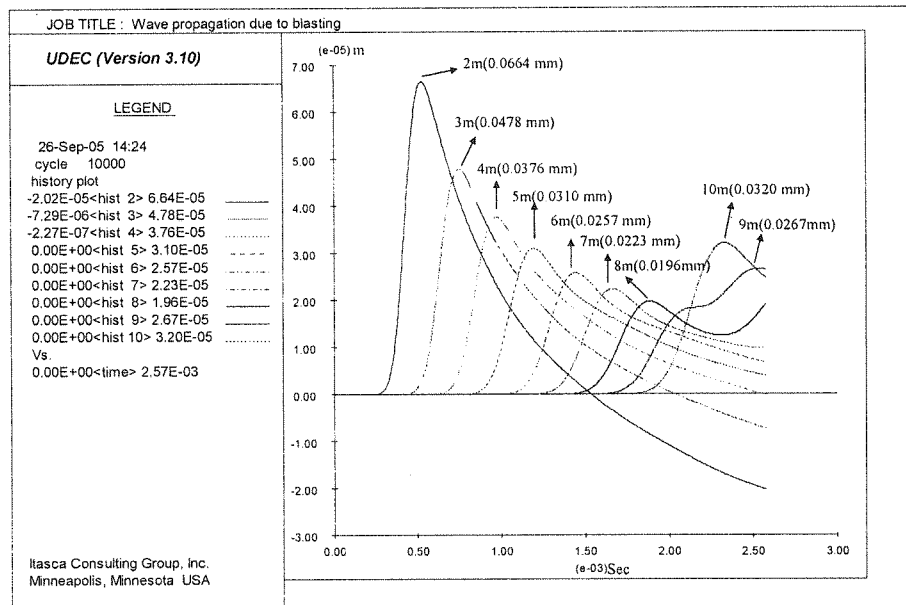
مدل رفتاری استفاده شده برای محدوده مورد مطالعه در این تحقیق، مدل موهر - کولمب^{۱۳} می‌باشد. این مدل دارای یک سطح تسلیم برشی^{۱۴} بوده که با پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی تعریف می‌شود. این پارامترها با استفاده از

از محل انفجار بطور نمائی کاهش یافته ولی حداکثر سرعت ذره در سطح آزاد افزایش یافته است. نحوه انتشار موج در اطراف چال انفجاری و توزیع سرعت ذره پس از گذشت زمان‌های ۲/۵۶۹، ۱/۷۹، ۱/۱۵۶، ۸۹۸، ۲۵۶، میلی‌ثانیه در توده سنگ گرانیت سوئدی در شکلهای (۶) تا (۱۰) آمده است. با انتشار جبهه موج در توده سنگ در برگیرنده منبع ایجاد اغتشاش و برخورد آن به سطح آزاد بدلیل تغییر امپدانس محیط، بخشی از

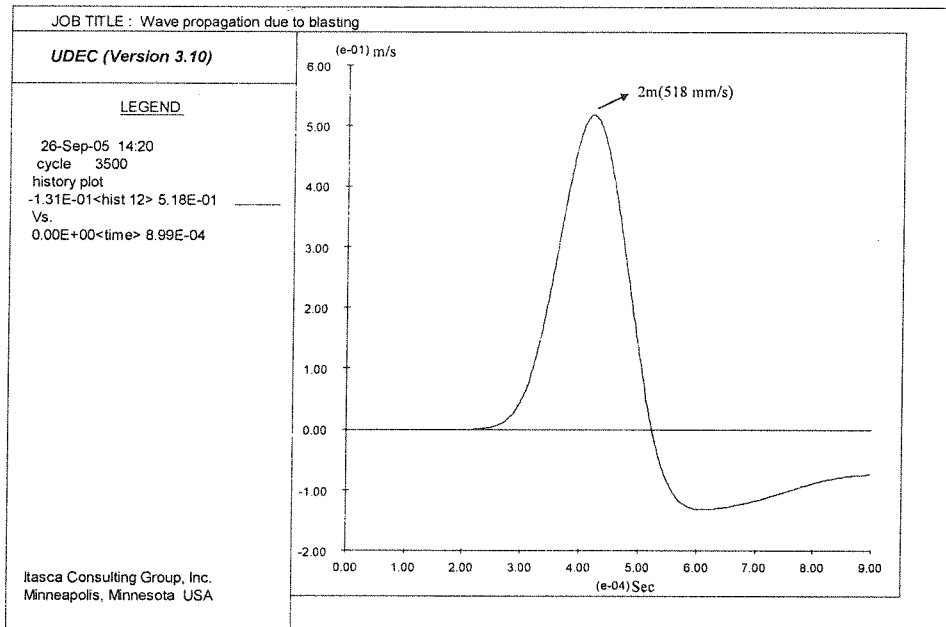
انرژی موج در سطح آزاد جذب شده و بخشی منعکس می‌شود. با توجه به شکلهای (۱۰) و (۱۱) در اثر برخورد جبهه موج فشاری به سطح آزاد و انعکاس موج از این سطح، تنش‌های فشاری به تنش‌های کششی تبدیل می‌شود. سرعت انتشار موج فشاری در مدل برابر ۴۹۰۹ متر بر ثانیه برآورد شده که بسیار نزدیک به سرعت انتشار موج در توده سنگ گرانیتی شبیه‌سازی شده است.



