اثر انفجار و زاویه میل ناپیوستگی بر عمق بهینه تونل

سیدیحیی روحانی[1]، فریدون خسروی[1]، غلامرضا چراغی[2] علی عبادی[2]

تاریخ دریافت: ۸۹/۱۰/۱۵
تاریخ پذیرش: ۹۰/۰۶/۰۵

چکیده

ضرورت طراحی سازه‌های زیرزمینی امن در مقابل انواع انفجارات و بمب‌های نفوذ کننده در زمین از جنبه‌های مختلف از اهم ضروریات یک کشور می‌باشد، که در این راستا معرفی اجزاء یک سازه زیرزمینی و عملکرد انواع انفجارات سطحی ضرورت داشته، زیرا هدف از اجرای یک سازه زیرزمینی امن، حفاظت از افراد و تجهیزات در مقابل سلاح‌ها و پرتابه‌ها و آثار آنها است. از آنجایی که یک سازه زیرزمینی امن در واقع یک پناهگاه است، آثار ناشی از انتشار موج ناشی از انفجار بمب‌ها و پرتابه‌های سطحی به‌صورت پارامترهای مختلف و عبور آن از زمین با جنس توده سنگ مورد مطالعه قرار گرفته و بارگذاری اجزای مختلف حاصل از انفجار بیان شده است.

در این تحقیق از نرم‌افزار UDEC که اساس آن مبتنی بر روش المان مجزا می‌باشد و قابلیت تحلیل دینامیک محیط‌های سنگی ناپیوسته را دارا است برای مطالعه بارگذاری، انتشار و میرایی موج ناشی از انفجار سطحی و تأثیر آن بر پایداری سازه زیرزمینی (تونل) و عمق بهینه حفاری آن استفاده گردیده است.

کلیدواژه‌ها: موج انفجار، عمق بحرانی، زاویه میل ناپیوستگی، عمق بهینه تونل

۱- استادیار دانشگاه جامع امام حسین(ع)، دانشکده و پژوهشکده فنی مهندسی، گروه عمران
۲- کارشناسی ارشد مهندسی عمران (گرایش سازه)، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، دانشکده و پژوهشکده فنی مهندسی، گروه عمران

مقدمه

در مسائل مهندسی سنگ، وجود ناپیوستگی در توده‌های سنگی به‌صورت 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.

روش‌های FEM, BEM و FDM برای مدل‌سازی درزه‌ها زمانی مناسب هستند که تنها تعداد کمی درزه و ناپیوستگی در محیط وجود داشته باشد. برای توده‌های شدیداً ناپیوسته، می‌توان از فرض محیط معادل استفاده کرد، بدین ترتیب که محیط را به‌صورت پیوسته در نظر می‌گیریم اما خصوصیات مقاومتی ماده سنگ را به کمک روشهای معمول به یک مقدار مناسب کاهش می‌دهیم. این روش برای تحلیل‌های استاتیکی مدل‌ها مناسب است ولی برای تحلیل‌های دینامیکی نتایج مطلوبی را به‌دست نمی‌دهد. روش المان مجزای DEM مناسب‌ترین روش برای مدل‌سازی توده‌های سنگی در تحلیل‌های دینامیکی است. در این روش، بلوک‌ها به‌طور مجزا می‌توانند صلب یا تغییرشکل‌پذیر فرض شوند. ناپیوستگی‌ها به‌صورت یک کنتاکت که از مدل رفتاری ساده موهر-کولمب پیروی می‌کند مدل می‌شوند. رفتار دینامیکی به‌صورت عددی با یک الگوریتم وابسته به زمان مدل می‌شود. روش DEM در نرم‌افزار UDEC مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به هدف تحقیق که بررسی اثرات تخریبی ناشی از بمب‌های هوایی بر سازه‌های زیرزمینی در محیط‌های سنگی است این نرم‌افزار مورد استفاده قرار گرفته است.

