

تحلیل عددی اثرات لایه بندی بر انتقال امواج حاصل از انفجار در محیط های سنگی

حسن بخشنده امنیه (استادیار)

دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان

عبدالرحیم جواهریان (استاد)

مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

کاظم نجم (دکتری)

شرکت خدمات مهندسی مکانیک سنگ یستون

در این تحقیق انتشار امواج حاصل از انفجار در یک توده سنگ گرانیت و اندرکنش امواج با لایه خاک توسط برنامه ریابانه یی UDEC شبیه سازی شده است. برای این منظور از موج ضربه یی ناشی از انفجار به صورت تابعی مثلثی با بیشینه دامنه یی ۱۶/۵ گیگا پاسکال و پهنای زمانی ۱/۰ تا ۸/۰ میلی ثانیه استفاده شد که این تابع به دیواره یی یک چال انفجاری به قطر ۲۰۰ میلی متر وارد شد. مقایسه یی نتایج تحلیل عددی در امتداد فصل مشترک سنگ-خاک با نتایج حاصل از اندازه گیری های صحرایی و رابطه یی تجربی دودینگ^۱ حاکی از مطابقت خوب مقادیر حاصل از روش عددی و اندازه گیری های صحرایی نشان می دهد.

bakhshandeh@kashanu.ac.ir
javaheri@ut.ac.ir
brmsirn@yahoo.co.uk

واژگان کلیدی: تحلیل عددی، انتشار امواج، انفجار، لایه بندی.

۱. مقدمه

از انفجار مواد منفجره در داخل یک توده سنگ، در مدت زمانی بسیار کوتاه انرژی قابل توجهی آزاد می شود. بخشی از انرژی ماده ی منفجره صرف خرد شدن توده سنگ می شود، و بخش زیادی از آن نیز به صورت امواج در درون توده سنگ در برگیرنده ی چال انفجاری منتشر می شود و ذرات محیط را به ارتعاش درمی آورد. بنابراین توده سنگ به عنوان محیط انتقال دهنده ی امواج، بارهای ضربه یی را به سازه های سنگی، سیستم های نگه دارنده، مناطق مسکونی و تأسیسات مجاور محل انفجار منتقل می کند.

انتشار امواج در درون زمین به ویژگی های کشسان محیط در برگیرنده و منبع ایجاد تنش وابسته است. در توده سنگ های ناهمگن^۲ امواج در تمام جهات منتشر می شوند و ذرات محیط را به ارتعاش درمی آورند. امواج حین انتشار در توده سنگ، به دلیل انعکاس و انتقال های متعدد موج و جذب انرژی در فصل مشترک سطوح تضعیف می شوند^۱. از نقطه نظر طراحی ژئومکانیکی، توده سنگ ها عمدتاً ناپیوسته و اغلب ناهمگن اند و خواص ناهمسانگرد^۳ دارند. طبیعت و توزیع عوارض ساختاری در داخل توده سنگ مانند لایه بندی ها، گسل ها و دسته درزه ها پاسخ توده سنگ را به بارگذاری های استاتیکی و دینامیکی تحت تأثیر قرار می دهد و در خلال انتشار موج از میان توده سنگ موجب تغییر پارامترهای موج -- مانند دامنه یی جابه جایی ذره، بیشینه سرعت ذره، بیشینه شتاب ذره و دوام موج، که از مهم ترین معیارهای پیش بینی میزان خسارت ناشی از انفجار به محیط هستند -- خواهد شد. هنگامی که موج به فصل مشترک دو محیط برخورد می کند، بر اثر تغییر خواص

فیزیکی و ژئومکانیکی و در نتیجه تغییر مقاومت لرزه یی دو محیط، بخشی از انرژی موج منتقل می شود و بخشی از آن نیز به محیط اولیه بازمی گردد. میزان انرژی منتقل شده به عوامل محیطی (نظیر خصوصیات مقاومتی سطح مشترک، زاویه ی برخورد و ویژگی های محیط واقع در دو طرف سطح مشترک) بستگی دارد^۱.

در این تحقیق با استفاده از روش اجزاء مجزای کلی^۴ (UDECE) که قابلیت تحلیل دینامیکی دارد، چگونگی انتشار و اثر امواج ضربه یی حاصل از انفجار یک چال به قطر ۲۰۰ میلی متر و فشار انفجار ۱۶/۵ گیگا پاسکال در محدوده یی با ابعاد ۱۵/۵ × ۶۰ متر در یک توده سنگ گرانیت و لایه خاک بررسی شده و مقدار شار انرژی ورودی، انعکاسی و انتقالی از فصل مشترک دو محیط نیز برآورد شده است. در این مدل عملکرد امواج حاصل از انفجار یک خرج انفجاری شامل تغییرات جابه جایی ذره، تغییرات سرعت ذره و انتشار جبهه یی موج ضربه یی ناشی از انفجار نسبت به زمان بررسی شده است.

۲. مطالعات میدانی بررسی انتشار امواج حاصل از

انفجار در توده سنگ گرانیتی و لایه خاک

در سال ۲۰۰۳ محققین در یک معدن سنگ گرانیت واقع در سنگاپور با نصب شتاب نگارهایی در نقاط مشخص شده در فصل مشترک سنگ-خاک و سطح خاک و با انجام یک سری آزمایش های صحرایی، اثر انتشار امواج حاصل از انفجار را بر فصل مشترک سنگ-خاک و بر روی سطح خاک، و نیز مقادیر بیشینه یی

روابط تجربی میرایی به ترتیب برای فصل مشترک سنگ-خاک و سطح خاک در حالت جفت‌شدگی کامل چنین محاسبه شد:

$$PPV = 4535.2 \left(\frac{R}{Q} \right)^{-1.84} \quad (1)$$

$$PPV = 3368.3 \left(\frac{R}{Q} \right)^{-1.91} \quad (2)$$

که در آن R فاصله‌ی نقطه‌ی اندازه‌گیری تا مرکز انفجار برحسب متر و Q وزن خرج تی‌ان‌تی معادل برحسب کیلوگرم، و PPV بیشترین سرعت ذره برحسب میلی‌متر بر ثانیه است.

