

میرایی موج انفجار بمب در اثر برخورد با زمین در زردار روی سازه پدافندی

فریدون خسروی^۱، سید یحیی روحانی^۱، غلامرضا چراغی^۲

تاریخ دریافت: ۸۹/۱۰/۱۵

تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۱/۲۶

چکیده

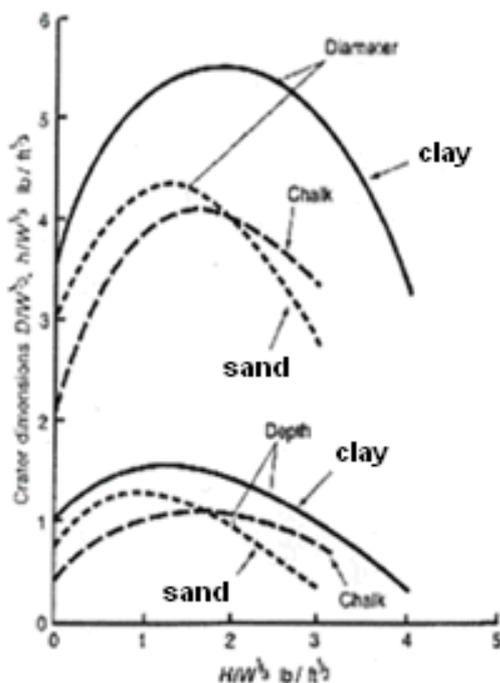
امروزه سلاح‌هایی در دنیا ساخته شده‌اند که هنوز در هیچ جنگی عملیاتی نشده‌اند و کشورهای پیشرفته مدعی هستند که این سلاح‌ها قابلیت تخریب سازه‌های زیرزمینی را دارند. لذا با این توضیح و لزوم دفاع، طراحی دینامیکی سازه‌های زیرزمینی در مقابل انفجار بمب‌های خاص ضروری به نظر می‌رسد. انتشار امواج در توده سنگ که ذاتاً ناپیوسته است و رفتار متغیری دارد و همچنین طراحی دینامیکی سازه‌های زیر زمینی که در توده سنگ احداث می‌شوند بسیار پیچیده است. در اغلب مطالعاتی که در زمینه انتشار موج در سنگ انجام شده زمین به صورت یک محیط همگن، همسانگرد و الاستیک کامل در نظر گرفته شده است و حال آنکه زمین، ماهیت ناپیوسته دارد و به هیچ وجه رفتار آن بر شرایط فوق منطبق نیست. در این راستا مطالعه رفتار واقعی زمین در مقابل انتشار امواج ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق از نرم افزار UDEC که اساس آن مبتنی بر روش المان اجزاء می‌باشد و قابلیت تحلیل دینامیک محیط‌های سنگی ناپیوسته را دارا است برای مطالعه بارگذاری، انتشار و میرایی موج ناشی از انفجار سطحی استفاده گردیده و نتایج مطلوبی حاصل شده است.

کلیدواژه‌ها: کراتر، موج انفجار، زاویه میل ناپیوستگی و UDEC

۱- استادیار دانشکده و پژوهشکده فنی و مهندسی دانشگاه جامع امام حسین(ع) E-mail: Ferydoonkhosravi@hotmail.com

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران (گرایش سازه)، دانشکده و پژوهشکده مهندسی دانشگاه جامع امام حسین(ع)

دارا می‌باشد. ثابت خاک از ۲۰۰۰ psi برای لای و ۱۰۰۰۰ psi برای رس اشباع و ۵۹۰۰۰۰ psi برای سنگ آهک تغییر می‌کند. H فاصله سطح مدفن خرج تا سطح زمین است. لمپسون [۲] در سال ۱۹۶۴ در مورد ابعاد کراترها پیشنهاداتی نموده که بسیار شبیه گزارشات والی است. پیشنهادات لمپسون به صورت نمودارهای شکل (۱) ارائه و در دستورالعمل‌های ارتش آمریکا ثبت شده و تاکنون تغییر محسوسی در آنها ایجاد نشده است.