۲- فرضیات بار دینامیکی

اصولاً در دنیا نرم‌افزارهایی وجود دارد که به‌عنوان پارامترهای ورودی مشخصات بمب، وزن بمب، عمق نفوذ بمب، و خصوصیات زمین (دانسیته و سرعت لرزش زمین) را دریافت کرده و خروجی‌های واکنش زمین به انفجار بمب خاص را ارائه می‌دهند. اما اکثر این نرم‌افزارها متعلّق به ارتش آمریکا و کشورهای اروپایی هستند.که امکان دسترسی به آنها مشکل می‌باشد.

پرسن[1] معتقد است که یک کراتر واقعی (دهانه انفجاری حاصل از انفجار بمب در سطح زمین) با ابعاد r_c و h_c را می‌توان با یک نیم دایره به شعاع a جایگزین نمود [۱].

$$a = \frac{2}{3} r_c \qquad (۱)$$

برای بار انفجار بمب ۲۰۰ پوندی، کراتر ایجاد شده با یک نیم دایره به شعاع ۳/۵ متر با استفاده از نمودار(۱) و محاسبات انجام شده، جایگزین گردید.

آخن باخ (Achenbach) [۲] بیان می‌کند که جابجایی شعاعی در اثر انتشار موج P از یک منبع نقطه ای در صفحه، در یک محیط نامحدود از معادله زیر به‌دست می‌آید[۲و۳ :]

$$u_1 = \frac{1}{4\pi C_p{}^2} \cdot \frac{\partial}{\partial X_i} \left[\frac{1}{r} f\ (t - \frac{r}{C_p}) \right] \qquad (۲)$$

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

سرعت موج فشاری C_p است و تابع زمانی موج را در دو حالت درنظر می‌گیریم $f(t) = 0 \text{ ، } t \prec 0$

$f(t) = 1 \quad t \geq 0$

با انتگرال‌گیری از معادله شماره(۲) خواهیم داشت:

اگر: $t \succ \frac{r}{c_p}$

$$u = -\frac{1}{2\pi . c_p} \cdot \frac{t}{r^2} \left[\frac{t^2 c_p^2}{r^2} - 1 \right]^{-1/2} \qquad (۳)$$

u: جابجایی شعاعی

r: فاصله از منبع موج

سرعت ذره‌ای شعاعی نیز از رابطه زیر به‌دست می‌آید[۲و۳]:

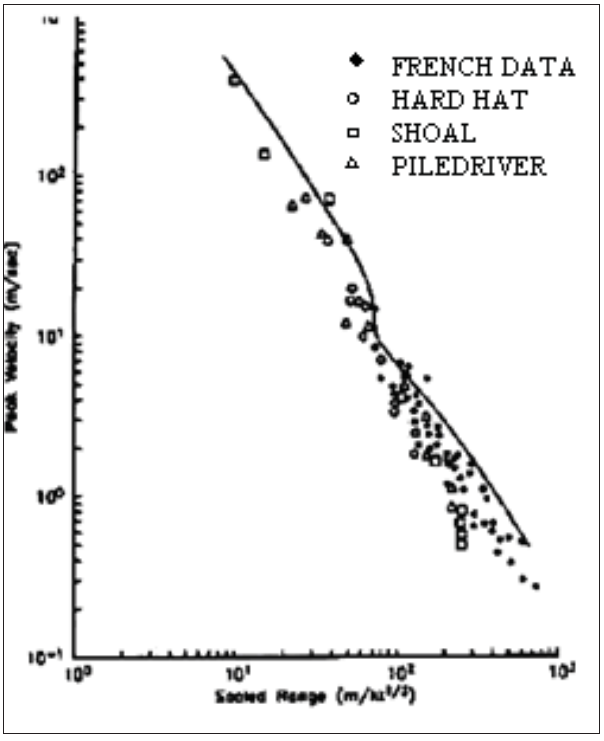
اگر: $t \succ \frac{r}{c_p}$

$$v = -\frac{1}{2\pi . c_p} \cdot \frac{1}{r^2} \left[\frac{t^2 c_p^2}{r^2} - 1 \right]^{-3/2} \qquad (۴)$$