روابط میرایی بیشترین سرعت ذره که طبق روابط ۱ و ۲ به دست آمده‌اند با روابط تجربی دودینگ مقایسه شده‌اند. در سال ۱۹۸۵ دودینگ رابطه‌ی تجربی ۳ را برای برآورد بیشترین سرعت ذره در منطقه‌ی همگن، و رابطه‌ی ۴ را برای برآورد بیشترین سرعت ذره در منطقه‌ی دولایه ارائه کرد [۲].

$$PPV = 18.3 \left(\frac{30.5}{R} \right)^{1.46} \left(\frac{Q}{4.54} \right)^{0.28} \left(\frac{2.4}{\rho} \right)^{0.28} \quad (3)$$

$$PPV = 1979.9 \frac{R_1 C_1 + R_2 C_2}{R_1 + R_2} \left(\frac{R_1 (\rho_1 C_1^2)^{\frac{1}{2}} + R_2 (\rho_2 C_2^2)^{\frac{1}{2}}}{Q} \right)^{-1.46} \quad (4)$$

که در آنها ρ چگالی توده سنگ، R_1 و R_2 فاصله‌ی نقطه‌ی اندازه‌گیری تا مرکز انفجار برمیانی سریع‌ترین مسیر حرکت موج در هر لایه، C_1 و C_2 سرعت‌های موج تراکم در هر دو لایه، و ρ_1 و ρ_2 چگالی‌های دولایه است.

با آزمایش‌های صحرایی کوچک مقیاس انجام شده در سنگاپور در محیط توده سنگ گرانیت و لایه خاک، روابط میرایی سرعت ذره‌ی بیشینه و شتاب ذره‌ی در سطح خاک و فصل مشترک سنگ-خاک محاسبه شدند. نتایج حاصل از انفجارهای انجام شده در سال ۲۰۰۳ نشان می‌دهند که بیشترین سرعت ذره‌ی برآورد شده با رابطه‌ی تجربی دودینگ، بالاخص برای فواصل مقیاس‌شده‌ی کوچک و داده‌های اندازه‌گیری‌شده‌ی صحرایی، تفاوت‌هایی دارند.

۳. تحلیل آزمایش‌های میدانی انجام شده به روش عددی

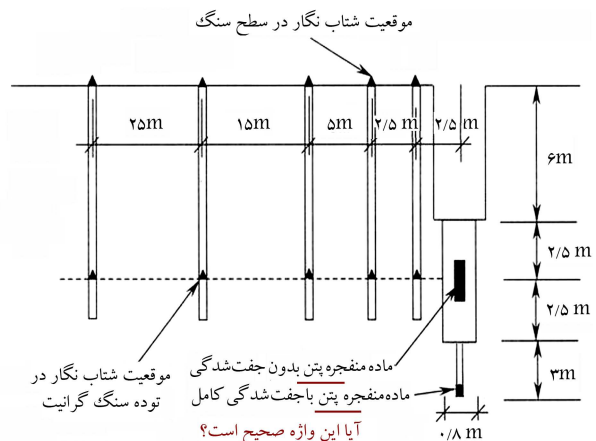
برای تحلیل عددی فرایند انفجار یک چال در توده سنگ گرانیت از روش اجزاء مجزای کلی استفاده شده است. این روش قابلیت شبیه‌سازی تمام فرایند انفجار را ندارد. به همین دلیل اطلاعات اولیه‌ی شرایط انفجار باید به روش‌های دیگر پیش‌بینی شوند [۵]. در این مدل از اطلاعات ورودی انفجار شامل تابع مثلثی با بیشینه دامنه‌ی ۱۶/۵ گیگاپاسکال و پهنای زمانی ۱/۰ تا ۸/۰ میلی‌ثانیه استفاده شد. بیشینه دامنه‌ی تابع مذکور از رابطه‌ی نیمه‌تجربی ۵ که در بخش بعدی به آن اشاره شده، به دست آمده است [۶]. فشار دینامیکی اعمال‌شده روی دیواره‌ی چال به صورت بار نرمال و به‌طور یکنواخت بر آن اعمال شده است.

۱.۳. شبیه‌سازی آزمایش انجام شده در توده سنگ گرانیت و لایه خاک

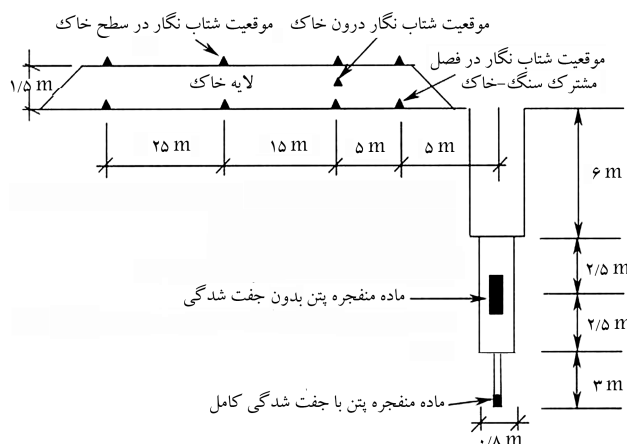
به‌منظور حل عددی مسئله‌ی آزمایش شده توسط وو، از یک نمونه توده سنگ گرانیت با پوششی از لایه خاک استفاده شده است. اطلاعات فیزیکی و ژئومکانیکی توده سنگ

شتاب ذره و سرعت ذره را ثبت کردند [۲]. بدین ترتیب آنها روابط میرایی بیشترین شتاب ذره و بیشترین سرعت ذره (به دست آمده از طریق آزمایش‌های صحرایی) را با روابط تجربی دودینگ مقایسه کردند. قبل از عملیات انفجار، یک لایه خاک رس به ضخامت ۱/۵ متر روی محدوده‌ی از سطح صاف معدن سنگ ساختمانی ریخته شده، و سپس لایه خاک متراکم و به‌طور صحیح ترازبندی شد تا چگالی و میزان رطوبت محتوای آن معادل خاک طبیعی شود. به‌طور کلی ۸ انفجار با ماده‌ی منفجره‌ی پتن و خرج تی‌ان‌تی معادل ۲/۵ تا ۵۰ کیلوگرم انجام شد. برای بررسی تأثیر جفت‌شدگی کامل، ماده‌ی منفجره در عمق ۱۵/۵ متری از سطح لایه خاک در چالی به قطر ۲۰۰ میلی‌متر به صورت خرج کروی جانمایی شد و شتاب‌نگارها نیز در فصل مشترک سنگ-خاک و سطح خاک به فواصل ۵، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ متری از مرکز چال انفجاری نصب شدند. جزئیات طرح در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است [۲].

