

ارزیابی تأثیر تزریق دوغاب سیمان بر مقاومت فضاهای زیرزمینی در برابر بار انفجار

حامد حسین پور^۱، سید حسین میرزینالی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد دانشگاه علم و صنعت ایران، ۲- استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۹۱/۰۴/۰۳، پذیرش: ۹۲/۰۲/۱۰)

چکیده

امروزه در شرایط بحران‌های طبیعی و نظامی، پناهگاه‌ها و فضاهای زیرزمینی از جمله گزینه‌های خروج از شرایط بحران به حساب می‌آیند. در سال‌های اخیر از دیدگاه پدافند غیرعامل، سازه‌های مدفون به‌عنوان سازه‌هایی امن در برابر حملات هوایی و موشکی مورد توجه قرار گرفته‌اند. بنابراین این گونه سازه‌ها به‌عنوان امکانات شهری در زمان صلح و عاملی برای حفظ جان مردم در هنگام بلایای طبیعی و نظامی محسوب می‌شوند. در این پژوهش، تأثیر تزریق دوغاب سیمان و اصلاح خاک اطراف تونل بر کاهش اثرات ناشی از بار انفجار بر سازه تونل، با استفاده از مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار FLAC2D، بر قسمتی از تونل خط ۷ مترو تهران بررسی شده است. مشخصات در نظر گرفته شده برای خاک اطراف تونل، نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری انجام گرفته بر خاک آبرفت C تهران است. در نهایت با استفاده از درون‌یابی در نرم‌افزار MATLAB، دو رابطه برای پیش‌بینی میزان جابه‌جایی تاج تونل و تنش وارد بر پوشش نهایی تونل، با توجه به پارامترهای مختلف خاک، تونل و بمب، به‌جهت استفاده در مراحل ابتدایی طراحی تونل برای این منظور، استخراج شده است.

کلیدواژه‌ها: بارگذاری انفجاری، تونل مترو، تزریق و اصلاح خاک، عمق نفوذ بمب.

Assessment of Grouting Effect on Resistance of Underground Spaces Against Blast Loading

H. Hoseinpour, S. H. Mirzeinaly*

Malek Ashtar University of Technology

(Received: 23/06/2012; Accepted: 30/04/2013)

Abstract

Shelters and underground spaces are among the options to come out from the crisis situation in natural and military disasters. In recent years, from the passive defense viewpoint, buried structures have been considered as safe structures against the air and missile attacks. From this perspective, these structures are a part of the main facilities in peacetime and are important factors to save lives in the event of a natural disaster and during the wars. In this study, the effects of grouting around a tunnel to reduce the impact of blast loads on the tunnel structure is evaluated by the numerical modeling software FLAC 2D, in a part of line 7 of the Tehran subway. Intended specifications for the soil around the tunnel, are the results of uniaxial compression tests conducted on some soil samples made from the Tehran alluvial type C. Finally by carrying out an interpolation in the MATLAB software, two equations have been derived to predict displacement and stresses of the tunnel lining (due to the various parameters of the soil, tunnel and bomb) in order to use in the initial stages of tunnel designing for this purpose.

Keywords: Blast Loading, Tehran Placer Bloc C, Ground Improvement, Bomb Penetration Depth.

* Corresponding Author E-mail: M_Yazdi@mut.ac.ir

۱. مقدمه

به دلیل دوره کوتاه بارگذاری انفجاری، پاسخ اولیه اجزاء بسیار مهم است که این مسئله شامل تغییر شکل پلاستیک خاک در همسایگی انفجار می‌شود. در نتیجه خواص خاک در این محدوده به‌صورت پلاستیک و خاک با فاصله دورتر از آن به صورت الاستیک در نظر گرفته می‌شود. از آنجایی که تحت بارگذاری انفجاری، زمانی برای زهکشی وجود ندارد، توده خاک می‌تواند به‌عنوان یک مصالح تک فاز تحت این شرایط در نظر گرفته شود و یک توزیع تنش کلی انجام شود [۷ و ۸].