1- Persen

استیون و رایمر و دیگران [۴] طی یک پروژه که با مشارکت شرکت بین المللی کاربرد علوم و انستیتو دینامیک ژئوسفر کشور روسیه انجام شده، رفتار حوزه نزدیک انفجار را با انجام ۲۵ آزمایش انفجار زیرزمینی در محل آزمایش دگلن رفتارنگاری نمودند. نتایج این رفتارنگاری مقدار Vmax (سرعت ذره‌ای حداکثر) نقاط اطراف منبع انفجار را در نزدیکی آن پیش‌بینی می‌کند. این مسئله در نمودار (۱) ارائه شده است. اگر بتوان به این منحنی به‌عنوان مجموعه‌ای از اطلاعات واقعی استناد نمود، در آن صورت چنانچه یک بمب ۲۰۰ پوندی در سطح زمین منفجر شود در فاصله ۳/۵ متری از مرکز انفجار (مرکز کراتر) سرعت ذره‌ای ماکزیمم حدوداً ۱۳/۲ متربرثانیه خواهد بود.

با استفاده از رابطه ۴ تابع سرعت ذره‌ای نقاطی که روی مرز کراتر قرار دارند برحسب زمان، به کمک یک تابع FISH که یک نوع زبان برنامه نویسی ساده در UDEC است، نوشته شده، و روی مرز داخلی کراتر به‌صورت شعاعی اعمال شده است. پریود این موج ۰/۳ ثانیه است.



نمودار ۱- سرعت ماکزیمم (m/s) برحسب فاصله از منبع انفجار (m/kt1/3) [۴].

۳- مدل‌سازی بار دینامیکی و تعیین عمق بحرانی

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 نیم‌دایره به شعاع ۳/۵ متر که در وسط مرز بالایی بلوک به‌عنوان یک کراتر ایده‌آل در سطح زمین قرار دارد را درنظر می‌گیریم. هم‌چنین بار دینامیکی ناشی از انفجار پس از تعادل استاتیکی مدل به‌صورت شعاعی بر سطح داخلی این نیم‌دایره اعمال شده و سرعت ذره‌ای هر نقطه از سطح داخلی کراتر به‌صورت شعاعی منطبق با زمان تغییر می‌کند که نشان‌دهنده اعمال یک پالس انفجاری بر سطح داخلی کراتر است.

زمانی که بمب در سطح زمین منفجر می‌شود، محیط سنگی اطراف را تا شعاع معینی تحت تأثیر قرار می‌دهد. این ناحیه متاثر از انفجار، در مدل‌ها به‌صورت زون پلاستیک اطراف کراتر قابل مشاهده است. به‌عنوان یک تعریف، عمقی که زون پلاستیک تا آن عمق ادامه پیدا می‌کند، به‌عنوان عمق بحرانی در نظر گرفته شده است. این زون پلاستیک مربوط به زمانی است که پالس انفجاری کاملا از محیط سنگی عبور کرده و به مرزهای مجازی مدل رسیده است. بنابراین "عمق بحرانی" عمقی است که زون پلاستیک ناشی از انفجار بمب در سطح زمین، پس از انتشار کامل پالس انفجاری در تمام بلوک، تا آن عمق ادامه پیدا می‌کند. واضح است که ابعاد، خصوصیات، مقدار مواد منفجره و میزان نفوذ بمب در زمین، زون پلاستیک و به تبع آن "عمق بحرانی" را تحت تأثیر قرار می‌دهد، به‌طوری‌که پارامترهای مقاومتی ماده سنگ و ناپیوستگی‌های موجود در زمین نیز تأثیر زیادی بر زون پلاستیک و عمق بحرانی دارند.

۴- تأثیر زاویه میل ناپیوستگی بر میرایی موج انفجار

برای بررسی تأثیر زاویه میل ناپیوستگی‌ها (ترک روی سنگ) نسبت به سطح افق برای میرایی موج انفجار، مدلی با ابعاد ۲۰۰×۲۰۰ متر با یک درزه 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 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 ۲).