داده‌های ثبت شده توسط شتاب‌نگارها حاکی از آن است که بیشترین سرعت ذره‌ی و بیشترین شتاب ذره‌ی حاصل از انفجار با جفت‌شدگی کامل بزرگ‌تر از مقادیر ثبت شده از انفجار با عدم جفت‌شدگی است. با استفاده از داده‌های ثبت شده،



شکل ۱. جزئیات طرح مورد استفاده در آزمایش صحرایی اثر انتشار امواج حاصل از انفجار روی فصل مشترک سنگ-خاک و سطح خاک معدن سنگ گرانیت واقع در سنگاپور [۲].



شکل ۲. مقطع قائم معدن سنگ گرانیت، لایه خاک، چال انفجاری و موقعیت ثبت دستگاه‌های شتاب‌نگار در محدوده‌ی آزمایش صحرایی واقع در سنگاپور [۲].

۲.۳. سازوکار انفجار فرض شده برای یک چال با خرج کروی

به‌طور کلی طی فرایند انفجار، محیط به‌طور تقریبی در دو مرحله بارگذاری می‌شود. در مرحله اول بارگذاری توسط موج ضربه انجام می‌شود، و در مرحله بعد انبساط گازهای حاصل از انفجار باعث بارگذاری مجدد محیط اطراف می‌شود. در این تحقیق بیشینه فشار دینامیکی اعمالی بر دیواره‌ی محفظه‌ی انفجار (فشار انفجار) با استفاده از رابطه‌ی ۵ محاسبه شده، که در آن ویژگی‌های توده‌سنگ و ماده‌ی منفجره برای محاسبه‌ی فشار انفجار به کار گرفته شده است [۶]:

$$P_m = 1.62 \times (\rho_e \times VOD^2) \times \left(\frac{\rho_p \times VP}{\rho_e \times VOD} \right)^{0.25} \quad (5)$$

در این رابطه ρ_e چگالی ماده‌ی منفجره (برحسب gr/cm^3)، VOD سرعت انفجار ماده‌ی منفجره (برحسب km/s)، ρ_p چگالی توده‌سنگ (برحسب gr/cm^3)، VP سرعت موج طولی (برحسب km/s) و P_m بیشینه فشار دینامیکی روی دیواره‌ی چال (برحسب $Kbar$) است.

خصوصیات توده‌سنگ، ماده‌ی منفجره و هندسه‌ی چال انفجار در جداول ۱ و ۳ ارائه شده است. با قراردادن مقادیر پارامترهای فوق در رابطه‌ی ۵ بیشینه فشار دینامیکی (فشار انفجار) برای توده‌سنگ گرانیتی مذکور به میزان 16.5 گیگاپاسکال محاسبه می‌شود. همچنین با توجه به سرعت زیاد سوختن ماده‌ی منفجره فرض شده است که پس از سوختن تمام ستون ماده‌ی منفجره بار حاصله به محیط اعمال می‌شود.

۳.۳. هندسه‌ی مدل و شرایط مرزی توده‌سنگ گرانیتی و لایه خاک

توده‌سنگ گرانیت همراه با لایه‌خاک مدل‌سازی شده برای تحلیل تأثیر لایه‌بندی بر انتشار امواج حاصل از انفجار در محدوده‌ی به‌طول 60 متر و به عمق 15.5 متر در نظر گرفته شده و خرج انفجاری پتن در چالی به قطر 200 میلی‌متر جانمایی شده است. فشار انفجار معادل 16.5 گیگاپاسکال برآورد شده و موج ضربه‌ی ناشی از انفجار به‌طور پویا به دیواره‌ی چال انفجار اعمال شده است.

ابعاد مدل با اعمال شرایط مرزی محدود شده است. شرایط مرزی گرانو برای مرزهای دو طرف مدل و مرز پائینی مدل اعمال شده است. همچنین برای جلوگیری از جابه‌جایی‌های برشی، مرزهای دو طرف مدل ثابت شده‌اند. برای بررسی اثر انعکاس از سطح آزاد، مرز بالایی مدل فاقد هرگونه محدودیتی است. در شکل ۳ هندسه‌ی مدل، شامل نحوه‌ی مش‌بندی، ابعاد مدل، موقعیت چال، ابعاد چال، موقعیت دستگاه‌های اندازه‌گیری و لایه‌بندی و شرایط مرزی -- نشان داده شده است.

در سال ۱۹۷۳ محققین نشان دادند که برای تحلیل درست و منطقی انتشار امواج به‌روش عددی، اندازه‌ی اجزاء استفاده‌شده برای مش‌بندی محیط (Δl) باید کوچک‌تر از 0.1 تا 0.125 طول موج منتشره در محیط باشد [۸].

$$\frac{\lambda}{10} \leq \Delta l \leq \frac{\lambda}{8} \quad (6)$$

در این رابطه λ طول موج ورودی است. سرعت موج تراکمی با توجه به پارامترهای فیزیکی و مکانیکی توده‌سنگ گرانیت از رابطه‌ی ۷ به دست می‌آید:

$$C_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4G}{3}}{\rho}} \quad (7)$$

که در آن K مدول حجمی، G مدول برشی، و ρ چگالی محیط است. با قراردادن خصوصیات کشسان محیط در رابطه‌ی ۷ اندازه‌ی سرعت موج تراکمی در توده‌سنگ

گرانیت و لایه‌خاک به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است. این گرانیت، سنگی سخت با بافت متراکم و بدون هوازده است و با توجه به نتایج آزمایشگاهی از کیفیت خوبی برخوردار است. برای مطالعه و بررسی تأثیر تناوب جنس توده‌سنگ، از یک چال کروی با جفت‌شدگی کامل که با ماده‌ی منفجره‌ی پتن خرج‌گذاری شده، استفاده شده است. با توجه به عدم دسترسی به مشخصات ماده‌ی منفجره‌ی استفاده‌شده در آزمایش‌های صحرایی، برای تحلیل عددی فرایند انفجار از خصوصیات ماده‌ی منفجره‌ی پتن با سرعت انفجار 7920 متر بر ثانیه استفاده شده است. همچنین انفجار در تمام طول خرج کروی به‌صورت همزمان فرض می‌شود. مشخصات چال و خرج مورد استفاده‌ی آن در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و ژئومکانیکی گرانیت سنگاپور [۳].

