مجله علمی پژوهشی «علوم و فناوری‌های پدافند نوین»
سال هشتم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۶؛ ص ۵۰-۴۵

ارزیابی رفتار سازه‌های زیرزمینی تحت بار انفجار بر مبنای سرعت بیشینه ذرات

صفا پیمان*

۱- مربی و عضو هیئت علمی دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۴/۰۹/۲۲، پذیرش: ۹۵/۰۲/۲۰)

چکیده

تونل‌های زیرزمینی نقش مهمی در محافظت از تأسیسات مهم در برابر نیروهای مختلف از جمله انفجار ایفاء می‌کنند. انفجارهای سطحی و نفوذی می‌توانند سربار تونل و یا محیط در برگیرنده تونل را به زوال برسانند و بار زیادی را به پوشش تونل وارد نمایند. بنابراین جهت دوام تونل می‌بایست بار انفجار در طراحی تونل در نظر گرفته شود تا بتواند بار حاصل از خرابی خاک و سنگ اطراف را تحمل کند. یکی از معیارهای پر کاربرد برای ارزیابی شکست تونل و سازه‌های زیرزمینی، سرعت بیشینه ذرات می‌باشد. در این مقاله، این معیار جهت بررسی رفتار تونل‌های زیرزمینی تحت اثر انفجار سطحی استفاده شده است. در این راستا، با استفاده از شبیه‌سازی عددی رفتار تونل‌های با سطح مقطع مستطیلی و نعل اسبی تحت اثر انفجار سطحی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار LSDYNA استفاده شده است. در ادامه با مقایسه سرعت بیشینه ذرات و تغییر مکان در مرکز سقف و تنش فون مایزز در المان تاج تونل برای مقاطع نعل اسبی و مستطیلی اثر شکل مقطع بر رفتار تونل تحت اثر انفجار بررسی می‌شود. مشاهده می‌شود، در صورتی که ابعاد تونل‌ها یکسان در نظر گرفته شود، محیط دربر گیرنده تونل با مقطع مستطیل شکل مقاومت بیشتری نسبت به محیط دربر گیرنده مقطع نعل اسبی دارا می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: تونل، محیط دربر گیرنده، بیشینه سرعت ذره‌ای، انفجار، سازه مدفون

Analysis of Underground Tunnels in Explosion Loading

S. Peyman*, S. H. Sonbolestan
Imam Hossein University

(Received: 13/12/2015; Accepted:09/05/2016)

Abstract

Underground tunnels, play an important role in protecting important installations from various forces including explosions. Surface and penetrating blasts could deteriorate tunnel surcharge and enveloping space and exert a lot of load on the tunnel lining. Therefore, to withstand the blast, blast load should be taken into account in tunnel design, in such a way that the tunnel could bear the loading caused by devastation of surrounding soil and rock. One of the widely used criteria for assessing failure of tunnel and underground structures due to blast loads is "Peak Particle Velocity". In the present paper, this criteria is employed in order to investigate the behavior of underground tunnels under blast load using of explicit dynamic nonlinear finite element software LSDYNA. Then, effect of cross-section on tunnel under blast load is investigated by compare of the peak particle velocity parameter, displacement of center of roof and Von-Mises stress on the rectangular and horseshoe cross-section. It is seen that, with equal dimension, the environment enveloping the rectangular cross-section, possesses higher resistance than horseshoe cross section.

Keywords: Tunnel, Surface Blast, Peak Particle Velocity, Explosion, Underground Structure

*Corresponding Author E-mail: speyman@ihu.ac.ir

۱. مقدمه

سازه‌های زیرزمینی برای محافظت از تأسیسات مهم نظامی و غیر نظامی در برابر آثار سلاح‌های نفوذ کننده و دقیق دشمن احداث می‌شوند. مجموعه‌های زیرزمینی جزء بهترین گزینه‌ها برای احداث قرارگاه‌های فرماندهی و کنترل، پناهگاه‌های عمومی، انبار سلاح‌ها، تجهیزات مهم و صنایع دفاعی می‌باشند. معمولاً قسمت-های اصلی سازه‌های زیرزمینی دفاعی در عمقی قرار می‌گیرند که ارتفاع سنگ یا خاک محیط اطراف آن‌ها به اندازه‌ای باشد که آسیب‌های کمتری به این قسمت‌ها برسد. عمق سازه‌های زیرزمینی با توجه به اهمیت سازه و تهدید مورد نظر تعیین می‌شود. یکی از موضوعات بسیار مهم درباره سازه‌های زیرزمینی، بررسی خرابی خاک یا سنگ محیط دربر گیرنده آن‌ها تحت اثر انفجار می‌باشد.