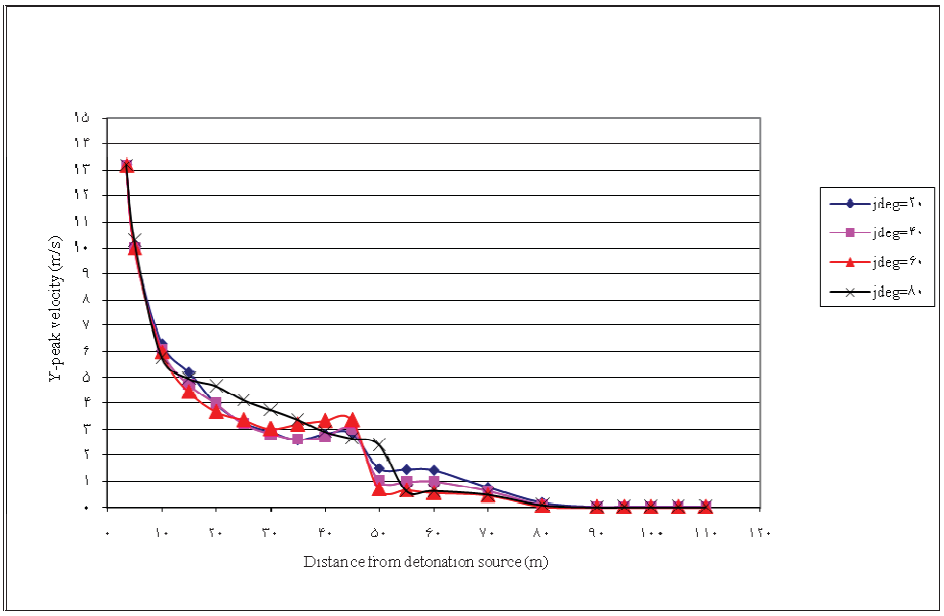
همان‌طور که در نمودار (۲) مشاهده می‌شود، چنانچه زاویه میل درزه نسبت به سطح افق حدود ۶۰-۴۰ درجه باشد، موج انفجار زودتر و بیشتر از سایر حالات دیگر میرا می‌شود. این مطلب بیانگر آن است که، وجود درزه ای که زاویه میل آن ۶۰-۴۰ درجه است، بهترین شرایط را در مقایسه با سایر زوایا برای سازه زیرزمینی در مقابل انفجار سطحی ایجاد می‌کند.

جدول ۱- پارامترهای مکانیکی توده سنگ برای مدل فوق

نوع سنگ	دانسیته (gr/cm^3)	مدول تغییر شکل‌پذیری (MPa)	مدول حجمی (GPa)	مدول برشی (GPa)	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (degree)	مقاومت کششی (MPa)
آهک	۲/۶	۱۰۰۰۰	۵/۵۵	۴/۱۷	۱	۴۵	۰/۰۵

جدول ۲- پارامترهای مکانیکی ناپیوستگی برای مدل‌های فوق

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



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

۵- عمق بهینه تونل و تأثیر ناپیوستگی منفرد

عمق بهینه تونل، عمقی است که زون پلاستیک ناشی از انفجار بمب و موج انفجار ناشی از آن در سطح زمین، پس از انتشار کامل پالس انفجاری در تمام بلوک، تا آن عمق بر پایداری و تحکیمات نهایی تونل تأثیری نداشته و بر مجموعه تونل و تحکیمات نهایی آسیبی وارد نکند. واضح است که ابعاد، خصوصیات، مقدار مواد منفجره و میزان نفوذ بمب در زمین، ابعاد تونل، خصوصیات ساختاری و ژئومکانیکی توده سنگ، این عمق بهینه را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