ردیف	خصوصیات گرانیت سنگاپور	نماد	مقدار	واحد
۱	چگالی سنگ	(ρ_r)	2.610	(gr/cm^3)
۲	مدول یانگ	(E_r)	73.9	(GPa)
۳	مقاومت فشاری تک محوری سنگ	(σ_c)	186	(MPa)
۴	نسبت پواسون	(ν)	0.16	-
۵	مدول حجمی	(K)	36.2	(GPa)
۶	مدول برشی	(G)	31.85	(GPa)
۷	مقاومت کششی	(σ_t)	16.1	(MPa)
۸	سرعت امواج طولی	(C_p)	5790	(m/s)
۹	چسبندگی	(C_o)	30	(MPa)
۱۰	زاویه اصطکاک داخلی	(ϕ)	60	$(Degree)$

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و ژئومکانیکی لایه خاک [۳].

ردیف	خصوصیات خاک رس	نماد	مقدار	واحد
۱	چگالی	(ρ_r)	1.950	(gr/cm^3)
۲	مدول یانگ	(E_r)	0.024	(GPa)
۳	مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ	(σ_c)	-	(MPa)
۴	نسبت پواسون	(ν)	0.35	-
۵	مدول حجمی	(K)	0.02667	(GPa)
۶	مدول برشی	(G)	0.00889	(GPa)
۷	مقاومت کششی	(σ_t)	-	(MPa)
۸	سرعت امواج طولی	(C_p)	880	(m/s)
۹	چسبندگی	(C_o)	0.007	(MPa)
۱۰	زاویه اصطکاک داخلی	(ϕ)	34	$(Degree)$

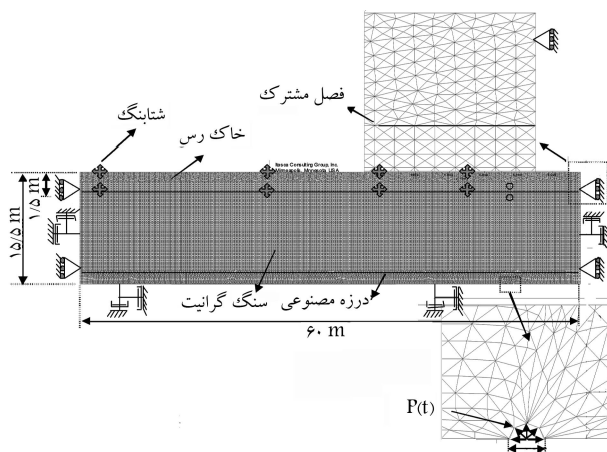
جدول ۳. خصوصیات ماده‌ی منفجره‌ی پتن و هندسه‌ی چال انفجاری [۷].

ردیف	خصوصیات	نماد	مقدار	واحد
۱	چگالی پتن	(ρ_e)	1.6	(gr/cm^3)
۲	سرعت انفجار پتن	(VOD)	7920	(m/s)
۳	شعاع چال کروی	(b)	100	(mm)

۲.۴. تغییرات بیشینه سرعت ذره‌یی بر اثر عبور جبهه‌ی موج از فصل مشترک و سطح خاک

تغییرات بیشینه سرعت ذره‌یی در بلوک انفجار مدل‌سازی شده در فواصل ۰/۵ متری قبل و بعد از فصل مشترک سنگ-خاک در راستای شعاعی، عمود بر فصل مشترک توده سنگ گرانیتی و لایه خاک از لحظه‌ی شروع انفجار (زمان صفر) تا زمان ۲۳ میلی‌ثانیه در شکل ۵ نشان داده شده است. با شروع انفجار، بیشینه سرعت ذره برای نقاط در نظر گرفته شده برای فواصل مذکور از ۴۶۴ میلی‌متر بر ثانیه به ۸۵/۸ میلی‌متر بر ثانیه کاهش یافته است.

شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب تغییرات مؤلفه‌های قائم و افقی بیشینه سرعت ذره‌یی از لحظه‌ی شروع انفجار (زمان صفر) تا ۲۳ میلی‌ثانیه در امتداد فصل مشترک سنگ-خاک و به فاصله‌های ۱۴/۹ متر، ۱۷/۲ متر، ۲۸/۶ متر و ۵۲ متری از مرکز چال انفجاری، و شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب تغییرات مؤلفه‌های قائم و افقی سرعت ذره‌یی بیشینه از لحظه‌ی شروع انفجار (زمان صفر) به ترتیب تا ۲۳ و ۳۵ میلی‌ثانیه در امتداد



شکل ۳. هندسه‌ی مدل فیزیکی شامل نحوه‌ی مش‌بندی، ابعاد مدل، موقعیت چال، ابعاد چال، وضعیت لایه بندی و شرایط مرزی و نقاط اندازه‌گیری [۹].

گرانیت 5490 m/s محاسبه و اندازه‌ی مش 25 cm انتخاب شده است. به منظور بالا بردن دقت محاسبات از درزه‌ی مصنوعی در فاصله‌ی ۲ متری مرکز چال انفجاری استفاده شده که افزایش یکنواختی توزیع مش در مدل شبیه‌سازی شده را در پی دارد.

۴.۳. انتخاب مدل رفتاری

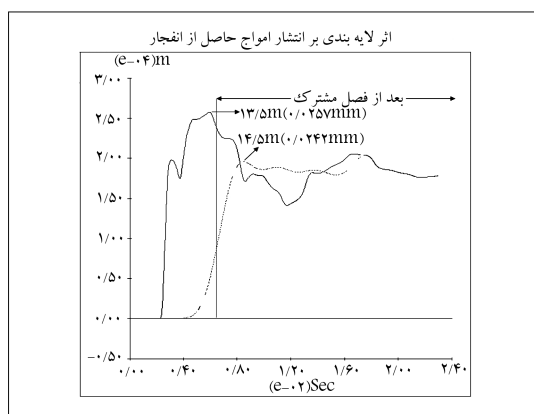
مدل موهر-کولمب^۵ که از جمله مدل‌های بیان‌گر رفتار خمیری^۶ برای مدل‌سازی توده‌های سنگی است در محدوده‌ی مدل‌سازی به کار گرفته شده است. این مدل دارای یک سطح تسلیم برشی^۷ است که با پارامترهای چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی تعریف می‌شود.