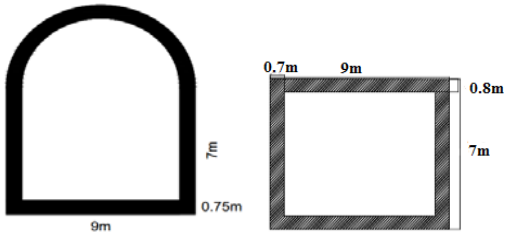
ایمنی و پایداری سازه‌های زیرزمینی اغلب تحت تأثیر خرابی و ارتعاش حاصل از انفجار است. مقدار خرابی به فاصله تا منبع انفجار، وزن ماده منفجره، خصوصیات توده سنگ و پراکندگی درزه در توده سنگ بستگی دارد. بخش مهندسی ارتش آمریکا، چند آزمایش بزرگ انفجار در سال‌های ۱۹۴۸ تا ۱۹۵۲ در نزدیکی تونل بدون پوشش در ماسه سنگ انجام داد. هندرون [۱]، بر اساس آزمایش‌های انجام گرفته توسط بخش مهندسی ارتش آمریکا، مطالعات جامعی برای خرابی تونل در ماسه سنگ انجام داد. در این مطالعه، ناحیه‌های خرابی تونل در ماسه سنگ بر اساس سرعت اوج ذره (PPV)، به چهار ناحیه گسیختگی متناوب (بینابین)، گسیختگی محلی (موضعی)، گسیختگی کلی و بسته شدن دهانه تقسیم شده‌اند. با پیشرفت تکنولوژی و مدل‌سازی در نرم‌افزارهای مختلف عددی، امکان بررسی تونل‌ها تحت نیروی انفجار به وجود آمده است. همچنین تحلیل‌های عددی متعددی برای بررسی انفجار در سازه‌های زیرگذر انجام گرفته است. برای مثال، چیل [۲]پاسخ دینامیکی سایت الکتریکی زیرزمینی را تحت بارگذاری انفجار با استفاده از روش عددی سه‌بعدی بررسی کرد. ونگ و لو [۳]، مدلی را برای تحلیل دینامیکی سازه‌های مدفون در خاک تحت انفجار نفوذی، ارائه دادند. لو [۴]، پاسخ‌های دینامیکی تونل‌ها را در برابر انفجار سطحی بررسی نمود. چوی [۵]، با استفاده از روش المان محدود به بررسی فشار ناشی از انفجار در تونل با پوشش بتنی پرداخت. براساس مدل لو، نقی در سال ۲۰۱۰ تحلیل دینامیکی سازه‌های دفن شده ناشی از انفجار سطحی را انجام داد [۶]. فن [۷]، مشخصه‌های بار روی یک سازه بتنی مدفون شده تحت انفجار سطحی را توسط شبیه‌سازی عددی مطالعه کرد.

با وجود تحقیقات انجام شده هنوز اثر شکل مقطع تونل بر رفتار سازه‌های زیرزمینی تحت اثر انفجار به طور کامل روشن نشده است و تحقیقات بیشتری را می‌طلبد. در این مقاله، با استفاده از شبیه‌سازی عددی رفتار تونل‌های با سطح مقطع مستطیلی و نعل اسبی تحت اثر انفجار سطحی مورد بررسی قرار می‌گیرد. شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار توانمند LSDYNA انجام شده است. در این راستا، ابتدا اعتبارسنجی روش عددی و نرم‌افزار مورد استفاده با مقایسه پاسخ‌های حل عددی با نتایج آزمایشگاهی انجام می‌شود. سپس، با مقایسه سرعت بیشینه ذرات و تغییر مکان در مرکز سقف و تنش فون مایزز در المان تاج تونل برای مقاطع نعل اسبی و مستطیلی اثر شکل مقطع بر رفتار محیط دربر گیرنده تونل تحت اثر انفجار بررسی می‌شود. مشاهده می‌شود، در صورتی که ابعاد مقطع تونل‌ها یکسان در نظر گرفته شود، محیط دربر گیرنده تونل با مقطع مستطیل شکل مقاومت بیشتری نسبت به محیط دربر گیرنده مقطع نعل اسبی دارا می‌باشد.