شکل ۱- رابطه بین ابعاد کراتر و عمق روباره خرج [۲ و ۱]
محور افقی $H/W^{1/3}$ و محور قائم $D/W^{1/3}$

از روی نمودار شکل (۱) و با در نظر گرفتن عمق روباره از رابطه $H = 2W^{1/3}$ می‌توان نشان داد که با انفجار یک بمب ۲۰۰ پوندی قطر کراتر ایجاد شده حدوداً ۱۰/۵ متر خواهد بود. پرسن (Persen) معتقد است که یک کراتر واقعی با ابعاد h_c و r_c را می‌توان با یک نیم‌دایره به شعاع a طبق فرمول زیر جایگزین نمود [۳].

$$a = \frac{2}{3} r_c \quad (1)$$

۱- مقدمه

در مسائل مهندسی سنگ، وجود ناپیوستگی در توده‌های سنگی به صورت گسله‌ها، درزه‌ها یا سطوح لایه‌بندی، تأثیر زیادی بر پاسخ توده سنگ به بارهای استاتیکی و دینامیکی دارد و باعث می‌شود که مدل‌سازی این محیط‌ها اندکی پیچیده شود. روش‌های عددی زیادی برای مدل‌سازی مسائل مهندسی سنگ وجود دارد که روش المان محدود FEM، روش المان مرزی BEM، روش تفاضلات محدود FDM و بالاخره روش المان مجزا DEM از این جمله‌اند.

در روش تحقیق اتخاذ شده به منظور تعیین اثر موج انفجار بر یک محیط ناپیوسته لازم است با تعیین سرعت ذره‌های ماکزیمم موج و اثر آن بر روی محیط‌های ناپیوسته توده سنگ که دارای درزه‌های با زوایای میل مختلف می‌باشد ارزیابی و میزان میرایی موج را با محاسبات دستی و نرم‌افزار کنترل نمود.

روش المان مجزا DEM مناسب‌ترین روش برای مدل‌سازی توده‌های سنگی ناپیوسته و درزه‌دار در تحلیل‌های دینامیکی است. در این روش، بلوک‌ها به‌طور مجزا می‌توانند صلب یا تغییر شکل‌پذیر فرض شوند و ناپیوستگی‌ها که به صورت یک کنتاکت از مدل رفتاری ساده موهر-کولمب پیروی می‌کنند، مدل می‌شوند. رفتار دینامیکی به صورت عددی با یک الگوریتم وابسته به زمان مدل می‌شود. روش DEM در نرم‌افزار UDEC مورد استفاده قرار گرفته است.

۲- فرض انفجار یک بمب هوایی در سطح زمین

در این پروژه امکان دسترسی به داده‌های واقعی (ابعاد کراتر ایجاد شده در اثر اصابت و انفجار یک بمب واقعی و هم‌چنین شتاب نگاشت‌ها و نمودارهای سرعت ذره‌ای بر حسب زمان و...) وجود نداشت. لذا قبل از وارد کردن پارامترها به نرم‌افزار، اطلاعات محدودی که از منابع مورد مطالعه در دسترس بود و با استناد به چند رابطه تجربی و محدود، یک بمب معمولی حاوی ۲۰۰ lb ماده منفجره TNT در نظر گرفته شد و ابعاد کراتر (دهانه انفجاری) حاصل از انفجار این بمب و سرعت ذره‌ای و مقدار ماکزیمم آن بر حسب زمان محاسبه گردید.

فشار ناشی از انفجار یک خرج در زیر سطح زمین، تحت تأثیر فاصله نقطه متأثر از انفجار از مرکز (R)، وزن ماده منفجره (w)، خصوصیات خاک و سنگ (K) و عمق روباره خرج (H) قرار دارد [۱]. K ثابت خاک و سنگ است که واحد مدول الاستیسیته را