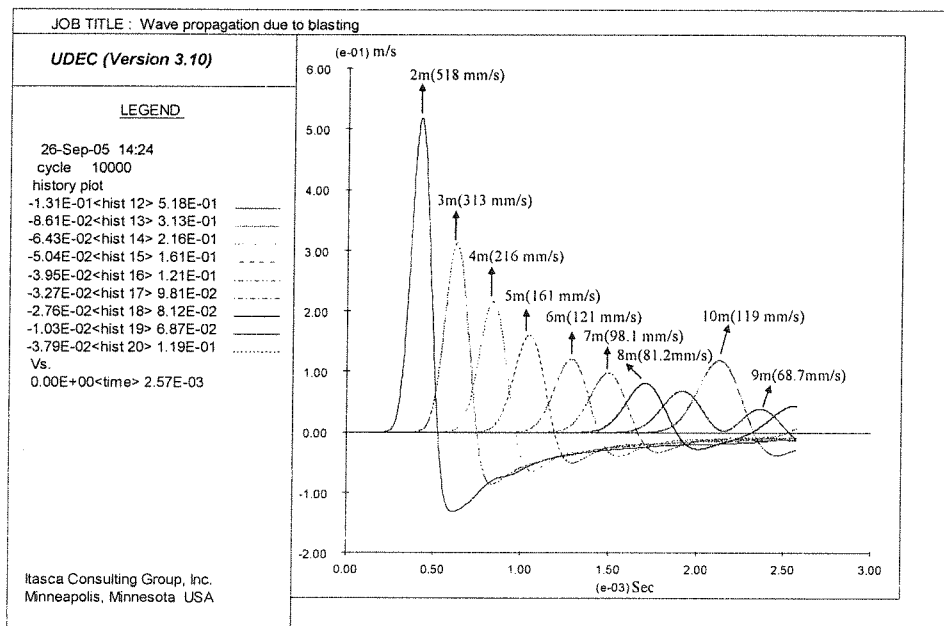
شکل (۲): نمودار تغییرات حداکثر جابجائی افقی ذره در فاصله ۲ متری از محل انفجار در زمان ۸۹۸ میلی‌ثانیه.



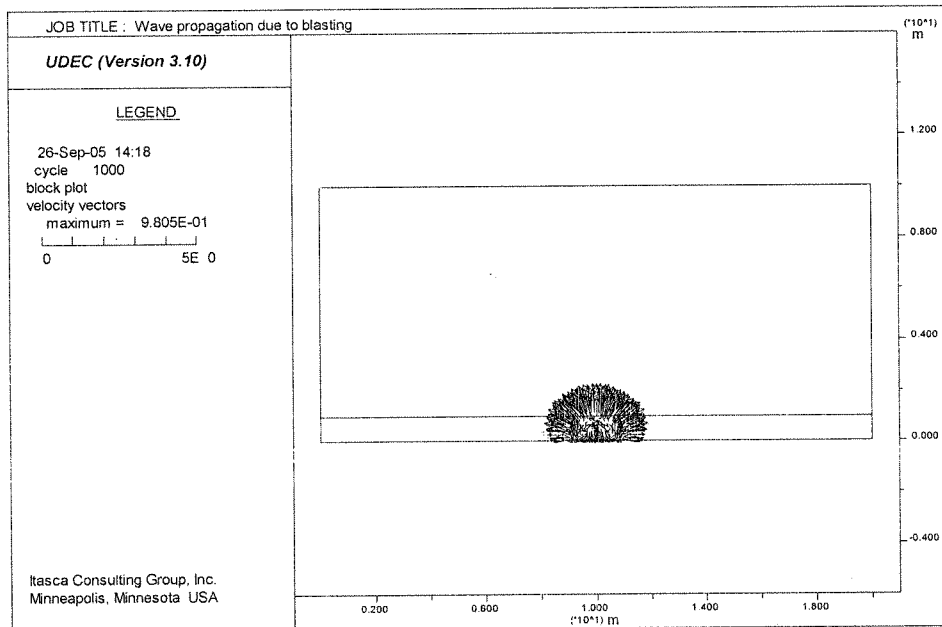
شکل (۳): نمودار تغییرات حداکثر جابجائی افقی ذره در فاصله ۲ تا ۱۰ متری از محل انفجار در زمان ۲/۵۶۹ میلی‌ثانیه.



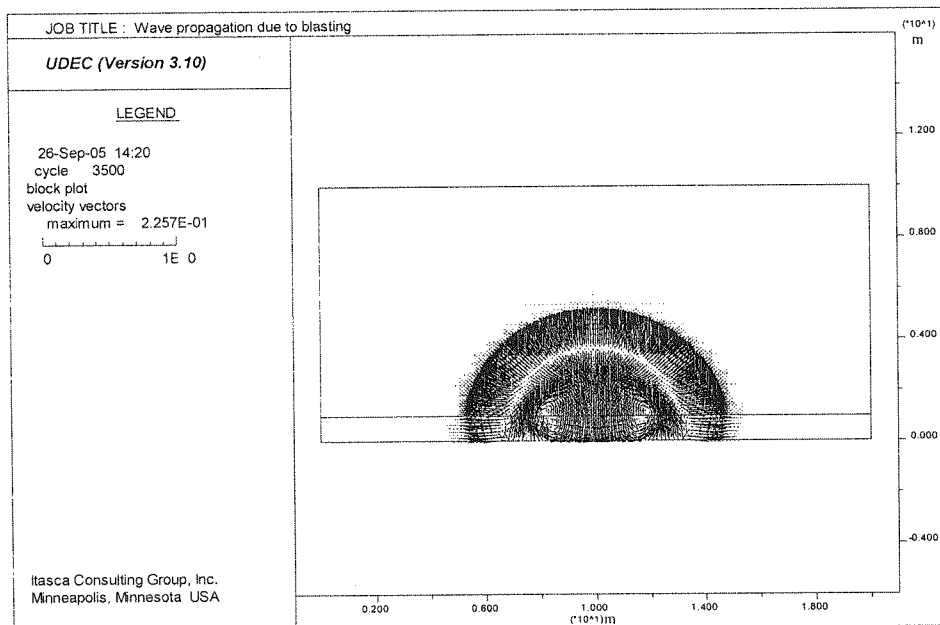
شکل (۴): نمودار تغییرات حداکثر سرعت زره در فاصله ۲ متری از محل انفجار در زمان ۸۹۸/ میلی ثانیه.