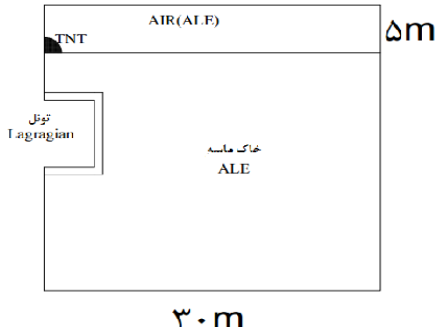
۲. روش تحقیق

۲-۱. مشخصات هندسی تونل

در این تحقیق دو سطح مقطع مستطیلی و نعل اسبی برای تونل‌های تحت اثر بار انفجار سطحی بررسی می‌شود. در شکل (۱) تونلی مستطیل شکل دارای عرض ۹ متر، ارتفاع ۷ متر، ضخامت ۰/۸ متر در سقف و ضخامت ۰/۷ متر در دیواره و تونلی نعل اسبی با ابعاد متناسب با تونل مستطیل شکل نشان داده شده است. ضخامت تونل با مقطع دایره ۰/۷۵ متر می‌باشد. قابل ذکر است طول در نظر گرفته شده برای دو تونل ۳۰ متر می‌باشد. جهت تعریف مسئله یک محیط شامل پوشش تونل، محیط دربر گیرنده تونل از نوع خاک ماسه‌ای، هوای آزاد بر روی محیط دربر گیرنده و ماده منفجره TNT به میزان ۱۰۰۰ کیلوگرم در سطح زمین در نظر گرفته می‌شود. برای محدود کردن این محیط یک معیار مکعبی به ابعاد ۳۰ متر×۳۰ متر×۳۰ متر در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۲) نحوه در نظر گرفتن حجم معیار مسئله نشان داده شده است.



شکل ۱. هندسه مقاطع تونل مستطیل شکل و تونل نعل اسبی



شکل ۲. حجم معیار محیط تونل زیرزمینی

۲-۲. مدل‌سازی

برای مدل‌سازی تونل‌های مورد بررسی تحت اثر بارگذاری انفجاری با نرم‌افزار توانمند LSDYNA صورت می‌گیرد. در این راستا حجم معیار مورد نظر با استفاده از المان‌های مکعبی مش‌بندی می‌شود. حجم مورد نظر شامل چهار ماده هوا، TNT، خاک و تونل است که به دلیل وجود تقارن یک چهارم حجم مورد نظر مدل‌سازی و محاسبات انجام گرفته است. باید دانست، از جابه‌جایی انتقالی عمود بر صفحات متقارن جلوگیری شده است. برای این محیط از المان‌های ۸ گرهی Solid 164 استفاده شده است. درجات آزادی هر گره این المان در سه بعد شامل جابه‌جایی، سرعت و شتاب می‌باشد.

پوشش سازه تونل، از ماده نوع ۳ نرم‌افزار LSDYNA استفاده شده است. این ماده توسط مدل کینماتیک پلاستیک به منظور سادگی و قابل اجرا بودن، مدل می‌شود. این مدل، یک مدل ترکیبی است که ضریب سخت شدگی β برای سازگار کردن مشخصات سخت شدگی ایزوتروپیک و سخت شدگی کینماتیک استفاده می‌شود. پارامترهای اصلی در این مدل شامل دانسیته ρ=۲۶۵۰kg/m^3، مدول الاستیسیته E=۳۹/۱Gpa و ضریب پواسون υ=۰/۲۶، تنش تسلیم σ_y=۱۰۰Mpa، مدول تانژانتی E_{tan}= ۴Gpa، پارامتر سخت شدگی β =۰/۵ و کرنش شکست برای المان‌های فرسایش شده ε_f = ۰/۸ می‌باشند. چون پاسخ بتن مسلح شده به بار دینامیکی همیشه یک پاسخ غیر خطی پیچیده است، تعداد کمی مدل برای بیان رفتار دینامیکی آن تهیه شده است. علاوه بر این پوشش تونل معمولاً بتن مسلح شده است. به همین دلیل برای سادگی، میلگرد فولادی و بتن به صورت سختی معادل EI در این تحقیق فرض می‌شوند [۸].