پاسخ سازه حفر شده، زمانی به‌دقت پیش‌بینی می‌شود که یک مدل عددی از سیستم انفجار-خاک-سازه، توسعه پیدا کند. انواع مختلف روش‌های عددی برای مطالعه پاسخ سازه‌های بتنی حفر شده تحت بارگذاری انفجاری مورد استفاده قرار گرفته‌اند که می‌توانند به‌صورت سیستم‌های پیوسته و یا مجرد طبقه‌بندی شوند.

در سیستم‌های مجرد، فرایند فیزیکی اصلی به چند مرحله قابل دست‌یابی تقسیم شده است که نتایج هر مرحله، ورودی‌های مراحل بعدی می‌باشند. حل مسئله می‌تواند در سه مرحله به‌دست آید که به‌صورت زیر است: ۱- فرایند انفجار و تشکیل حفره انفجار، ۲- انتشار موج انفجار، ۳- پاسخ سازه به‌صورت مجرد. بسیاری از مطالعات عددی با استفاده از سیستم‌های مجرد انجام شده‌اند [۹ و ۱۰].

در سیستم‌های مجرد، ابتدا تاریخچه تنش‌های میدانی اندازه‌گیری می‌شوند و سپس این تاریخچه‌ها به‌صورت شرایط مرزی برای ارزیابی پاسخ سازه بر آن اعمال می‌شوند. بنابراین، درکنش بین خاک و سازه به‌صورت واقعی نمی‌توانند در نظر گرفته شوند. در فرایند تحلیل سیستم‌های پیوسته، مراحل سه‌گانه بالا به دو مرحله کاهش می‌یابد، به این صورت که دو مرحله ابتدایی یا دو مرحله انتهایی با یکدیگر ترکیب می‌شوند.

در این مطالعه، با فرض مدل رفتاری الاستیک برای خاک، یک مدل سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار تحلیل عددی FLAC 2D که محاسبات آن بر پایه روش تفاضل محدود است، برای تحلیل اثرات ناشی از بار انفجار بر سازه قسمتی از تونل خط ۷ مترو تهران انجام شده است. با استفاده از نتایج تعدادی آزمایش انجام شده در قبل و بعد از عملیات تزریق بر روی خاک آبرفت C تهران (تیپ خاک محل مورد مطالعه)، که قسمت عمده خاک بستر این شهر را تشکیل می‌دهد، خصوصیات خاک اطراف تونل در مدل ایجاد شده برابر خصوصیات این خاک در نظر گرفته شده است تا تأثیر تزریق بر کاهش اثر ناشی از بار انفجار بر پوشش نهایی تونل بررسی شود. در نهایت با حساسیت‌سنجی و انجام برآزش بین پارامترهای مؤثر در پاسخ تونل از قبیل جنس خاک، عمق حفاری تونل، طول گمانه‌های تزریق، نسبت آب به سیمان، دوغاب تزریق و شدت بارگذاری انفجاری، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، دو رابطه برای پیش‌بینی میزان جابه‌جایی تاج تونل و تنش وارد بر پوشش نهایی تونل در اثر بار انفجار ارائه شده است.

در سال‌های اخیر از دیدگاه پدافند غیرعامل، سازه‌های مدفون به‌عنوان سازه‌هایی امن در برابر حملات هوایی و موشکی مورد توجه قرار گرفته است. تجربیات به‌دست آمده در طول جنگ‌ها به‌ویژه در کشور ما، نشان می‌دهد که یکی از مهم‌ترین عوامل پیشبرد اهداف نظامی حفظ تجهیزات و تأسیسات از دسترس حملات هوایی و موشکی دشمن است. برای این منظور، تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی به‌عنوان زیرساخت‌های مهم شهری در زمان صلح و از عوامل مهم حفظ جان مردم در هنگام وقوع بلایای طبیعی و پیشبرد اهداف نظامی ذکر شده در زمان جنگ هستند [۱]. برای مقاوم‌سازی انفجاری سازه‌ها، استاندارد شناخته شده یا کاربردی زیادی وجود ندارد. این مسئله، نتیجه طبقه‌بندی سَرّی اطلاعاتی و تکنولوژی نظامی، از قبیل متدهای طراحی و تکنولوژی توسعه یافته ساخت برای حفاظت تأسیسات نظامی است که اطلاعات مورد نیاز در این زمینه را دور از دسترس ساخته است. علاوه بر این در مطالعات تجربی مربوط به هر ترکیبی از سازه‌های خاص، مدل‌سازی با ابعاد واقعی، به‌ویژه در نشان دادن وزن سربار ناشی از خاک، گران و غیرواقعی به‌نظر می‌رسد. مدل‌سازی عددی، یک روش به نسبت اقتصادی است که به‌مرور، به‌عنوان یک ابزار ناگزیر در تحلیل و طراحی مهندسی تبدیل می‌شود [۲].