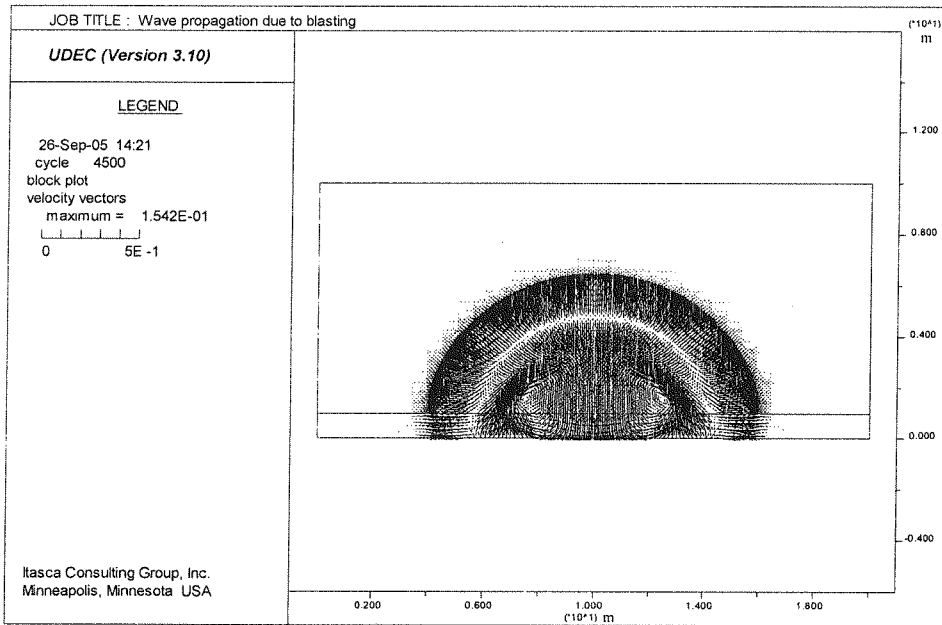
شکل (۵): نمودار تغییرات حداکثر سرعت زره در فاصله ۲ تا ۱۰ متری از محل انفجار در زمان ۵۶۹/۲ میلی ثانیه.



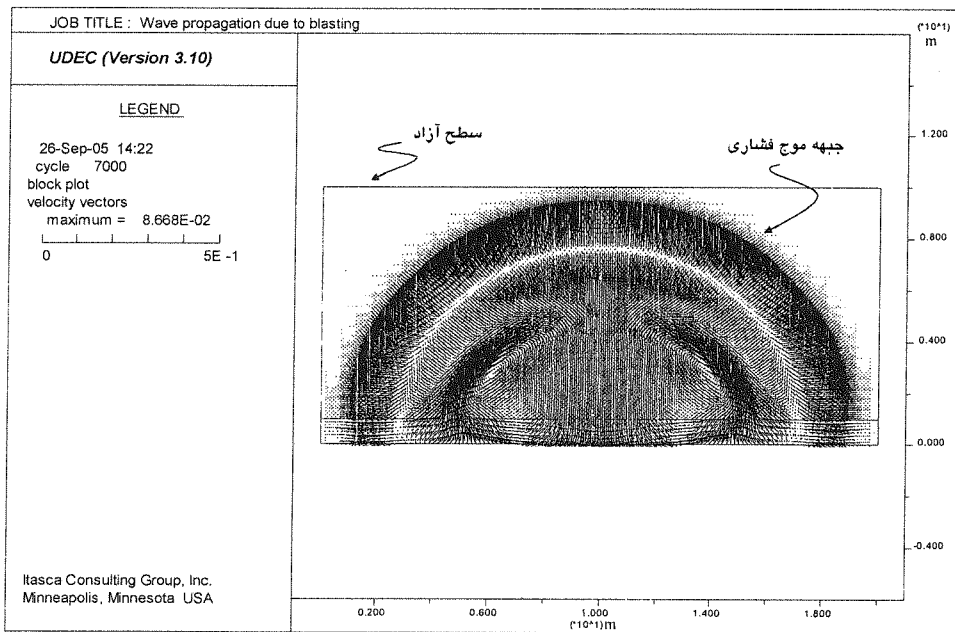
شکل (۶): توزیع بردار حداکثر سرعت ذره در اطراف چال انفجاری در زمان ۰/۲۵۶ میلی ثانیه.



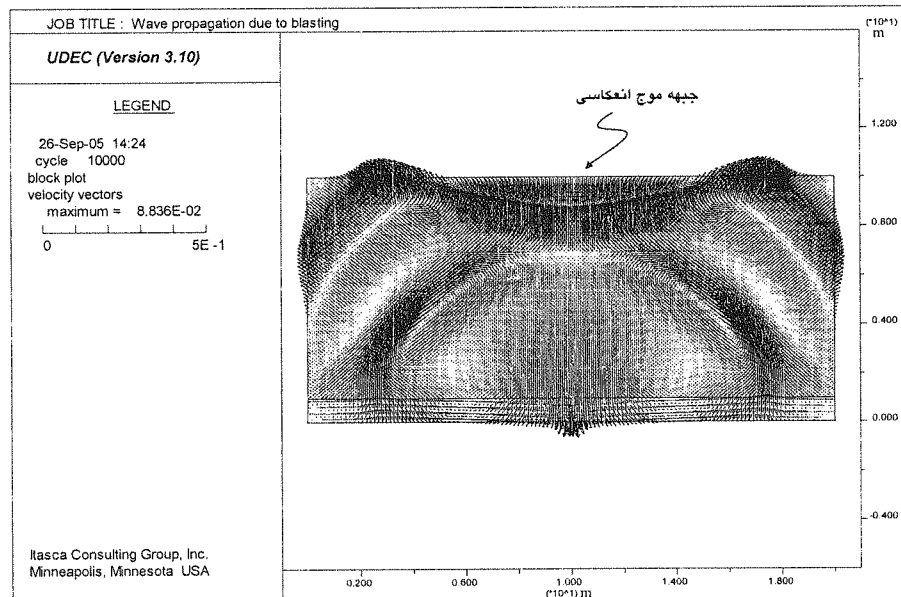
شکل (۷): توزیع بردار حداکثر سرعت ذره در اطراف چال انفجاری در زمان ۰/۸۹۸ میلی ثانیه.