خاک توسط ماده نوع ۵ از نرم‌افزار LSDYNA مدل می‌شود. پارامترهای اصلی در این مدل شامل دانسیته ρ=۱۲۵۵kg/m^3، مدول برشی G= ۱/۷۲۴Mpa و مدول بالک Ku=۵/۵۱۶Mpa می‌باشند [۹].

هوای فوقانی مطابق ماده نوع ۹ از LSDYNA انتخاب شده است. هوا معمولاً توسط معادله حالت چند جمله‌ای خطی مدل می‌شود که مطابق با رابطه‌های (۱ و ۲) می‌باشد.

$$P = C_0 + C_1 + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E_0 \quad (۱)$$

$$\mu = {}^{\rho}/_{\rho_0} - 1 \quad (۲)$$

در رابطه‌های (۱ و ۲)، C_0، C_1، C_2، C_3 و C_6 همگی برای هوا صفر و C_4 و C_5 هر دو ۰/۴ می‌باشند. چگالی هوا ۱/۲۹ kg/m^3 در نظر گرفته می‌شود و انرژی اولیه هوا، E_0، برابر با ۰/۲۵ Mpa در فشار اتمسفر ۱۰۱/۳ Kpa می‌باشد [۱۰].

درنهایت ماده انفجاری TNT که در سطح زمین و در مرکز سقف تونل قرار گرفته است و از معادله جونز ویکنز لی (JWL) جهت محاسبه فشار آزاد شده از انرژی شیمیایی استفاده می‌کند با ماده نوع ۸ از LSDYNA مدل‌سازی می‌شود. معادله جونز ویکنز لی (JWL) به صورت رابطه (۳) است [۱۱]:

$$P = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1V}\right)e^{-R_1V} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2V}\right)e^{-R_2V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (۳)$$

در این رابطه، p فشار انفجار، E انرژی داخلی بر حجم واحد، V حجم محصول انفجار، A، B، R_1، R_2 و ω ثابت‌های مواد هستند که پارامترهای مربوط به TNT با چگالی ۱۶۳۰ kg/m^3 در جدول (۱) ارائه شده است [۱۲].

جدول ۱. مشخصات مربوط به ماده TNT

A (Mpa)	B (Mpa)	ω	R_1	R_2	E_0 (Mpa)	سرعت (m/s)
۳/۷۴×۱۰^{۵}	۳/۷۵×۱۰^{۳}	۰/۳۵	۴/۱۵	۰/۹	۶×۱۰۳	۶۹۳۵