استیون و رایمر و دیگران [۶] طی یک پروژه که با مشارکت شرکت بین‌المللی کاربرد علوم و انستیتو دینامیک ژئوسفر کشور روسیه انجام شده، رفتار حوزه نزدیک انفجار ۲۵ آزمایش انفجار زیرزمینی را در محل آزمایش دگلن رفتارنگاری کرده‌اند. نتایج این رفتارنگاری مقدار V_{max} (سرعت ذره‌ای حداکثر) نقاط اطراف منبع انفجار را در نزدیکی آن پیش‌بینی می‌کند. اگر بتوان به این منحنی به‌عنوان مجموعه‌ای از اطلاعات واقعی استناد نمود، چنانچه یک بمب ۲۰۰ پوندی در سطح زمین منفجر شود در فاصله ۳/۵ متری از مرکز انفجار (مرکز کراتر) با پیوند موج ۰/۳ ثانیه، سرعت ذره ای ماکزیمم حدوداً ۱۳/۲ متر بر ثانیه خواهد بود.

با استفاده از رابطه (۴) تابع سرعت ذره‌ای نقاطی که روی مرز کراتر قرار دارند برحسب زمان، به کمک یک زیربرنامه FISH که همراه با یک نوع زبان برنامه‌نویسی در UDEC است، نوشته شده، و روی مرز داخلی کراتر به‌صورت شعاعی اعمال شده است. شکل موج در شکل (۲) نشان داده شده است. پیوند این موج ۰/۳ ثانیه است.

۴- مدلسازی با نرم‌افزار UDEC

برای مدلسازی انفجار یک بمب هوایی و تأثیر آن بر یک محیط سنگی، در این پروژه، یک بلوک مربعی شکل که ابعاد آن با شرایط مورد مطالعه تغییر می‌کند، با یک نیم دایره به شعاع ۳/۵ متر در وسط مرز بالایی بلوک به‌عنوان یک کراتر ایده‌آل در سطح زمین، در نظر گرفته شده است. بار دینامیکی ناشی از انفجار پس از تعادل استاتیکی مدل به صورت شعاعی بر سطح داخلی این نیم‌دایره اعمال شده است. یعنی سرعت ذره‌ای هر نقطه از سطح داخلی کراتر به‌صورت شعاعی منطبق با شکل (۴) با زمان تغییر می‌کند که نشان‌دهنده اعمال یک پالس انفجاری بر سطح داخلی کراتر است. در تمام مدل‌هایی که در طول انجام پروژه ساخته شده، شرایط بارگذاری دینامیکی ثابت بوده و ابعاد کراتر نیز تغییر نکرده است.

بنابراین کراتر ایجاد شده با انفجار بمب ۲۰۰ پوندی با یک نیم‌دایره به شعاع ۳/۵ متر جایگزین گردید.

۳- نحوه اعمال بار دینامیکی ناشی از انفجار در

مدل‌ها

آخن باخ (Achenbach) بیان می‌کند که جابه‌جایی شعاعی در اثر انتشار موج P از یک منبع نقطه‌ای در صفحه، در یک محیط نامحدود از معادله زیر به‌دست می‌آید [۴ و ۵]:

$$u_1 = \frac{1}{4\pi C_p^2} \cdot \frac{\partial}{\partial X_i} \left[\frac{1}{r} f \left(t - \frac{r}{C_p} \right) \right] \quad (2)$$

$$r^2 = x^2 + y^2$$

C_p : سرعت موج فشاری P و با توجه به تابع زمانی موج، چنانچه تابع زمانی منبع را $f(t) = 1 \quad t \geq 0$ و $f(t) = 0, \quad t < 0$ در نظر بگیریم:

با انتگرال‌گیری از معادله فوق خواهیم داشت: اگر: $t > \frac{r}{C_p}$

$$u = -\frac{1}{2\pi \cdot C_p} \cdot \frac{t}{r^2} \left[\frac{t^2 C_p^2}{r^2} - 1 \right]^{-1/2} \quad (3)$$