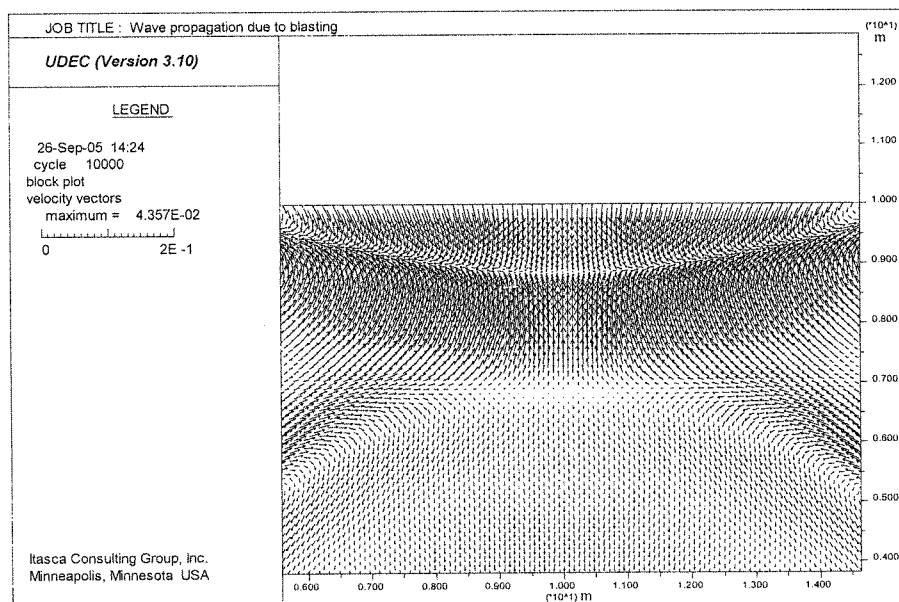
شکل (۸): توزیع بردار حداکثر سرعت ذره در اطراف چال انفجاری در زمان ۱/۱۵۶ میلی ثانیه.



شکل (۹): توزیع بردار حداکثر سرعت ذره در اطراف چال انفجاری در زمان ۱/۷۹ میلی ثانیه.



شکل (۱۰): برخورد موج به سطح آزاد و توزیع بردار حداکثر سرعت ذره در سطح آزاد در زمان ۲/۵۶۹ میلی ثانیه.



شکل (۱۱): بزرگنمایی برخورد موج و انعکاس آن از سطح آزاد در زمان ۲/۵۶۹ میلی ثانیه.

مگاپاسکال بوده است. شکل (۱۳) تغییرات تنش فشاری اعمال شده در مدل برای فواصل ۲ تا ۱۰ متری از مرکز چال انفجاری را نشان می دهد. همانطور که در این شکل ملاحظه می شود تنش فشاری ایجاد شده در اثر عبور جبهه موج، تغییر شکل های الاستیک و پلاستیک را بوجود می آورد. در فواصل نزدیک به محل انفجار بخش قابل توجهی از انرژی موج فشاری بواسطه بروز تغییر شکل پلاستیک جذب می شود. بنابراین در محدوده مذکور اختلاف قابل توجهی

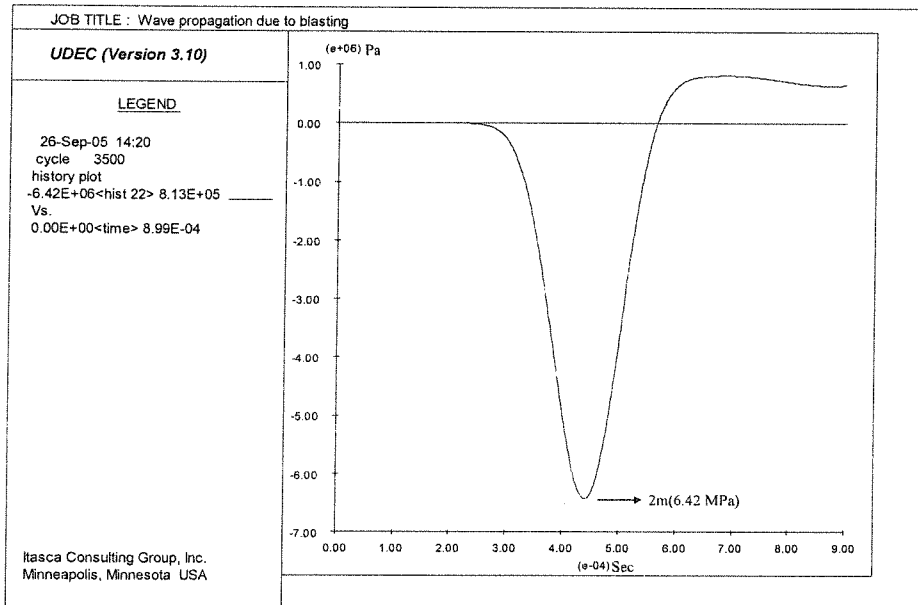
۳-۴- تغییرات تنش های اعمالی در مدل بر اثر عبور