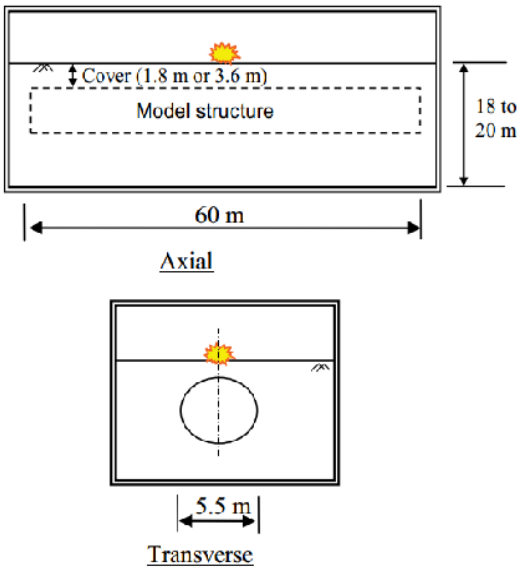
۲-۳. حل‌گرهای عددی

هیدروکدهایی مورد استفاده برای تحلیل مسائل انفجاری، از حل‌گرهای مختلفی استفاده می‌نمایند. حل‌گرهای معمول در نرم‌افزار LSDYNA، از نوع لاگرانژی، اویلری و لاگرانژی- اویلری اختیاری (ALE) می‌باشند. فرمول‌بندی لاگرانژی اندرکنش مواد شامل حالت فنری، لغزش یا اصطکاک را دقیق‌تر ارائه می‌کند. در فرمول‌بندی لاگرانژی حرکت مواد از حرکت شبکه‌بندی نتیجه می‌شود. فرمول‌بندی اویلر نسبت به فرمول‌بندی لاگرانژی قوی‌تر است. به دلیل اینکه در این فرمول‌بندی شبکه‌بندی بدون تغییر باقی می‌ماند و هیچ‌گونه فرورفتگی به وجود نمی‌آید. روش ALE ترکیبی از دو روش قبلی است تا مشکل اعوجاج شدید اجزاء در اثر تغییر شکل‌های بزرگ پلاستیکی را رفع کند [۱۳]. در این توصیف نقاط گرهی در فضای مدل ثابت نیستند (بر خلاف دیدگاه اویلری) و همراه با نقاط مادی هم حرکت نمی‌کنند (بر

خلاف دیدگاه لاگرانژی)، بلکه آن‌ها معادلات حرکت خاص خود را دارند. در این مدل، برای شبکه‌بندی هوا و TNT به دلیل اینکه بعد از انفجار، المان‌های آن‌ها دارای جابه‌جایی‌های بزرگی هستند از محیط لاگرانژی- اویلری اختیاری (ALE) استفاده شده است. همچنین برای شبکه‌بندی خاک از محیط لاگرانژی– اویلری استفاده می‌شود. برای شبکه‌بندی پوشش بتنی تونل مدفون در زیر خاک از محیط لاگرانژی استفاده شده است. فرمولاسیون حجمی تنش ثابت قراردادی (ELFORM=1) برای تونل استفاده می‌شود. حل‌گر مواد چندگانه ALE(ELFORM=11) برای TNT، هوا و خاک در جهت حذف اعوجاج شبکه‌بندی تحت تغییر شکل زیاد استفاده می‌شود. با استفاده از قابلیت‌های مواد چندگانه LS-DYNA به عنوان مواد چندگانه اختصاص داده می‌شود. فرمان CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID برای ایجاد سازوکار کوپله در اندرکنش بین سازه و خاک اعمال می‌شود. این کار اجازه می‌دهد سازوکار کوپله بین لبه یک قسمت جامد و یک یا چند گروه از مواد چندگانه ALE به‌کار رود [۱۴].

۲-۴. صحت‌سنجی

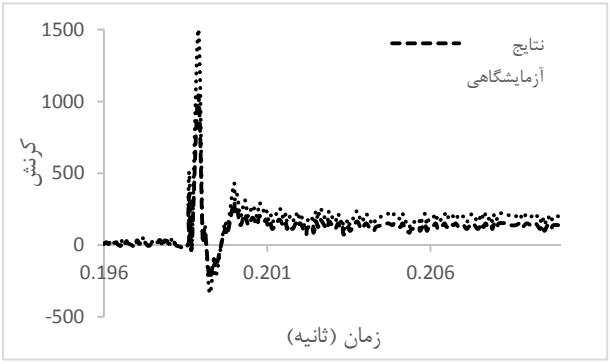
زیمی و همکاران [۱۵] با مدل‌سازی فرایند انفجار در دستگاه سانتریفیوژ، تحقیقات مطلوبی را در این زمینه انجام داده‌اند. آن‌ها در این مطالعات اثر انفجار سطحی بر سازه‌های زیرزمینی را با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ ۱۵۰g-ton موجود در مؤسسه پلی تکنیک رنسلر مورد بررسی قرار دادند. در شکل (۳) ابعاد و موقعیت قرارگیری سازه و ماده منفجره مشاهده می‌شود.