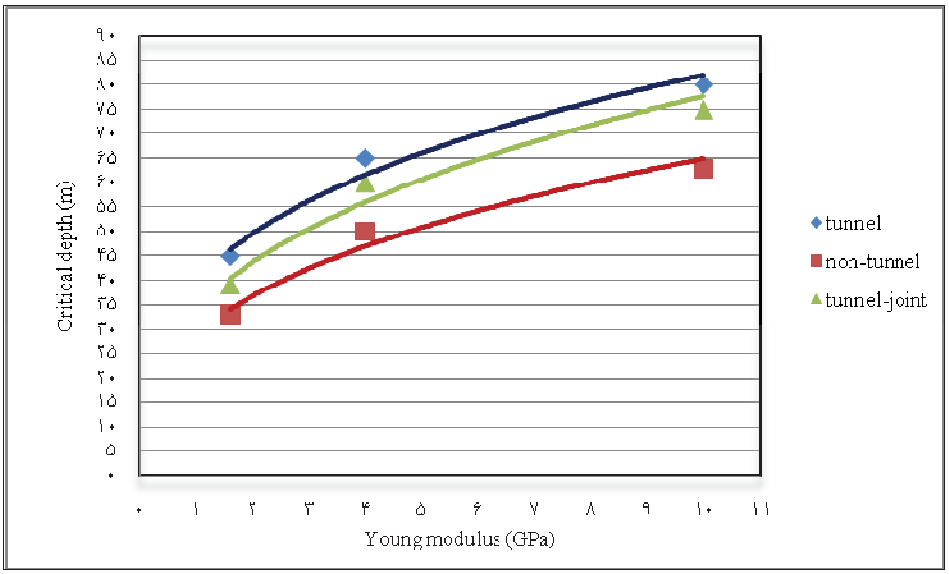
برای مطالعه اثر ناپیوستگی بر عمق بهینه تونل، مدل‌هایی با یک ناپیوستگی افقی در ۲۵ متری سطح زمین که خصوصیات مکانیکی آنها در جدول‌های (۲) و (۳) آمده و مدل شده است - که تقریباً همه مدل‌ها بیانگر این مطلب هستند - وجود یک ناپیوستگی با سختی پایین عمق بهینه تونل را کاهش می‌دهد.

لذا با مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها با عمق بحرانی متناظر با مدول تغییر شکل‌پذیری توده سنگ‌ها (نمودار ۳) ملاحظه می‌گردد که بر اثر ناپیوستگی موجود، عمق بهینه تونل ۱/۵ تا ۲/۵ برابر قطر تونل پایین‌تر از عمق بحرانی است. همچنین عمق بهینه تونل نسبت به حالت بدون درزه، یک برابر قطر تونل کاهش پیدا کرده است.

قابل تذکر است که نمودار (۳) برای سه حالت در یک بستر سنگی مشخص آنالیز صورت گرفته است: حالت اول، در سطح زمین و سنگ، درز وجود ندارد و تونل در عمق بحرانی حفاری شده است. حالت دوم، در سطح زمین درزی وجود ندارد و تونل در عمق حفاری نشده و عمق نفوذ موج انفجار مورد بررسی قرار گرفته است. حالت سوم، در سطح زمین و سنگ، درز وجود دارد و تونل در عمق بحرانی حفاری شده است.

جدول ۳- پارامترهای مکانیکی توده سنگ برای سه مدل فوق

نوع سنگ	دانسیته (gr/cm2)	مدول تغییر شکل‌پذیری (MPa)	مدول حجمی (GPa)	مدول برشی (GPa)	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (degree)	مقاومت کششی (MPa)
شیلی-مارنی	۲/۷	۱۶۰۰	۱/۳۳	۰/۶۲	۰/۱	۲۸	۰/۰۱
آهک مارنی	۲/۵۶	۴۰۰۰	۲/۷	۱/۶	۰/۴	۳۰	۰/۰۴
آهک	۲/۶	۱۰۰۰۰	۵/۵۵	۴/۱۷	۱	۴۵	۰/۰۵