۴. نتایج حاصل از تحلیل عددی انفجار

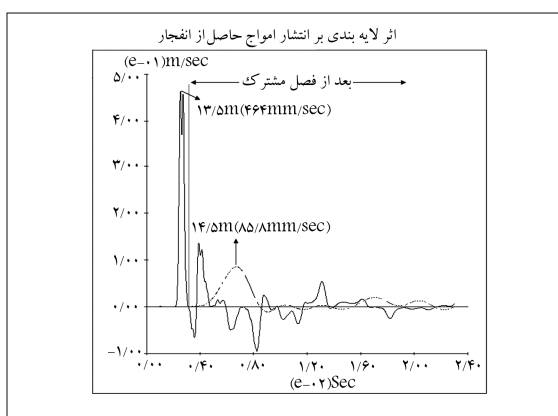
نتایج حاصله از اجرای روش اجزاء محدود با استفاده از مدل رفتاری موهر-کولمب مشتمل بر: تغییرات جابه‌جایی ذره بر اثر عبور جبهه‌ی موج تراکمی -- قبل و بعد از فصل مشترک -- در راستای شعاعی، تغییرات سرعت ذره‌یی بیشینه در امتداد فصل مشترک سنگ-خاک و سطح خاک، و نیز برآورد درصد انرژی انتقالی و انعکاسی از فصل مشترک سنگ-خاک است.

۱.۴. تغییرات جابه‌جایی ذره در راستای شعاعی بر اثر عبور جبهه‌ی موج از فصل مشترک

تغییرات بیشینه جابه‌جایی ذره در بلوک انفجاری مورد نظر در فواصل ۱۳/۵ و ۱۴/۵ متری از مرکز چال انفجاری در راستای شعاعی در توده سنگ گرانیت و لایه خاک از لحظه شروع انفجار (زمان صفر) تا زمان ۲۳ میلی‌ثانیه در شکل ۴ نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود جابه‌جایی ذره از ۲۵۷ میلی‌متر به ۲۴۲ میلی‌متر کاهش یافته است. همچنین شیب نمودار جابه‌جایی ذره نسبت به زمان برای نقطه‌ی بعد از فصل مشترک کم‌تر از شیب نمودار جابه‌جایی ذره نسبت به زمان برای نقطه‌ی قبل از فصل مشترک است.



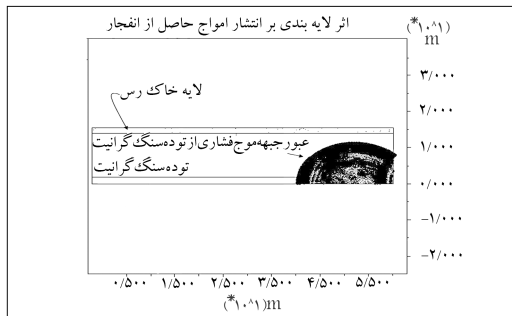
شکل ۴. تغییرات بیشینه جابه‌جایی ذره در راستای شعاعی عمود بر فصل مشترک سنگ-خاک از لحظه‌ی شروع انفجار (زمان صفر) تا زمان ۲۳ میلی‌ثانیه برای فواصل ۱۳/۵ تا ۱۴/۵ متری (قبل و بعد از فصل مشترک سنگ-خاک) از مرکز چال در حالت خمیری.



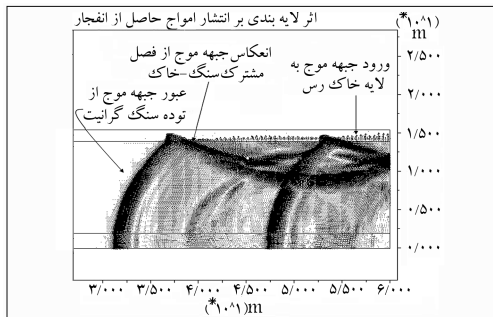
شکل ۵. تغییرات سرعت ذره‌یی حداکثر در راستای شعاعی عمود بر فصل مشترک سنگ - خاک از لحظه شروع انفجار (زمان صفر) تا زمان ۲۳ میلی‌ثانیه برای فواصل ۱۳/۵ تا ۱۴/۵ متری (قبل و بعد از فصل مشترک سنگ - خاک) از مرکز چال در حالت خمیری.

سطح خاک و به فاصله‌های ۱۶/۳ متر، ۱۸/۴۵ متر، ۲۹/۴۲ متر و ۵۲/۳۵ متری از مرکز چال انفجاری را نشان می‌دهد. توزیع بردار بیشینه سرعت ذره و نحوه‌ی انتشار جبهه‌ی موج تراکمی در اطراف چال انفجاری پس از گذشت ۱/۸۱۸ میلی‌ثانیه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. چنان‌که در شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود جبهه‌ی موج تراکمی پس از رسیدن به فصل مشترک سنگ-خاک در زمان ۳/۶۴۲ میلی‌ثانیه از لحظه‌ی انفجار بخش کمی از انرژی به لایه خاک منتقل شده و بخش زیادی به درون توده سنگ گرانیت بازتابیده است.

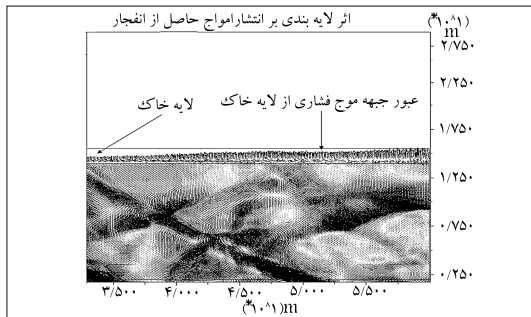
شکل ۱۲ بزرگ‌نمایی انتشار جبهه‌ی موج تراکمی به لایه‌ی خاک رس در زمان ۷/۲۹۱ میلی‌ثانیه را نشان می‌دهد. مقادیر مؤلفه‌های قائم و افقی بیشینه سرعت ذره‌ی حاصل از انفجار به ترتیب برای نقاط روی فصل مشترک سنگ-خاک و روی سطح خاک در جداول ۴ و ۵ نشان داده شده است.



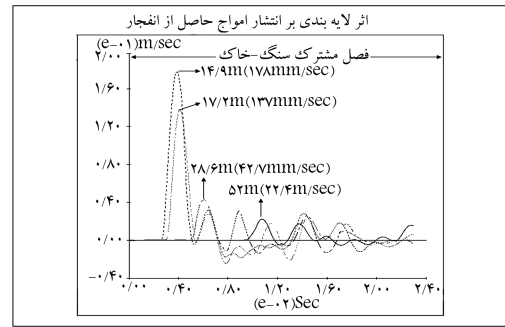
شکل ۱۰. انتشار جبهه موج تراکمی حاصل از انفجار در توده سنگ گرانیت در زمان ۱/۸۱۸ میلی‌ثانیه از انفجار.