u : جابه‌جایی شعاعی

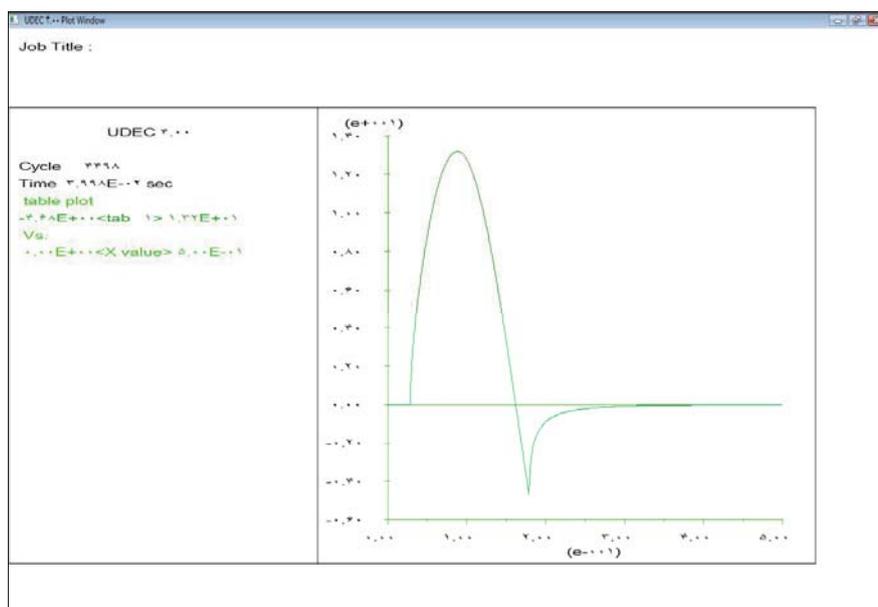
r : فاصله از منبع موج

سرعت ذره‌ای شعاعی نیز از رابطه زیر به‌دست می‌آید [۴ و ۵]:

$$v = -\frac{1}{2\pi \cdot C_p} \cdot \frac{1}{r^2} \left[\frac{t^2 C_p^2}{r^2} - 1 \right]^{-3/2} \quad (4)$$

جدول ۱- پارامترهای مکانیکی توده سنگ برای مدل فوق

مقاومت کششی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (degree)	چسبندگی (MPa)	مدول برشی (GPa)	مدول حجمی (GPa)	مدول تغییر شکل پذیری (MPa)	دانسیتته (gr/cm ²)
۰/۰۵	۴۵	۱	۴/۱۷	۵/۵۵	۱۰۰۰۰	۲/۶



شکل ۲- شکل پالس دینامیکی ناشی از انفجار بمب که در مدل‌ها روی سطح داخلی کراتر اعمال شده (محور قائم سرعت ذره‌ای بر حسب متر بر ثانیه، و محور افقی زمان بر حسب ثانیه است).

جدول ۲- پارامترهای مکانیکی ناپیوستگی برای مدل‌های فوق

زاویه اصطکاک درزه (degree)	چسبندگی درزه (MPa)	سختی برشی درزه (jks) (GPa)	سختی نرمال درزه (jkn) (GPa)
۲۸/۵	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۷

به ترتیب ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درجه در نظر گرفته شده و در شرایطی که پارامترهای مکانیکی درزه مفروض و خصوصیات ذاتی ماده سنگ به ترتیب طبق جدول‌های (۱) و (۲) ثابت در نظر گرفته شده، میرایی موج در جهت قائم مورد بررسی قرار گرفته است (نمودار ۱).

همان‌طوری که از نمودار (۱) قابل مشاهده است، چنانچه زاویه میل درزه نسبت به سطح افق حدود ۶۰-۴۰ درجه باشد، موج انفجار زودتر و بیشتر از سایر حالات دیگر میرا می‌شود. این مطلب بیانگر آن است که، زاویه میل ۶۰-۴۰ درجه بهترین شرایط را در مقایسه با سایر زوایا برای سازه زیرزمینی در مقابل انفجار سطحی ایجاد می‌کند.