شکل ۳. شماتیک مدل‌سازی سانتریفیوژ

با مقایسه نمودارهای شکل (۴) مشاهده می‌شود که نرم‌افزار LSDYNA از دقت مناسبی برای شبیه‌سازی اثر انفجار سطحی بر تونل‌های زیرزمینی برخوردار است

در این تحقیق اثر انفجار روی تونل دایره‌ای به قطر تقریبی ۵/۵ متر و ضخامت ۱۵ میلی‌متر انجام شده است. تونل در داخل یک لایه خاک یکنواخت خشک و متراکم ماسه‌ای با وزن مخصوص ۱۵/۷ کیلونیوتن بر متر مکعب قرار دارد. مدول الاستیسیته خاک برابر با ۸۰ مگاپاسکال، ضریب پوآسون ۰/۳ و زاویه اصطکاک داخلی برابر با ۳۰ درجه می‌باشند. برای مدل‌سازی در نرم‌افزار LS-DYNA در ابتدا ناحیه مدل در نرم‌افزار ساخته شده و تحت وزن خود به تعادل می‌رسد. در ادامه تونلی با ابعاد ۵/۵ متر در محیط ایجاد شده، پوشش آن بلافاصله بر آن اعمال می‌گردد و سپس تحت اثر انفجار سطحی ۹۰۰کیلوگرم TNT بررسی می‌شود. در شکل (۴)، مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج پژوهش حاضر که از حل عددی با نرم‌افزار LSDYNA به‌دست آمده‌اند، نشان داده شده است



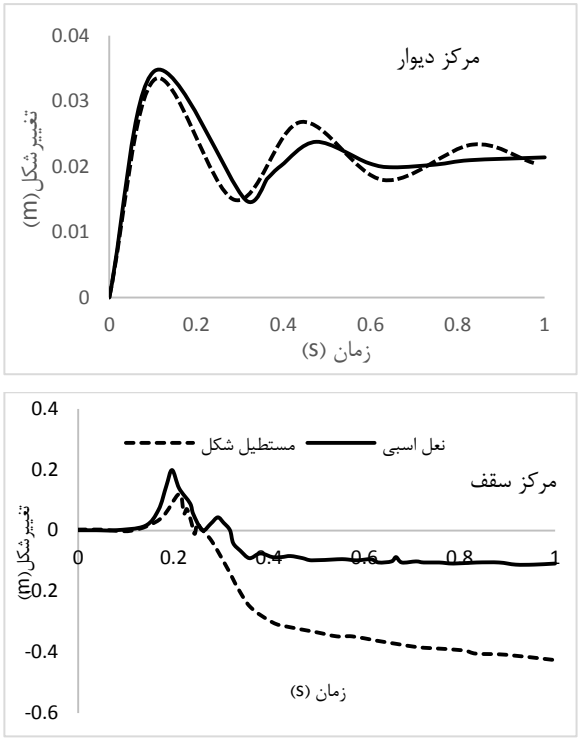
شکل ۴. نمودار کرنش- زمان المان مرکز سقف تونل

۳. نتایج و بحث

اکنون مدل تهیه شده در محیط LSDYNA برای هندسه‌های ارائه شده در بخش ۲، حل می‌گردد.

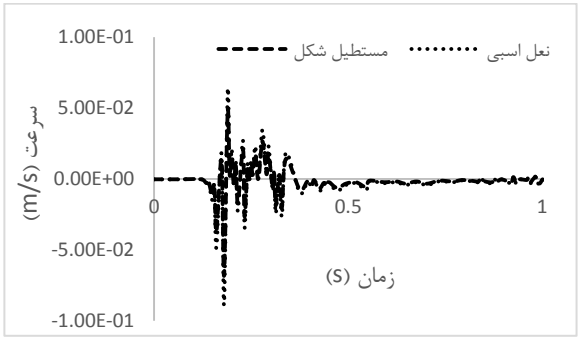
در تونل‌های مستطیل شکل و نعل اسبی، دو نقطه در مرکز دیوار و مرکز سقف به عنوان نقاط بحرانی پیش‌بینی پاسخ دینامیکی تونل در نظر گرفته شده است. پس از حل مدل‌ها، تغییر شکل در مرکز دیوار و مرکز سقف تونل‌ها در شکل (۵) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که حداکثر تغییر شکل مرکز سقف تونل مستطیل شکل از تونل با مقطع نعل اسبی کمتر می‌باشد. از سوی دیگر، دیده می‌شود که با گذشت زمان، پیک‌های تغییر شکل در مرکز دیوار نعل اسبی از تونل با مقطع مستطیل شکل