جبهه موج نسبت به فاصله از محل انفجار

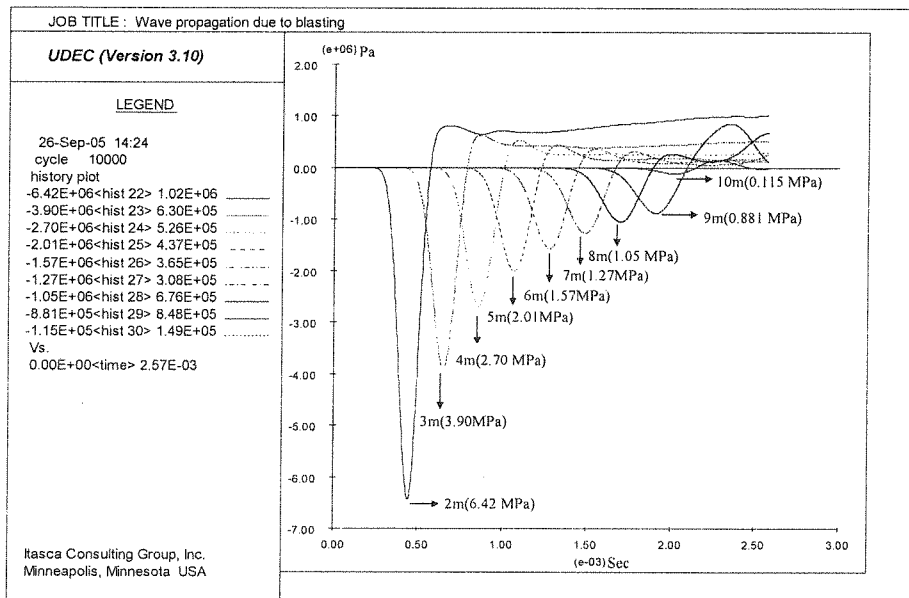
شکل (۱۲) تغییرات تنش فشاری اعمال شده در فاصله ۲ متری از محل چال انفجاری را نشان می دهد. همانطور که در شکل دیده می شود مقدار حداکثر تنش فشاری در این فاصله با گذشت زمان ۰/۸۹۸ میلی ثانیه به ۶/۴۲ مگاپاسکال کاهش یافته در حالیکه مقدار فشار اولیه وارد بر دیواره چال ۱۸۶۰

تنش کششی تولید شده روی سطح آزاد که در فاصله ۱۰ متری از محل انفجار قرار دارد ۱۴۹ کیلو پاسکال است. همانطور که ملاحظه می‌شود مقدار تنش کششی ایجاد شده در سطح آزاد کمتر از مقاومت کششی توده سنگ است؛ به همین دلیل پدیده شکست و یا پوسته شدن روی سطح آزاد اتفاق نمی‌افتد.

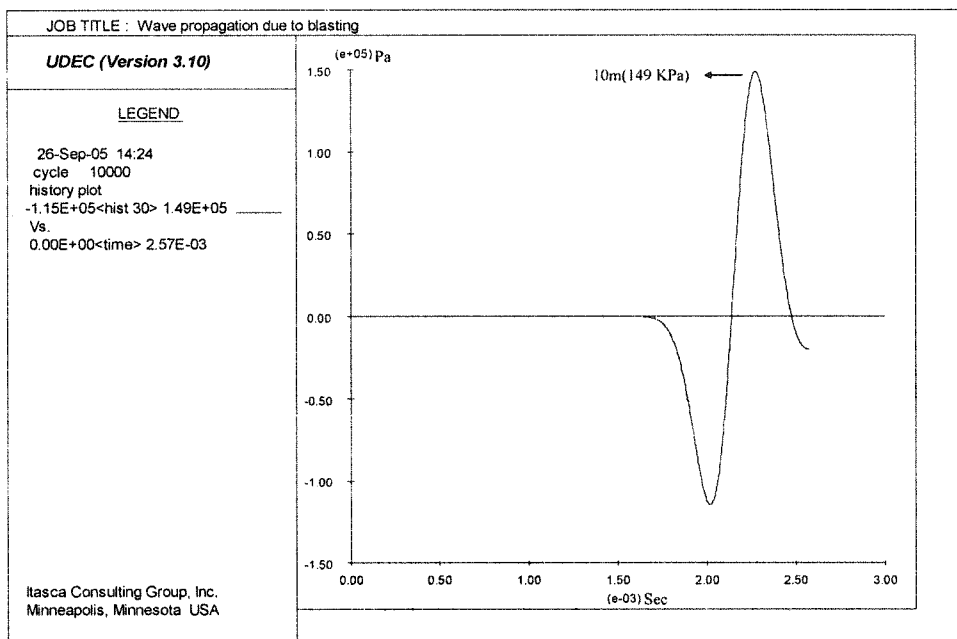
بین مقادیر مطلق حداکثر تنش فشاری و کششی مشاهده می‌شود. اما با افزایش فاصله از محل انفجار بدلیل کاهش انرژی موج فشاری، تغییر شکل محیط در محدوده الاستیک باقی مانده و اندازه مطلق حداکثر تنش‌های فشاری و کششی تقریباً برابر می‌شوند. در شکل (۱۴) نیز نمودار تغییر تنش فشاری به کششی در سطح آزاد نشان داده شده است. مقدار



شکل (۱۲): نمودار تغییرات تنش فشاری در فاصله ۲ متری از محل انفجار در زمان ۸۹۸/ میلی ثانیه.



شکل (۱۳): نمودار تغییرات تنش فشاری در فاصله ۲ تا ۱۰ متری از محل انفجار در زمان ۲/۵۶۹ میلی ثانیه.

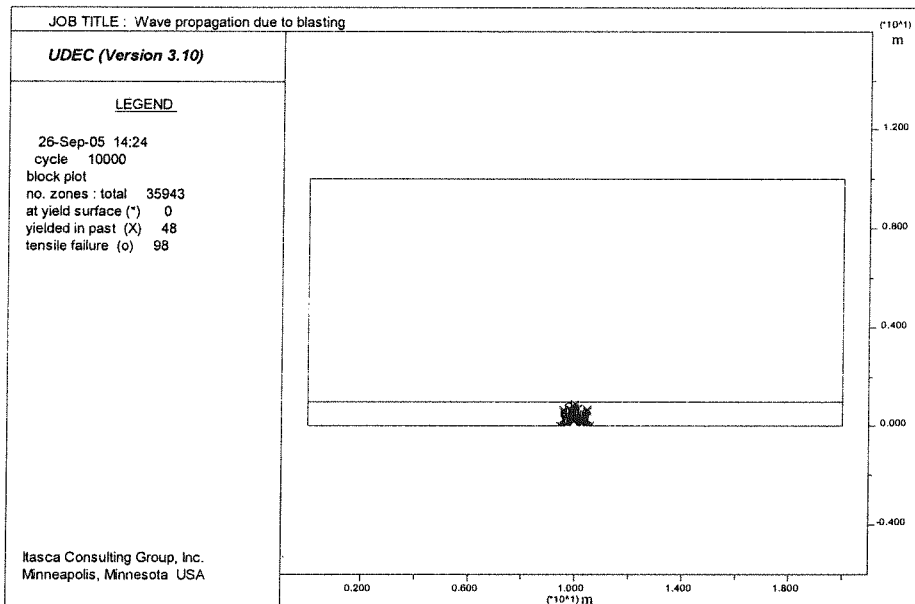


شکل (۱۴): نمودار تغییر تنش فشاری به تنش کششی در سطح آزاد در زمان ۲/۵۶۵ میلی ثانیه.