محیط اطراف تونل می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر میزان حفاظت تونل در برابر خطرهای ذکر شده داشته باشد. یکی از روش‌های پایدارسازی زمین، استفاده از تزریق در خاک برای به حداقل رساندن نفوذپذیری و یا افزایش مقاومت خاک است. با توجه به گسترش روزافزون فضاهای زیرزمینی در شهرها و لزوم امکان عبور سازه‌های سست، مطالعه اثرات تزریق و پارامترهای مؤثر بر خاک‌های آبرفتی که تشکیل دهنده بخش عمده بستر مناطق شهری است ضروری به‌نظر می‌رسد.

۲. مطالعات انجام شده

در طی نیم قرن گذشته در ایالات متحده، یک برنامه تحقیقاتی جامع برای افزایش مقاومت سازه‌های نظامی در برابر بار انفجار از قبیل زاغه‌های مهمات و تسهیلات ارتباطی در دست انجام بوده است. عمده این تحقیقات، در پاسخ به توسعه سلاح‌های پرتابه‌ای و بالستیک انجام شده است. تعدادی از آئین‌نامه‌های مورد استفاده برای سازه‌های محافظ در برابر سلاح‌های هسته‌ای و مرسوم توسعه پیدا کرده که این آئین‌نامه‌ها پیشرفت‌های عملی در مهندسی را بیان می‌کنند [۳ و ۴].

مطالعات زیادی در اندرکنش دینامیکی خاک-سازه و به‌طور عمده برای نیم فضای نیمه نامتناهی، خطی، و همسان انجام شده که در آن، پاسخ نیم فضای الاستیک از طریق رابطه تجربی تعیین فرکانس رزونانس در خاک مرتعش به‌دست آمده است [۵ و ۶].

۳. شرح پدیده انفجار

۳-۱. قوانین مقیاس کردن موج انفجار

تمام پارامترهای انفجار، به طور عمده وابسته به مقدار انرژی رها شده انفجار در قالب موج انفجار و فاصله از مرکز انفجار می‌باشند. یک توصیف عمومی بین‌المللی اثرات انفجار می‌تواند با مقیاس کردن فاصله نسبت به عبارت $(E/P_0)^{1/3}$ و مقیاس کردن فشار نسبت به P_0 به دست آید. که در آن E انرژی رها شده بر حسب (kJ) و P_0 فشار محیط است، (به طور نمونه 100 kN/m^2). برای راحتی، شرح ورودی انفجار به صورت خرج انفجار W یا جرم TNT در نظر گرفته می‌شود سپس نتایج به صورت تابعی از پارامتر فاصله ابعادی (فاصله مقیاس شده) به دست می‌آید: $Z = R/W^{1/3}$ که در آن R فاصله مؤثر واقعی از مرکز انفجار است و W به صورت کیلوگرم (وزن معادل TNT) بیان می‌شود. قوانین مقیاس کننده، تصحیح پارامتریک بین انفجارهای ویژه و یک خرج استاندارد از همان ماده را فراهم می‌کند.