کمتر است. این موضوع نشان دهنده آن است که تونل نعل اسبی با گذشت زمان از شروع انفجار انرژی کمتری را دریافت می‌کند.



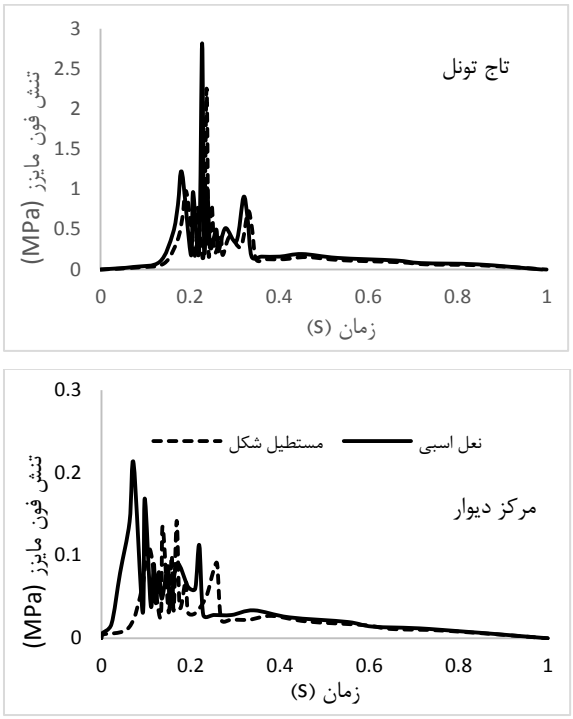
شکل ۵. تغییر شکل در مرکز دیوار و مرکز سقف

همان‌گونه که در شکل (۶) نشان داده شده است، حداکثر سرعت ذرات محیط دربر گیرنده تونل‌های مستطیلی و نعل اسبی در عمق ۱۰ متری از سطح زمین به ترتیب ۰/۰۴۷ و ۰/۰۶۱۹ متر بر ثانیه است. به این ترتیب، مشاهده می‌شود که معیار سرعت بیشینه در مرکز سقف تونل نعل اسبی از تونل مستطیل - شکل بیشتر است



شکل ۶. حداکثر سرعت ذرات در مرکز سقف

برای بررسی رفتار پوشش بتنی تحت اثر بارگذاری انفجاری، تنش مؤثر المان مرکز سقف و مرکز دیوار تونل‌های با مقطع مستطیل شکل و نعل اسبی در شکل (۷) با هم مقایسه شده‌اند



شکل ۷. تنش فون مایزز در المان‌های تاج و مرکز دیوار دو تونل در عمق ۱۰ متری

مشاهده می‌شود که حداکثر تنش فون مایزز در تاج تونل مستطیل شکل ۲/۳ مگاپاسکال و در تونل نعل اسبی ۲/۸ مگاپاسکال است. این مقدار در مرکز دیوار مستطیل شکل و نعل اسبی به ترتیب ۰/۱۳ و ۰/۲ مگاپاسکال می‌باشد. این اختلاف در حداکثر تنش فون مایزز با معیار حداکثر تغییر مکان ذرات رابطه مستقیم دارد.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله به تحلیل رفتار تونل‌های با مقطع مستطیل شکل و نعل اسبی قرار گرفته در عمق ده متری از سطح زمین در برابر بارهای ناشی از انفجار سطحی پرداخته شده است. بررسی نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی نشان می‌دهد که سرعت اوج ذره در مرکز سقف تونل نعل اسبی بزرگ‌تر از تونل مستطیل شکل است. بر اساس معیار هندرون، میزان خرابی در تونل‌ها با افزایش سرعت اوج ذره، افزایش پیدا می‌کند. بنابراین، المان مرکز سقف در تونل نعل اسبی آسیب پذیرتر از این المان در تونل مستطیل شکل است. مقادیر به‌دست آمده برای تنش فون مایزز در المان مرکز سقف تونل‌های مستطیلی و نعل اسبی نیز این موضوع را تأیید می‌نماید. مهم‌ترین دلیلی که می‌تواند تفاوت رفتار را در دو تونل بیان کند، متفاوت بودن طول تماس بین سازه و خاک در این دو مقطع است. سقف تونل مستطیل شکل