۵- تأثیر زاویه میل ناپیوستگی نسبت به سطح

افق بر میرایی موج انفجار

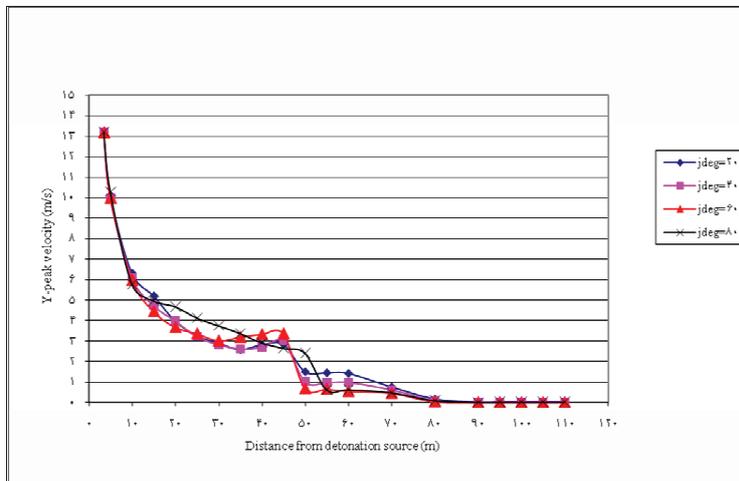
برای بررسی تأثیر زاویه میل ناپیوستگی‌ها نسبت به سطح افق بر میرایی موج انفجار، مدلی با ابعاد ۲۰۰×۲۰۰ متر با یک درزه تکی مورد بررسی قرار گرفته است.

چنانچه زاویه بین امتداد درزه با سطح افق را به‌عنوان زاویه میل ناپیوستگی نسبت به سطح افق در نظر بگیریم، با تغییر این زاویه می‌توان تأثیر آن را بر میرایی موج انفجار در جهت محور Y و درست در مرکز کراتر سطحی مورد بررسی و مطالعه قرار داد. بدین منظور زاویه میل درزه مفروض نسبت به سطح افق

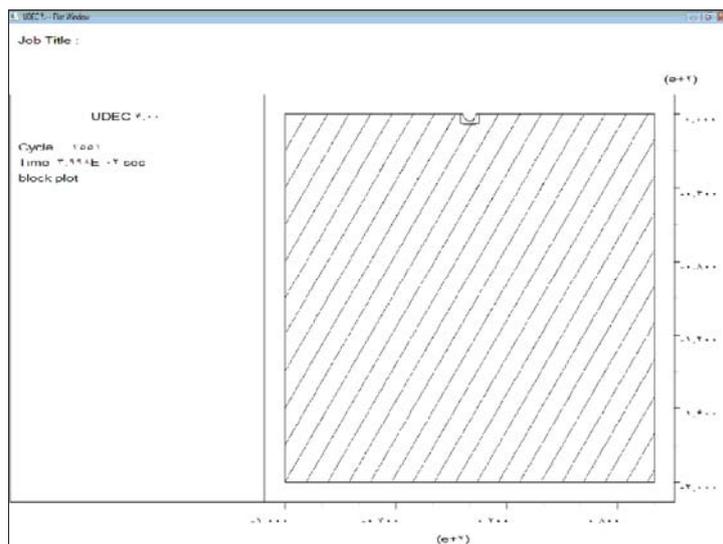
بگیریم، با تغییر این زاویه می‌توان تأثیر آن را بر میرایی موج در جهت محور کراتر سطحی مورد بررسی و مطالعه قرار داد. بدین منظور زاویه میل دسته درزه مفروض را نسبت به سطح افق به ترتیب ۰، ۲۰، ۴۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵، ۸۰ و ۹۰ درجه در نظر گرفته و در شرایطی که پارامترهای مکانیکی دسته درزه مفروض و خصوصیات ذاتی ماده سنگ به ترتیب طبق جدول‌های (۱) و (۲) ثابت در نظر گرفته شده، میرایی موج در جهت قائم مورد بررسی قرار گرفته است.

۶- تأثیر زاویه میل ناپیوستگی‌ها نسبت به سطح افق بر میرایی موج انفجار با وجود ناپیوستگی‌های موازی

برای بررسی تأثیر زاویه میل ناپیوستگی‌ها نسبت به سطح افق بر میرایی موج، مدل‌هایی با ابعاد ۲۰۰×۲۰۰ متر مطابق شکل (۳) با یک دسته درزه که فاصله‌داری آنها بین ۱۰ متر است مورد بررسی قرار گرفته است. چنانچه زاویه بین امتداد دسته درزه با سطح افق را به‌عنوان زاویه میل ناپیوستگی نسبت به سطح افق و درست در مرکز γ در نظر