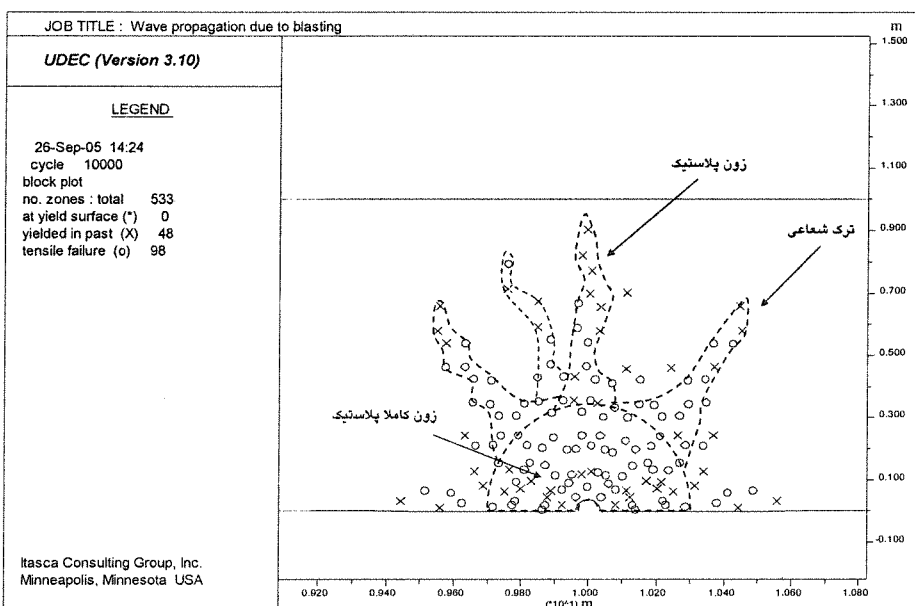
۴-۴- تغییرات محدوده زون پلاستیک

در مرحله اولیه فرآیند انفجار که بارگذاری توسط موج ضربه انجام می‌شود مقدار تنش ناشی از جبهه موج فشاری بیش از مقاومت کششی دینامیکی توده سنگ برده و موجب تخریب سنگ در مقیاس میکروسکوپی می‌شود و زون ایجادشده، زون کاملاً پلاستیک یا زون کاملاً خردشده است [۱۰]. محدوده زون پلاستیک ناشی از انتشار موج حاصل از انفجار پس از گذشت زمان ۲/۵۶۹ میلی ثانیه در شکل (۱۵) نشان داده شده‌است که حاوی ۴ ترک شعاعی و متوسط زاویه بین ترکهای شعاعی ۴۵ درجه است. بزرگنمایی محدوده زون پلاستیک اطراف چال انفجاری در شکل (۱۶) آمده‌است. طبق نظریه دوال و اتکیسون^{۲۵} در توده سنگهای

سخت، محدوده زون کاملاً پلاستیک ۲ تا ۴ برابر قطر چال است [۱۲]. همانطور که از این شکل دیده می‌شود محدوده زون کاملاً پلاستیک در توده سنگ گرانیب شبیه‌سازی شده برابر ۳۰ سانتی‌متر و محدوده ترکهای توسعه یافته از این زون برابر ۶۲ سانتی‌متر و نزدیک به معیار تجربی دوال و اتکیسون است. در ضمن انتشار شعاعی ترکها از زون کاملاً خردشده در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود. بر اساس قاعده سرانگشتی محدوده زون پلاستیک ۱۵ تا ۲۰ برابر شعاع چال برآورد می‌شود [۱۰]. این مقدار با استفاده از روش عددی ۲۳ برابر شعاع چال برآوردشده که نزدیک به معیار تجربی فوق است.



شکل (۱۵): محدوده زون پلاستیک اطراف چال انفجاری در زمان ۲/۵۶۹ میلی ثانیه.



شکل (۱۶): بزرگنمایی محدوده زون پلاستیک اطراف چال انفجار در زمان ۲/۵۶۹ میلی ثانیه.

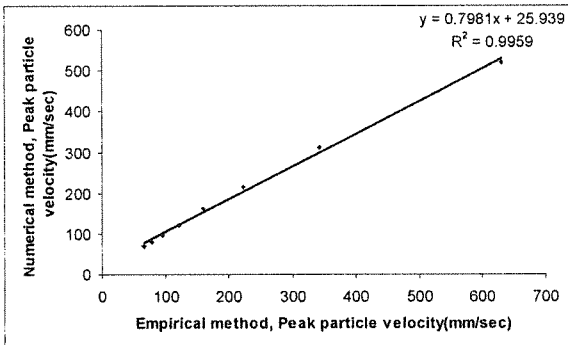
انرژی منتقل شده به توده سنگ است. در این رابطه شدت ارتعاشات به فاصله نقطه اندازه‌گیری تا محل انفجار و مقدار وزن ماده منفجره مصرفی بستگی دارد. بر اساس اندازه‌گیری‌های حاصل از انفجار در توده‌سنگ‌های گرانیتی سوئدی رابطه حداکثر سرعت ذرات بصورت معادله زیر پیش‌بینی شده است [۱۲].