نسبت به تونل نعل اسبی، طول تماس بیشتری با خاک دارد و به همین دلیل، معیار حداکثر تغییر شکل و حداکثر سرعت در تونل مستطیل شکل کمتر است. خاطر نشان می‌سازد که طول بیشتر تماس خاک با سازه باعث افزایش صلبیت و پایداری سازه شده است.

۵. مراجع

[1] Hendron, A. J. “Engineering of Rock Blasting on Civil Projects In: Hall, W. J. (Ed)”; Structural and Geotechnical Mechanics; Prentice Hall, New Jersey, 1977.

[2] F. Chill, A.; Sala, F. “Containment of Blast Phenomena in Underground Electrical Power Plants”; Advances in Eng. Software 1998, 29, 7–12.

[3] Lu, Y.; Wang, Z.; Chong, K. “A Comparative Study of Buried Structure in Soil Subjected to Blast Load Using 2D and 3D Numerical Simulations”; Soil Dyn. Earthquake Eng. 25, 2005, 275–288.

[4] Luo, K. S.; Wang, Y.; Zhang, Y. T.; Huang, L. K. “Numerical Simulation of Section Subway Tunnel Under Surface Explosion”; J. PLA Univ. Sci. Tech. (Nat. Sci. Ed.), 2007, 8, 674–679.

[5] S. Choi, J.; Wang, G.; Munfakh, E. D. “3D Nonlinear Blast Model Analysis for Underground Structures”; Proc. GeoCongress 2006: Geotechnical Eng. in the Inf. Tech. Age, ASCE, Atlanta, Georgia, United States, 2006.

[6] Nagy, N.; Mohamed, M.; Boot, J. C. “Nonlinear Numerical Modeling for the Effects of Surface Explosions on Buried Reinforced Concrete Structures”; Geomechanics Eng. 2010, 2, 1-18.

[7] Fan Junyu, Fang Qin, Liu Jinchun. “Characteristics of Loads on Shallow-Buried Structures under the Ground Explosions”; J. of PLA Univ. of Sci. and Tech. (Natural Science), 2008, 9, 676–680.

[8] Yang, Y.; Xie, X.; Wang, R. “Numerical Simulation of Dynamic Response of Operating Metro Tunnel Induced by Ground Explosion”; J. of Rock Mech. and Geotechnical Eng. 2010, 2, 373-384.

[9] Kulak, R. F.; Bojanowski, C. “Modeling of Cone Penetration Test Using SPH and MM-ALE Approaches”; 8th European LS-DYNA User Conf. Strasbourg, 2011, 1–10.

[10] Hu, Q.; Yu, H.; Yuan, Y. “Numerical Simulation of Dynamic Response of an Existing Subway Station Subjected to Internal Blast Loading”; Trans. of Tianjin Univ. 2008, 563-568.

[11] Baudin. G.; Serradeill. R. “Review of Jones-Wilkins-Lee Equation of State”; Published by EDP Sci. 2010.

[12] Jha, N.; Kiran Kumar, B. S. “Air Blast Validation Using ANSYS/AUTODYN”; International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 2014, 3.

[13] Cheng, D.; Hung, C.; Pi, S. “Numerical Simulation of Near-Feld Explosion”; J. Appl. Sci. Eng. 2013, 16, 61–67.

[14] LS-DYNA (ANSYS 14) Keyword User’s Manual.

[15] Anirban, D.; Thomas F. Z.; Tarek A. “Physical Modeling of Explosive Effects on Tunnels”; Int. Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt am Main, Germany, 2010.