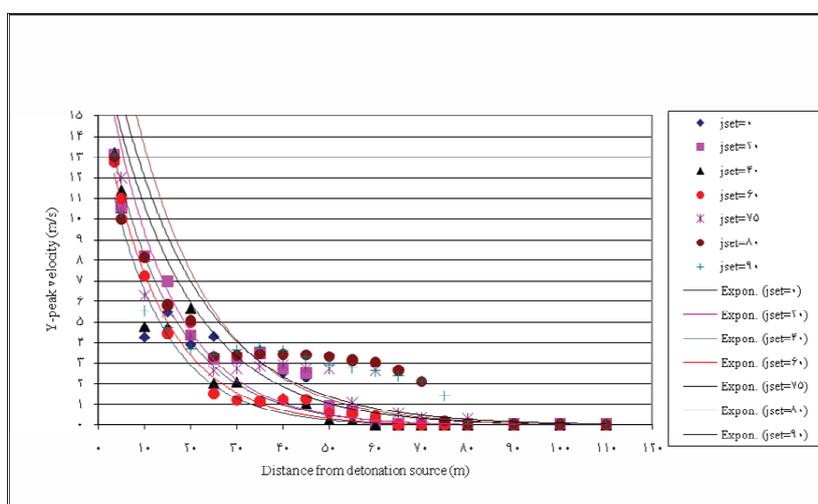
نمودار ۱- تأثیر زاویه میل ناپیوستگی نسبت به سطح افق بر میرایی موج



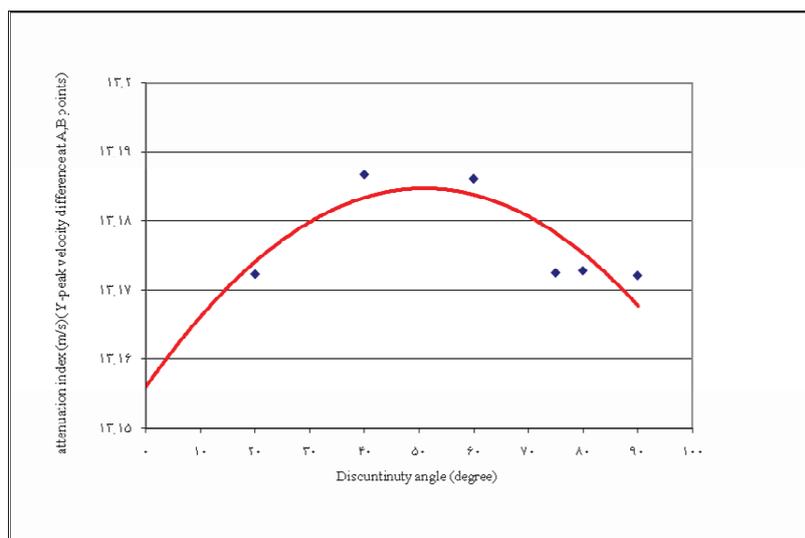
شکل ۳- نمونه مدل ساخته شده برای بررسی تأثیر زاویه ناپیوستگی‌ها

که از شکل قابل مشاهده است، در زاویه حدود ۴۰-۶۰ درجه این تفاضل که می‌تواند شاخصی از میرایی موج باشد، به حداکثر مقدار خود می‌رسد و این مطلب بیانگر آن است که با وجود یک دسته ناپیوستگی موازی که وضعیت قرارگیری آن نسبت به سطح زمین، کراتر سطحی و سازه زیرزمینی مطابق شکل (۴) باشد، می‌توان گفت که زاویه میل ۴۰-۶۰ درجه بهترین شرایط را در مقایسه با سایر زوایا برای سازه زیرزمینی در مقابل انفجار سطحی ایجاد می‌کند. با تغییر شرایط مدل، نتایج نیز تغییر خواهد کرد.