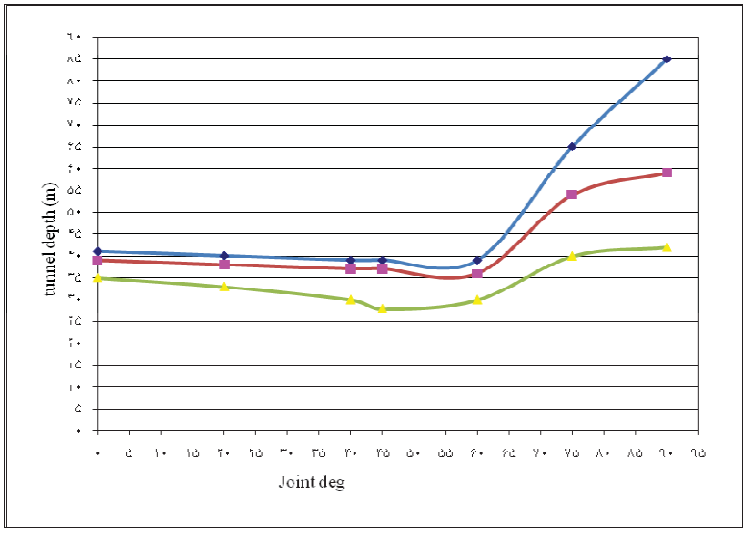


نمودار ۳- مقایسه عمق بحرانی با عمق بهینه تونل در دو حالت بدون درزه و با درزه

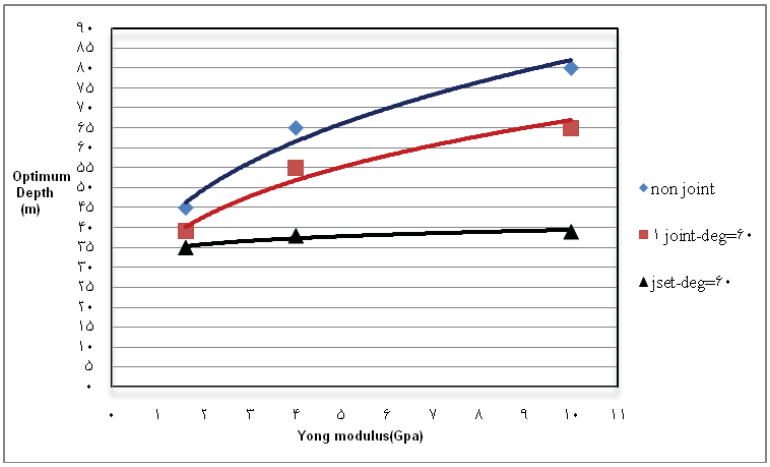
۶- تأثیر زاویه میل ناپیوستگی‌های موازی بر عمق بهینه تونل

برای مطالعه اثر چندین ناپیوستگی موازی بر عمق بهینه تونل، چندین مدل که خصوصیات مکانیکی آنها در جداول ۲ و ۳ آمده است، ساخته شد و عمق‌های بهینه تونل برای هر نوع سنگ با مجموعه ناپیوستگی‌های موازی با زوایای میل مختلف نسبت به سطح افق، برآورد گردید (نمودار ۴). همه مدل‌های ساخته شده بیانگر این مطلب هستند که وجود تعداد بیشتری ناپیوستگی عمق بهینه تونل را نسبت به حالت‌های بدون ناپیوستگی و یا ناپیوستگی منفرد کاهش بیشتری می‌دهد. لذا جهت مقایسه، عمق بهینه تونل در مدل‌هایی با چندین ناپیوستگی موازی با زاویه میل ۶۰ درجه نسبت به مدل‌های با ناپیوستگی منفرد با زاویه میل ۶۰ درجه بررسی گردیده است (نمودار ۵).