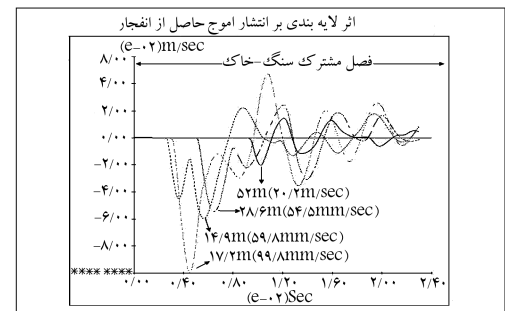
شکل ۱۱. وضعیت جبهه‌ی موج تراکمی به فصل مشترک سنگ - خاک در زمان ۳/۶۴۲ میلی‌ثانیه از انفجار.



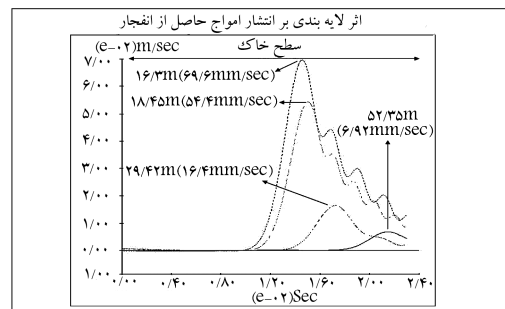
شکل ۱۲. بزرگ‌نمایی عبور جبهه‌ی موج تراکمی از لایه خاک در زمان ۷/۲۹۱ میلی‌ثانیه.



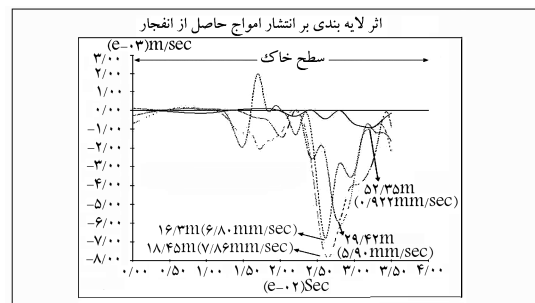
شکل ۶. تغییرات مؤلفه قائم بیشینه سرعت ذره در فصل مشترک سنگ - خاک از لحظه‌ی شروع انفجار (زمان صفر) تا زمان ۲۳ میلی‌ثانیه برای فاصله ۱۴/۹ تا ۵۲ متری مرکز چال انفجاری.



شکل ۷. تغییرات مؤلفه افقی بیشینه سرعت ذره در فصل مشترک سنگ - خاک از لحظه‌ی شروع انفجار (زمان صفر) تا زمان ۲۳ میلی‌ثانیه برای فاصله ۱۴/۹ تا ۵۲ متری مرکز چال انفجاری.



شکل ۸. تغییرات مؤلفه‌ی قائم سرعت ذره‌ی بیشینه در سطح خاک از لحظه‌ی شروع انفجار (زمان صفر) تا زمان ۲۳ میلی‌ثانیه برای فاصله ۱۶/۳ تا ۵۲/۳۵ متری مرکز چال انفجاری.



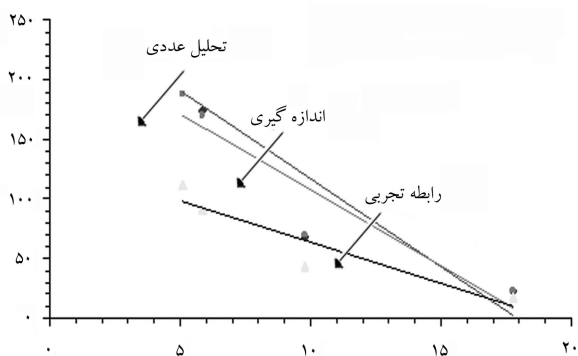
شکل ۹. تغییرات مؤلفه‌ی افقی سرعت ذره‌ی بیشینه در سطح خاک از لحظه‌ی شروع انفجار (زمان صفر) تا زمان ۳۵ میلی‌ثانیه برای فاصله ۱۶/۳ تا ۵۲/۳۵ متری مرکز چال انفجاری.

جدول ۴. مقادیر مؤلفه‌های قائم و افقی بیشینه سرعت ذره در فصل مشترک سنگ - خاک.

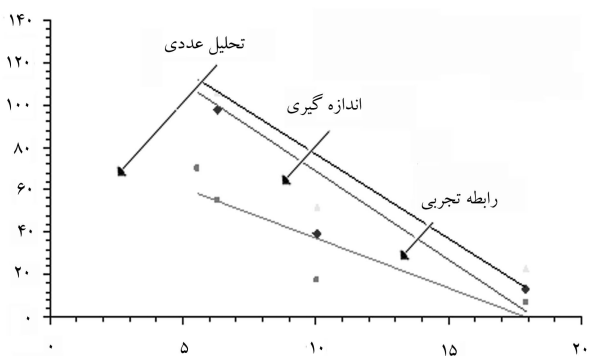
ردیف	فاصله‌ی شعاعی نقاط اندازه‌گیری تا محل انفجار (m)	مؤلفه‌ی قائم (mm/s)	مؤلفه‌ی افقی (mm/s)
۱	۱۴٫۹	۱۷۸	۵۹٫۸
۲	۱۷٫۲	۱۳۷	۹۹٫۸
۳	۲۸٫۶	۴۲٫۷	۵۴٫۴
۴	۵۲	۲۲٫۴	۷٫۹۸

جدول ۵. مقادیر مؤلفه‌های قائم و افقی بیشینه سرعت ذره در سطح خاک.