منحنی‌های میرایی موج در جهت قائم برای تمام مدل‌های مربوطه در نمودار (۲) رسم شده است. همان‌طوری که از نمودار (۲) قابل مشاهده است، چنانچه زاویه میل دسته درزه نسبت به سطح افق ما بین ۴۰-۶۰ درجه باشد، موج انفجار زودتر و بیشتر از سایر حالات میرا می‌شود. برای درک بهتر این مطلب، تفاضل سرعت ارتعاش ماکزیمم موج در جهت Y در دو نقطه A و B که به ترتیب در اعماق ۵ و ۱۰۰ متری قرار گرفته‌اند، به‌عنوان تابعی از زاویه میل دسته درزه نسبت به سطح افق، در نمودار (۳) رسم شده است. همان‌طور



نمودار ۲- تأثیر زاویه میل ناپیوستگی‌ها نسبت به سطح افق بر میرایی موج



نمودار ۳- تغییرات اندیس میرایی (تفاضل سرعت ذره‌های ماکزیمم در نقاط A, B) بر حسب زاویه میل ناپیوستگی نسبت به سطح زمین

نسبت به سطح افق حدود ۶۰-۴۰ درجه باشد، پالس انفجاری در جهت قائم زودتر و بیشتر از حالت‌های دیگر میرا می‌شود. ۳- چنانچه تفاضل مقدار ماکزیمم پالس انفجاری در عمق سازه و سطح کراتر را به‌عنوان شاخصی از میرایی در نظر بگیریم در حدود زاویه ۶۰-۴۰ درجه این شاخص به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

۴- با افزایش تعداد دسته ناپیوستگی‌ها (دسته درزه‌های متقاطع) موج ناشی از انفجار زودتر و بیشتر میرا می‌شود و عمق بحرانی کاهش می‌یابد. می‌توان گفت در این شرایط خاص و در سطح دقت مدلسازی نرم‌افزاری موجود، یک دسته درزه با زاویه ۶۰-۴۰ درجه نسبت به سطح افق می‌تواند شرایط مناسبی را برای حفر سازه امن ایجاد کند.

۵- در شرایطی که مدل‌ها به صورت ناپیوسته در نظر گرفته شده‌اند، در تمام حالات سرعت انتشار موج در جهت ناپیوستگی بیش از سرعت انتشار موج عمود بر جهت ناپیوستگی‌ها است.

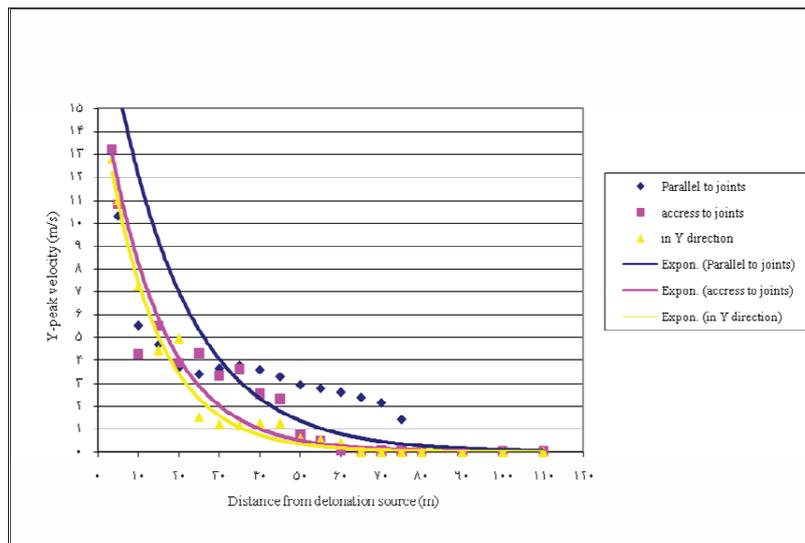
۶- به‌طور کلی در محیط‌های ناپیوسته‌ای مثل سنگ می‌توان گفت که با وجود ناپیوستگی‌های مؤثر، احداث سازه‌های امن ممکن خواهد بود. اما لازم است که شرایط محیطی و ژئومتری سازه با دقت ممکن مدلسازی و با برآوردهای فنی و اقتصادی بهترین گزینه برای احداث سازه امن انتخاب شود