همان‌طور که در نمودار (۵) ملاحظه می‌شود با افزایش تعداد ناپیوستگی‌ها، عمق بهینه تونل به‌شدت کاهش یافته است؛ هم‌چنین مشاهده می‌شود در توده سنگ‌های با سختی بیشتر نسبت به توده‌سنگ‌های با سختی پایین با افزایش تعداد ناپیوستگی‌ها کاهش عمق بهینه بیشتر می‌باشد، که این امر نیز دور از انتظار نمی‌باشد؛ زیرا با افزایش تعداد ناپیوستگی‌ها در توده‌سنگ‌های با سختی بالا، خواص آن توده سنگ به خواص توده‌سنگ ضعیف نزدیکتر می‌گردد، هم‌چنان‌که از روی نمودار نیز ملاحظه می‌گردد، عمق‌های بهینه تقریباً در یک حدود می‌باشند.



نمودار ۴- عمق‌های بهینه تونل در سنگ‌های مختلف با چندین ناپیوستگی با زوایای میل مختلف



نمودار ۵- مقایسه عمق بهینه تونل در سه حالت بدون درزه، چندین ناپیوستگی و ناپیوستگی منفرد (با زوایای میل ۶۰ درجه)

۷- نتیجه‌گیری

۱- وجود یک ناپیوستگی با سختی پایین، عمق بهینه تونل را به اندازه یک برابر قطر تونل کاهش می‌دهد؛ به‌طوری‌که عمق بهینه تونل نسبت به عمق بحرانی ۱/۵ تا ۲/۵ برابر قطر تونل در عمق بیشتری قرار خواهد گرفت.

۲- وجود ناپیوستگی‌های با زاویه میل حدود ۶۰-۴۰ درجه نسبت به ناپیوستگی‌های افقی و ناپیوستگی‌های با زاویه میل کمتر یا بیشتر از زاویه فوق، عمق بهینه تونل را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد. لذا می‌توان گفت که وجود درزه‌های مایل در محل احداث سازه زیرزمینی شرایط بهتری را برای سازه در مقابل انفجار سطحی ایجاد می‌کند.

۳- با افزایش تعداد ناپیوستگی‌ها عمق بهینه تونل به‌شدت کاهش می‌یابد به‌طوری‌که در توده‌سنگ‌های با سختی بیشتر، نسبت به توده‌سنگ‌های با سختی پایین با افزایش تعداد ناپیوستگی‌ها کاهش عمق بهینه بیشتر می‌باشد.

مراجع

1. Persen, L.N. (**1975**) "Rock Dynamics and Geophysical Exploration", Introduction to
2. Stress Waves in Rocks, Elsevier Scientific Pub., Developments is Geotechnical Engineering 8, New York.
3. Achenbach, J.D. (**1975**) "Wave Propagation in Elastic Solids", New York, North-Holland Publishing Company.
4. Itasca Consulting Group. INC. (**1999**), "UDEC (Universal Distinct Element Code) Version 3.1 Minneapolis", Icg.
5. Stevens, J.L., Rimer, N. and et al. (**2001**) "Near Field and Regional Modelling of Explosions at the Degelen Test Site", 23th Seismic Reserch Review: Worldwide Monitoring of Nuclear Explosions, October.

Explosion Effect and Angle of Dip of Uncontinuous for Optimum Depth of Tunnel

Sayyed Yahay Rohani[1]

Feriedon Khosravi[1]

Gholamreza Cheraghi[2]

Ali Ebadi [2]

Abstract

Design of underground structure against of kinds of bombs explosion duration influence in earth. In this paper at first is defined component of underground structure and then are considered surface explosion and behavior of tunnel lining. Because aim of construction of tunnels is protecting of people, instrument and equipment versus any kinds of attacks.

However a safe underground structure is a shield and it can propagate waves of explosion. Also will be discussed the parameters of dynamic loading and transmission wave into rocks and soils.

In this research is used UDEC software which is based on finite difference method. Which this software can analysis of dynamic of uncontinuous rocks. For loading, it is necessary to study propagate and damp of wave during surface explosion. Also we will explain about stability and optimum depth of tunnels.

Key Words: *Explosion Wave, Optimum Depth of Tunnel, Critical Depth, Uncontinuous Dip Angle*

1- Associate Professor, Faculty and Research Center of Technology and Engineering of Imam Hossein Comprehensive University Ms in Structure

2- Ms in Civil Envineering