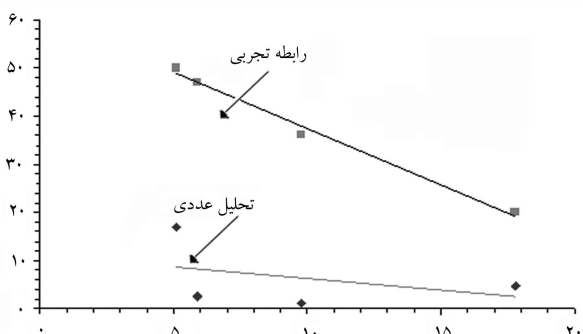
ردیف	فاصله‌ی شعاعی نقاط اندازه‌گیری تا محل انفجار (m)	مؤلفه‌ی قائم (mm/s)	مؤلفه‌ی افقی (mm/s)
۱	۱۶٫۳	۶۹٫۹	۶٫۸
۲	۱۸٫۴۵	۵۴٫۴	۷٫۸۶
۳	۲۹٫۴۲	۱۶٫۴	۵٫۹
۴	۵۲٫۳۵	۶٫۹۲	۰٫۹۲۲



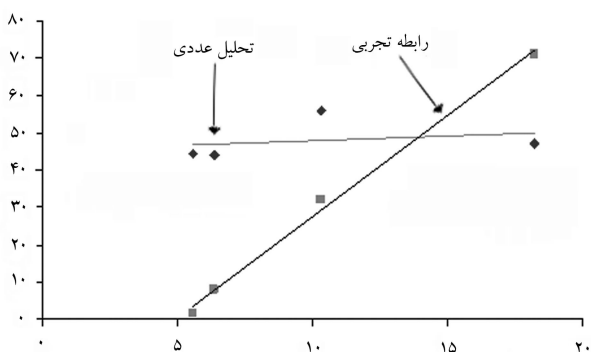
شکل ۱۳. رابطه‌ی مقادیر بیشینه سرعت ذره‌ی با فاصله‌ی مقیاس‌شده در فصل مشترک سنگ-خاک.



شکل ۱۴. رابطه‌ی مقادیر سرعت ذره‌ی بیشینه با فاصله‌ی مقیاس‌شده در سطح خاک.



شکل ۱۵. رابطه‌ی درصد اختلاف داده‌های صحرایی با روش عددی و دودینگ نسبت به فاصله‌ی مقیاس‌شده در امتداد فصل مشترک سنگ - خاک.



شکل ۱۶. رابطه‌ی درصد اختلاف داده‌های صحرایی با روش عددی و دودینگ نسبت به فاصله‌ی مقیاس‌شده در سطح لایه خاک.

۵. بحث

نتایج تحلیل عددی انتشار امواج حاصل از انفجار و اندرکنش آن با فصل مشترک سنگ - خاک و سطح خاک با نتایج به دست آمده از روش اندازه‌گیری‌های صحرایی و و همکاران (۲۰۰۳) و روابط تجربی دودینگ مقایسه شده است. در جداول ۶ و ۷ مقادیر بیشینه سرعت ذره‌ی حاصل از انفجار در امتداد فصل مشترک سنگ - خاک و سطح خاک حاصل از روش عددی با روش‌های اندازه‌گیری صحرایی و روابط تجربی دودینگ (رابطه‌های ۱ و ۲) ارائه شده است. چنان که در جدول ۶ ملاحظه می‌شود، در امتداد فصل مشترک توده سنگ گرانیت و لایه خاک درصد اختلاف نتایج تحلیل عددی ناشی از اندازه‌گیری‌های صحرایی، از ۱/۲ تا ۱۷ درصد به ترتیب برای فواصل ۱۴٫۹ متری تا ۵۲ متری از مرکز چال انفجاری تغییر می‌کند. این در حالی است که درصد اختلاف حاصل از روش تجربی دودینگ، از اندازه‌گیری‌های صحرایی از ۲۰ تا ۵۰ درصد برای فواصل مذکور و در امتداد فصل مشترک سنگ-خاک تغییر کرده است. بنابراین نتایج حاصل از تحلیل عددی نسبت به نتایج حاصل از رابطه‌ی تجربی دودینگ، به اندازه‌گیری‌های صحرایی نزدیک است.

همان‌طور که در جدول ۷ ملاحظه می‌شود در سطح خاک درصد اختلاف نتایج روش عددی از اندازه‌گیری‌های صحرایی از ۴۳٫۹ تا ۵۵٫۷ درصد به ترتیب برای فواصل ۱۴٫۹ متری تا ۵۲ متری از مرکز چال انفجاری تغییر می‌کند؛ درحالی که درصد اختلاف حاصل از روش تجربی دودینگ از اندازه‌گیری‌های صحرایی از ۱/۶ درصد تا ۷۱ درصد برای فواصل مذکور و در امتداد فصل مشترک خاک تغییر کرده است. علت این امر انتخاب مدل موهر-کولمب برای نمایش رفتار خمیری توده سنگ و لایه خاک است و از محدودیت‌های این روش در انتخاب مدل رفتاری مناسب برای توده‌ی خاکی است. این مدل برای نمایش رفتار خمیری لایه‌های خاکی مناسب نیست. همچنین شار انرژی ورودی، انتقالی و انعکاسی و درصد‌های انرژی انتقالی و انعکاسی در جدول ۸ بیان شده است.

جدول ۶. مقایسه مقادیر حداکثر سرعت ذره‌یی حاصل از روش عددی، اندازه‌گیری‌های صحرایی و رابطه تجربی دودینگ در فصل مشترک سنگ - خاک.

ردیف	فاصله‌ی شعاعی نقاط اندازه‌گیری تا محل انفجار (m)	بیشینه سرعت ذره (mm/s)			درصد اختلاف داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی صحرایی با	
		روش صحرایی	روش عددی	روش دودینگ	روش عددی	روش دودینگ
۱	۱۴٫۹	۲۲۶٫۶	۱۸۷٫۷۸	۱۱۲٫۶۳	۱۷	۵۰
۲	۱۷٫۲	۱۷۴	۱۶۹٫۴۹	۹۱٫۳	۲٫۵	۴۷
۳	۲۸٫۶	۶۸٫۲۸	۶۹٫۱۶	۴۳٫۴۷	۱٫۲	۳۶
۴	۵۲	۲۲٫۷۳	۲۳٫۷۸	۱۸٫۱۶	۴٫۶	۲۰

جدول ۷. مقایسه مقادیر حداکثر سرعت ذره حاصل از روش عددی، اندازه‌گیری‌های صحرایی و رابطه تجربی دودینگ در سطح خاک.

ردیف	فاصله‌ی شعاعی نقاط اندازه‌گیری تا محل انفجار (m)	بیشینه سرعت ذره (mm/s)			درصد اختلاف داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی صحرایی با	
		روش صحرایی	روش عددی	روش دودینگ	روش عددی	روش دودینگ
۱	۱۶٫۳	۱۲۶٫۵۲	۷۰٫۲	۱۲۸٫۶	۴۴٫۵	۱٫۶
۲	۱۸٫۶۳	۹۸٫۰۲	۵۴٫۹۷	۱۰۵٫۹	۴۳٫۹	۸
۳	۳۰٫۰۵	۳۹٫۳	۱۷٫۴	۵۲	۵۵٫۷	۳۲
۴	۵۳٫۰۹	۱۳٫۲۶	۷	۲۲٫۶۸	۴۷	۷۱

جدول ۸. مقادیر شار انرژی ورودی، انتقالی، انعکاسی و درصد انرژی انتقالی، انعکاسی و جذب شده.