برای تأیید مطلب فوق و بررسی میرایی موج در جهت ناپیوستگی‌ها و عمود بر آنها، منحنی‌های میرایی موج در جهت ناپیوستگی‌ها و عمود بر آنها، به همراه منحنی میرایی موج در جهت قائم، در نمودار (۴) رسم شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، میرایی موج عمود بر جهت ناپیوستگی‌ها بیشتر از میرایی موج در جهت آنهاست. هم‌چنین با مقایسه این منحنی‌ها و منحنی میرایی موج در جهت قائم درمی‌یابیم، زمانی که جهت انتشار موج با جهت ناپیوستگی‌ها زاویه بین ۶۰-۴۰ درجه می‌سازد، میرایی موج از شرایطی که این زاویه بین ۰ و ۹۰ درجه است، بیشتر خواهد بود.

۷- نتیجه‌گیری

۱- با افزایش تعداد ناپیوستگی‌ها موج ناشی از انفجار زودتر و بیشتر میرا می‌شود.

۲- قضاوت در مورد تأثیر زاویه ناپیوستگی بر میرایی موج و تأثیر آن بر سازه زیرزمینی بسیار مشکل و پیچیده است. چرا که وضعیت قرارگیری سازه، ناپیوستگی‌ها و کراتر ناشی از انفجار نسبت به یکدیگر در تغییر شرایط میرایی موج بسیار مؤثر است. در یک حالت خاص که کراتر درست بالای سازه قرار گرفته و زاویه ناپیوستگی‌ها که یک دسته درزه با فاصله‌داری ۱۰ متر است، تغییر داده شده، با ثابت نگه داشتن خصوصیات مکانیکی سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها، چنانچه زاویه دسته درزه



نمودار ۴- منحنی‌های میرایی موج انفجار در جهت ناپیوستگی‌های مدل شکل (۶) و عمود بر آن

مراجع

1. Bulson, P. S.; Explosive Loading of Engineering Structures; University of Southampton, (1997).
2. Chadwick, P., Cox, A. D. and Hopkins, M.G.; Mechanics of Deep Underground Explosions; Phil. Trans. Roy. Soc., Series A, No. 1069, Vol. 256, April, (1964).
3. Persen, L. N.; Rock Dynamics and Geophysical Exploration; Introduction to Stress Waves in Rocks, Elsevier Scientific Pub., Developments in Geotechnical Engineering 8, New York. (1975).
4. Achenbach, J. D.; Wave Propagation in Elastic Solids; New York, North-Holland Publishing Company, (1975).
5. Itasca Consulting Group. INC.; UDEC; (Universal Distinct Element Code), Version 3.1 Minneapolis, Icg, (1999).
6. Stevens, J. L., Rimer, N. and et al.; Near Field and Regional Modelling of Explosions at the Degelen Test Site; 23th Seismic Reserch Review, Worldwide Monitoring of Nuclear Explosions, October, (2001).

Damping of Bomb Blast Wave Due to Impact with the Cracked Earth on the Defense Structure

Fereidoon Khosravi¹

Yahya Rohani¹

Cheraghi Gholam Reza²

Abstract

Nowadays weapons have been made in the world that were not operational at any war and modern countries claim that these weapons are capable of destroying underground structures. Therefore, in regard to this explanation and the need to defend, dynamic designing of underground structures against special bomb blast seems to be indispensable. Wave propagation in stone mass which are inherently inconsistent and have variable behavior and dynamic designing of underground structures that are established in stone mass as well, are very complex. In many studies conducted to wave propagation in stones, the earth has been considered as a homogeneous, similar and completely elastic environment, whereas the earth has an inconsistent nature and its behavior is not compatible with the said conditions at all. In this regard, the study of the real earth behavior against wave propagation seems to be necessary. This paper makes use of UDEC software which is based on component element method and has the ability to dynamically analyze inconsistent stone environments to study loading, wave propagation and damping caused by surface explosion which culminated in desirable results.

Keys Words: *Blast Wave, Angle of Inconsistency Orientation, UDEC*

1- Associate Professors of Civil Engineering, Imam Hossein University

2- M.S Candidate of Civil Engineering (Structure Discipline) Faculty of Civil Engineering, Imam Hossein University