$$PPV = K \times W^a \times d^b \quad (۴)$$

۵- مقایسه نتایج حاصل از روش عددی و روش تجربی

نتایج تحلیل عددی انتشار امواج حاصل از انفجار با رابطه تجربی حداکثر سرعت ذره در توده سنگ گرانیت سوئدی مقایسه شده است. حداکثر سرعت ذرات مهمترین معیار برای ارزیابی و پیش‌بینی میزان خسارت ناشی از لرزش و میزان

که در آن w حداکثر وزن ماده منفجره مصرفی به ازای هر تأخیر برحسب کیلوگرم و d فاصله نقطه اندازه‌گیری تا مرکز انفجار بر حسب متر است. مقادیر b, a, k ثابت‌های تجربی منطقه یا توده‌سنگ بوده که با انجام آزمایش‌ها و تحلیل رگرسیونی بدست می‌آید. برای این توده‌سنگ مقادیر فوق‌بترتیب $0.7, 0.700$ و $-1/5$ است [۱۲]. مقادیر حداکثر سرعت ذرات برای فواصل ۲ تا ۱۰ متر از محل انفجار و برای $2/8$ کیلوگرم ماده منفجره آنفو برای روش‌های عددی و تحلیلی در جدول (۳) و منحنی تغییرات حداکثر سرعت ذرات به ازای فاصله از محل انفجار برای روش عددی و تجربی در شکل (۱۷) آورده شده‌است.

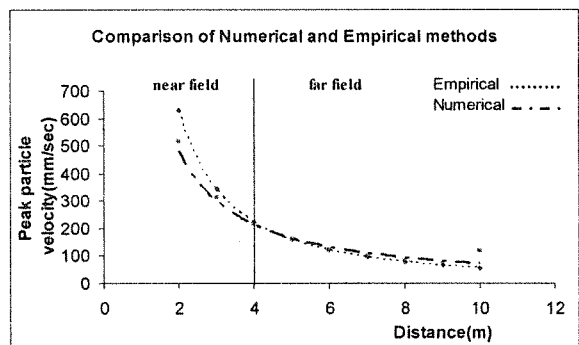


شکل (۱۸): همبستگی نتایج حاصل از تغییرات حداکثر سرعت ذرات ناشی از محل انفجار به روش تجربی و عددی.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله مکانیزم انتشار امواج حاصله از انفجار در یک توده سنگ با استفاده از روش عددی المان‌های مجزا و با کاربرد نرم افزار UDEC مدلسازی شده و نتایج بدست آمده ابتدا با قوانین انتشار موج و تفکرات موجود در این زمینه به ویژه انعکاس موج از سطح آزاد و تبدیل تنش فشاری به تنش کششی تطبیق داده شده‌است و در ادامه شکل و وسعت محدوده پلاستیک و انتشار ترک در اطراف آن و نیز چگونگی تشکیل و انتشار جبهه موج فشاری بررسی شده‌است. نتایج حاصله به شرح زیر می‌باشد:

- ۱- با افزایش فاصله از محل انفجار مقادیر حداکثر سرعت ذرات (PPV) بطور نمائی کاهش می‌یابد.
- ۲- برای فواصل نزدیک به محل انفجار، روش تجربی مقادیر حداکثر سرعت ذرات را نسبت به روش عددی بیشتر نشان می‌دهد. در حالیکه با افزایش فاصله از محل انفجار، مقادیر حداکثر سرعت ذرات پیش‌بینی شده توسط روش‌های عددی و تجربی بهم نزدیک می‌شود.
- ۳- محدوده زون پلاستیک در توده سنگ گرانیته شبیه‌سازی شده نزدیک یک متر است. محدوده زون کاملاً پلاستیک برابر



شکل (۱۷): مقایسه منحنی تغییرات حداکثر سرعت ذرات به ازای فاصله از محل انفجار به روش تجربی و روش عددی

همانطور که از شکل (۱۷) و جدول (۳) ملاحظه می‌شود برای فواصل نزدیک به محل انفجار (فواصل ۲ تا ۴ متر) مقادیر حداکثر سرعت ذره‌ای پیش‌بینی شده توسط روش‌های تجربی بیشتر از روش‌های عددی است. یکی از دلایل آن نزدیک بودن به محدوده زون پلاستیک و اثرات این زون بر نتایج تجربی است. در محدوده پلاستیک تمرکز تنش ناشی از انفجار بسیار بالا و زمان دوام لرزش بسیار پایین است. از آنجائیکه شرایط محیطی در روش‌های تجربی و عددی برای نقاط مذکور یکسان نیست، انتظار می‌رود نتایج حاصل از دو روش در این محدوده تا اندازه‌ای با هم اختلاف داشته باشند. با افزایش فاصله از محل انفجار (فواصل دور) اختلاف نتایج عددی و تجربی کمتر شده و مقادیر حداکثر سرعت ذره‌ای پیش‌بینی شده توسط روش‌های عددی و تجربی بهم نزدیک می‌شوند. در مدل عددی محیط بصورت ایزوتروپ و همگن در نظر گرفته شده‌است. در حالیکه رابطه تجربی فوق که با در نظر گرفتن خصوصیات واقعی توده‌سنگ به ویژه مشخصات مربوط به ناپیوستگی‌ها و آنیزوتروپی توده‌سنگ

۳۰ سانتی‌متر و محدوده ترکهای توسعه‌یافته از اطراف این زون برابر ۶۲ سانتی‌متر است.

۴- سرعت انتشار موج فشاری در مدل برابر ۴۹۰۹ متر بر ثانیه محاسبه شده‌است که بسیار نزدیک به سرعت انتشار موج در توده سنگ گرانیتی شبیه‌سازی شده‌است.

۵- با انتشار موج فشاری شبیه‌سازی شده در مدل و برخورد به سطح آزاد تنش فشاری به تنش کششی تبدیل می‌شود و مقدار تنش کششی ایجادشده در سطح آزاد برابر

۱۴۹ کیلوپاسکال برآورد گردیده‌است که کمتر از مقاومت کششی توده سنگ مورد نظر بوده لذا پدیده شکست و پوسته شدن اتفاق نیفتاده‌است.