۳-۲. پیش‌بینی فشار ناشی از انفجار

پارامترهای موج انفجار برای مصالح انفجاری مرسوم، در شماری از مطالعات، در محدوده سال‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ متمرکز شده است. تخمین بیشینه فشار براساس فاصله مقیاس شده $Z = R/W^{1/3}$ در یک مورد به این صورت معرفی شده است [۱۱]:

$$P_{so} = \frac{6.7}{Z^3} + 1 \text{ bar} \quad (P_{so} > 10 \text{ bar})$$

$$P_{so} = \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019 \text{ bar} \quad (0.1 \text{ bar} < P_{so} < 10 \text{ bar})$$

همچنین یک رابطه برای محاسبه بیشینه فشار انفجار در واحد بار P_{so} برای انفجارهای با خرج بالا در سطح زمین نشان داده شده است [۱۲]:

$$P_{so} = 6784 \frac{W}{R^3} + 93 \left(\frac{W}{R^3}\right)^{\frac{1}{2}}$$

توصیف دیگری از بیشینه فشار انفجار با واحد kPa معرفی شده که در آن، W به عنوان خرج معادل در واحد کیلوگرم TNT و Z فاصله مقیاس شده است [۱۳]:

$$P_{so} = \frac{1772}{Z^3} - \frac{114}{Z^2} + \frac{108}{Z}$$

در حالی که موج انفجار از طریق اتمسفر منتشر می‌شود، فضای پشت جبهه انفجار با سرعت پایین حرکت می‌کند، بنابراین سرعت اجزای هوا و فشار باد، وابسته به بیشینه فشار موج انفجار است.

۳-۳. مشخصات بمب

مطالعات تئوری و تجربی زیادی در زمینه انفجارها و تأثیرات آنها توسط آژانس‌های مختلف انجام شده است. در راهنمای منتشر شده توسط ارتش آمریکا، اطلاعاتی برای تخمین بار ناشی از سلاح‌های انفجاری تهیه شده است. با توجه به تعدد توسعه این سلاح‌ها و اصلاحات انجام شده بر روی آنها، درجات خطر متفاوتی برای این

سلاح‌ها معرفی شده است. لازم به ذکر است که در این پژوهش، بمب با قدرت تخریب بالا (GP۲۰۰۰) در نظر گرفته شده است [۱۴ و ۹].

بمب به داخل زمین نفوذ می‌کند و سبب خسارات قابل ملاحظه‌ای در مجاورت سازه‌های حفاری شده می‌شود. خصوصیات عمومی بمب به صورت زیر است:

جدول ۱. مشخصات مربوط به بمب (GP ۲۰۰۰) آمریکایی [۹،۱۴]

مشخصه	وزن کل (kg)	وزن خرج (kg)	قطر بدنه (mm)	نسبت لاغری	سرعت برخورد (m/s)
مقدار	۹۵۰	۵۰۰	۵۸۵	۳	۳۳۵

۳-۴. عمق نفوذ بمب

تحقیقات نشان می‌دهد که تنش‌های منتشر شده از حفره انفجار از نظر مقدار، نسبت به تنش‌های ناشی از انفجار در فضای آزاد، بزرگ‌تر بوده و زمان تأثیر طولانی‌تری دارند. بنابراین به دست آوردن عمق نفوذ و انفجار بمب، نسبت به بار ناشی از آن ضروری است و معمولاً محاسبه دقیق عمق نفوذ بمب مشکل است. عمق نفوذ بمب (GP ۲۰۰۰) به داخل زمین با نوع خاک در مقابل آن تغییر می‌کند و معمولاً از یک مسیر L شکل پیروی می‌کند به گونه‌ای که عمق نهایی نفوذ، کمتر از طول مسیر نفوذ است.

با توجه به عمق نفوذ محاسبه شده در در یکی از گزارشات [۲] (۸/۸ متر) و مقایسه عدد آزمایش SPT در آن (SPT=۴۰) با عدد آزمایش SPT در این تحقیق (SPT=۶۰)، با درون‌یابی خطی عمق نفوذ بمب در این پژوهش برابر ۶ متر در نظر گرفته شده است (شکل ۱).