محیط	شار انرژی ورودی	شار انرژی انتقالی	شار انرژی انعکاسی	درصد انرژی انتقالی	درصد انرژی انعکاسی	درصد انرژی جذب شده
	$(\frac{J}{m^2 \cdot sec})$	$(\frac{J}{m^2 \cdot sec})$	$(\frac{J}{m^2 \cdot sec})$			
خمیری	۱۰۲۲	۳۹	۷۹۸	۴٪	۷۸٪	۶۲٪

مقیاس شده دارد. درحالی که درصد اختلاف داده‌های صحرایی با روش دودینگ با افزایش فاصله‌ی مقیاس شده با شیب نسبتاً زیادی کاهش می‌یابد. شکل ۱۶ نشان می‌دهد که در سطح لایه خاک نیز درصد اختلاف داده‌های صحرایی با روش عددی وابستگی کم‌تری به فاصله‌ی مقیاس شده دارد. درحالی که درصد اختلاف داده‌های صحرایی با روش دودینگ تا فاصله‌ی مقیاس شده‌ی ۱۴ کم‌تر بوده و پس از آن درصد اختلاف نسبت به روش عددی فزونی می‌گیرد. بنابراین نتایج به‌دست آمده از تحلیل عددی پایا تر از نتایج حاصل از روش‌های تجربی است.

۶. نتیجه‌گیری

در این نوشتار سازوکار تشکیل و انتشار امواج حاصل از انفجار در یک توده سنگ با استفاده از روش عددی و نیز روش اجزاء مجزای کلی مدل‌سازی و صحت نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشات میدانی انجام شده توسط وو (۲۰۰۳) در محیط سنگی شامل سنگ گرانیت و لایه خاک اثبات شده است. مقایسه‌ی تحلیلی آزمایشات میدانی انجام شده و نتایج مدل‌سازی عددی آن نشان می‌دهد که مقادیر بیشینه سرعت ذره‌یی پیش‌بینی شده در فصل مشترک توده سنگ گرانیتی و لایه خاک مدل‌سازی شده به روش عددی به مقادیر اندازه‌گیری شده صحرایی بسیار نزدیک است. تطبیق نتایج تحلیل عددی با نتایج صحرایی مؤید صحت روش عددی انتخابی است.

در شکل ۱۳ رابطه‌ی بیشینه سرعت ذره‌یی حاصل از انفجار با فاصله‌ی مقیاس شده (فاصله‌ی نقطه‌ی اندازه‌گیری برحسب متر به ریشه سوم بیشینه وزن ماده‌ی منفجره در هر تأخیر برحسب کیلوگرم) در فصل مشترک سنگ-خاک برای حالت‌های عددی، اندازه‌گیری‌های صحرایی و رابطه‌ی تجربی دودینگ نشان داده شده است. چنان که ملاحظه می‌شود بیشینه سرعت ذره‌یی پیش‌بینی شده روی فصل مشترک سنگ-خاک توسط رابطه‌ی تجربی دودینگ با مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی صحرایی -- به‌ویژه برای فواصل مقیاس شده‌ی کم -- اختلاف واضحی دارند، درحالی که مقادیر پیش‌بینی شده روی فصل مشترک با تحلیل عددی به مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی صحرایی بسیار نزدیک است.

در شکل ۱۴ رابطه‌ی بیشینه سرعت ذره‌یی با فاصله‌ی مقیاس شده در سطح خاک برای حالت‌های عددی، اندازه‌گیری‌های صحرایی و رابطه‌ی تجربی دودینگ نشان داده شده است. در این حالت مقادیر بیشینه سرعت ذره‌یی پیش‌بینی شده توسط رابطه‌ی تجربی دودینگ بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی صحرایی است و دلیل آن نیز این است که این رابطه‌ی تجربی یک رابطه‌ی کلی است و از مطالعه و اندازه‌گیری در مناطق و شرایط متعدد و مختلف به دست آمده و مقادیر پیش‌بینی شده با تحلیل عددی به‌ویژه برای فاصله‌ی مقیاس شده‌ی کم اختلاف محسوسی با مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی صحرایی دارد.

چنان که در شکل ۱۵ ملاحظه می‌شود در امتداد فصل مشترک سنگ-خاک، درصد اختلاف داده‌های صحرایی با روش عددی وابستگی کم‌تری به فاصله‌ی

پانوشت

1. dowding.
2. heterogenous.
3. anisotropic.
4. universal distinct element code (UDEC).
5. moher-coulomb model.
6. plastic material model.
7. shear yield surface.

منابع

1. Cai, J.G.;and Zhao, J. "Effects of multiple parallel fractures on apparent attenuation of stress waves in rock mass", *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.*, **37**, pp. 661-682, (2000).
2. Hustrulid, W. *Blasting principles for open pit mining*, A.A. Balkema, Rotterdam, (1999).
3. Wu, C.; Hao, H.; Lu, Y.;and Zhou, Y. "Characteristics of stress waves recorded in small-scale field blast tests on a layered rock -soil site", *Geotechnique*, **53**(6), pp. 587-599, (2003).
4. Dowding, C.H. *Blast vibration monitoring and control*, Prentice-Hall Inc, (1985).
5. Chen, S.G.;and Zhao, J. "A study of UDEC modeling for blast wave propagation in jointed rock masses", *Int J Rock Mech Min Sci*, **35**, pp. 93-99, (1998).
6. Liu, Q.; Tidman, P. "Estimation of the dynamic pressure around a fully loaded blasthole", *Technical Report MRL 95-014*, CANMET/MRL, 15p, (1995); <http://www.nrcan.gc.ca>.
7. Akhavan, J. "The chemistry of explosives", Thomas Graham House, The Science Park, Cambridge, (1998).
8. Kuhlemeyer, R.L.;and Lysmer, J. "Finite element method accuracy for wave propagation problems", *J. Soil Mech. and Foundations, Div ASCE*, **99**(SM5), pp. 421- 427, (1973).
9. Bakhshandeh Ammieh, H. Numerical analysis of the effect of blast-induced stress wave propagation on major rock mass discontinuities, PhD thesis (in Farsi with abstract in English), Amirkabir University of Technology, (2006).