۶- ضریب همبستگی نتایج حداکثر سرعت ذرات حاصل از روش تجربی و روش عددی مناسب و برابر ۰/۹۹۵ برآورد شده‌است.

جدول (۳): مقادیر حداکثر سرعت ذرات حاصل از روش‌های عددی و تجربی برای ۳/۸ کیلوگرم ماده منفجره آنفو.

ردیف	فاصله از محل انفجار (m)	حداکثر سرعت ذرات (mm/sec)	روش عددی	روش تجربی
۱	۲	۶۳۰	۵۱۸	۶۳۰
۲	۳	۳۴۳	۳۱۳	۳۴۳
۳	۴	۲۲۳	۲۱۶	۲۲۳
۴	۵	۱۵۹	۱۶۱	۱۵۹
۵	۶	۱۲۱	۱۲۱	۱۲۱
۶	۷	۹۶	۹۸/۱	۹۶
۷	۸	۷۸	۸۱/۲	۷۸
۸	۹	۶۶	۶۸/۷	۶۶
۹	۱۰	۵۶	۱۱۹	۵۶

Approach", Rock Mech. Rock Engng., Springer-Verlag, p.p. 95-108, 2002.

Hustrulid W.; *Blasting principles for open pit mining*, A.A. Balkema Rotterdam Brookfield, p.p. 416-443, 1999. [10]

Itasca Consulting Group, Inc.; *Universal Distinct Element Code*, Version 3.01, Minneapolis, Minnesota, 2000. [11]

Jimeno C. L.; Jimeno, E. L.; *Drilling and blasting of rocks*, A.A Balkema Rotterdam, p.p. 335-365, 1995. [12]

Konya C. J.; Walter, E. J.; *Rock blasting*, p.p. 200-240, 1985. [13]

Kuhlemeyer R. L.; Lysmer, J.; "Finite element accuracy for wave propagation problems", J. Soil Mech. & Foundations, Div ASCE, 99(SM5), p.p. 421- 427, 1973. [14]

Langfors U.; Kihlstrom, B.; *The modern technique of rock blasting*, 1978. [15]

Lindqvist P. A.; et al.; "Mechanical rock fragmentation", Results from rock indentation tests during a doctoral course, University of Lulea, 1981. [16]

Liu Q.; Tidman, P.; "Estimation of the dynamic pressure around a fully loaded blasthole", <http://www.nrcan.gc.ca>, CANMET/MRL Experimental Mine, 1995. [17]

Roy P. P.; "Characteristics of ground vibration and structure response to surface and underground blasting", Geotechnical and Geological Engineering, p.p. 151-167, 1998. [18]

Simha K. R. Y.; Holloway, D. C.; Fournay, W. L.; "Pre-Splitting and stress waves: A dynamic photoelastic evaluation", Issues in Rock Mechanics 23rd Symposium on Rock Mechanics, Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, p.p. 523-530, 1982. [19]

Uenishi K.; Rossmannith, H. P.; "The relation between stress and particle velocity for rayleigh pulses", Acta Mechanica, Vol. 3-4, No. 131, pp. 247-253, 1998. [20]

۷- مراجع

Brady B. T.; "The effect of mechanical anisotropy on the transmission of low-amplitudes stress waves in brittle rock", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Pergamon Press, Vol. 6, p.p. 439-452, 1969. [۱]

Cai J. G.; Zhao, J.; "Effects of multiple parallel fractures on apparent attenuation of stress waves in rock masses", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Pergamon Press, Vol. 37, p.p. 661-682, 2000. [۲]

Chen S. G.; Zhao, J.; "A study of UDEC modeling for blast wave propagation in jointed rock masses", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Elsevier Science Ltd., Vol. 35, No. 1, p.p. 93-99, 1998. [۳]

Dowding C. H.; *Blast vibration monitoring and control*, Prentice - Hall Inc., 1985. [۴]

Fournay W. L.; Dally, J. W.; Holloway, D. C.; "Stress wave propagation from inclined line charges near a bench face", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., Pergamon Press, Vol. 11, p.p. 393-401, 1974. [۵]

Fan j.; Gu, B.; Nihei, K. T.; Cook, N. G. W.; Myer, L. R.; "Experimental and numerical investigation of fracture interface waves", Rock Mechanics, Balkema Rotterdam, p.p. 845-851, 1996. [۶]

Ghosh A.; Deamen, J. K.; "A simple new blast vibration predictor-based on wave propagation laws", 24th US Symposium on Rock Mechanics, 1983. [۷]

Hao H.; Wu, C.; Zhou, Y.; "Numerical analysis of Blast-Induced stress waves in a rock mass with anisotropic continuum damage models Part 1: Equivalent Material Property Approach", Rock Mech. Rock Engng., Springer-Verlag, p.p. 79-94, 2002. [۸]

Hao H.; Wu, C.; Seah, C. C.; "Numerical analysis of Blast-Induced stress waves in a rock mass with anisotropic continuum damage models Part 2: Stochastic [۹]

- 1 Peak Particle Velocity
- 2 Langefors and Kihlstrom
- 3 Dowding
- 4 Ambraseys and Hendron
- 5 Scaled distance
- 6 Ghosh and Deamen
- 7 Roy
- 8 Fourney
- 9 Simha
- 10 Brady
- 11 Uenishi and Rossmannith
- 12 Fan
- 13 Cai and Zhao
- 14 Hao
- 15 Universal Distinct Element Code
- 16 Dynamic pressure
- 17 Ojeby granite
- 18 Ammonium Nitrate Fuel Oil
- 19 Liu and Tidman
- 20 Velocity of Detonation
- 21 Viscous
- 22 Kuhlemeyer and Lysmer
- 23 Mohr – Coulomb material model
- 24 Shear yield surface
- 25 Duvall and Atchison