۳-۵. دهانه انفجار

دهانه انفجار معمولاً حفره‌ای در زمین است که توسط انفجار ایجاد می‌شود. عواملی از قبیل نوع و حجم انفجار، عمق نفوذ بمب و نوع مصالح زمین، ابعاد نهایی حفره را کنترل می‌کنند. لازم به ذکر است حفره‌ای که در خاک ماسه‌ای تشکیل می‌شود کوچک‌تر از حفره‌ای است که در خاک رس تشکیل می‌شود. استفاده از رابطه ارائه شده توسط انجمن مهندسين ارتش آمریکا به عدد بسیار بزرگی برای حفره انفجار می‌انجامد که از نظر مهندسی قابل قبول نیست. در این پژوهش تخمین اولیه قطر حفره انفجار با درون‌یابی بر اساس عدد SPT نسبت به مقدار فرض شده در گزارش [۲]، برابر ۲/۵ متر به دست می‌آید (شکل ۱).

۳-۶. بار ناشی از انفجار

تأثیر انفجار به صورت موج ضربه ای متشکل از ضربه با فشار زیاد است که از مرکز انفجار با شدت فشار کاهش یابنده با مسافت به اطراف گسترش پیدا می‌کند. در حالی که جبهه موج با تونل برخورد می‌کند، قسمتی از تونل با فشار شوک محاصره می‌شود. حجم و توزیع بار انفجار، بسته به هندسه و انعطاف‌پذیری دیاگرام فشار در

به طوری که یک انفجار در خاکی با سرعت انتشار موج بالا از قبیل رس اشباع شده، موج‌های با فرکانس و شتاب بالا و جابه‌جایی کم ایجاد می‌کند. همچنین انفجار در مصالح خشک و سست، حرکات با دوره‌های طولانی و فرکانس پائین ایجاد می‌کند. در این پژوهش مقدار P_0 در جداره حفره انفجار برابر 20 MPa در نظر گرفته شده است [۲].

۴. روش انجام آزمایش تزریق

۴-۱. زمین‌شناسی آبرفت‌های تهران

طبقه‌بندی رسوبات آبرفتی درشت دانه تهران، اولین بار توسط ربین در سال‌های ۱۹۵۳-۱۹۶۶ انجام شده و نتایج تحقیقات انجام شده توسط محققین دیگر، تغییر عمده‌ای در این تقسیم‌بندی ایجاد نکرده است [۱۵].

۴-۲. شرایط خاک در محل تونل

تعیین مشخصات ژئوتکنیکی زمین با آزمایش‌های درجا یا صحرائی، از جمله مهم‌ترین مطالعاتی است که قبل از احداث سازه‌های زیرزمینی انجام می‌شود. نتایج مطالعات ژئوتکنیک و مهندسی پی، در محل تقاطع خطوط ۲ و ۷ مترو تهران (پایین‌تر از تقاطع خیابان آذربایجان با بزرگراه نواب در کیلومتر ۱۴+۶۰۰، پروژه خط ۷ جهت استفاده به‌عنوان خصوصیات خاک مورد استفاده در تحلیل‌ها در نظر گرفته شده است.

ضخامت خاک روی تونل در این محل حدود ۱۳ تا ۱۸ متر اندازه‌گیری شده است. تا عمق حفاری (۶۵ متری)، لایه‌های زیرسطحی به‌طور عمده به‌صورت لایه‌های شنی و ماسه‌ای قلوه سنگ‌دار شناسایی شده است. ضخامت لایه خاک دستی بین ۱ تا ۳/۵ متر متغیر می‌باشد. همچنین در ضمن حفاری‌های انجام شده به آب زیرزمینی برخورد نشده است. با توجه به نتایج آزمایش SPT، وضعیت خاک محل تونل به‌صورت خیلی متراکم توصیف می‌شود. برای تعیین خصوصیات برشی خاک، با استفاده از آزمایش برش برجا، نتایج این آزمایش در عمق‌های مختلف محل مورد مطالعه آورده شده است. در این آزمایش‌ها مقدار چسبندگی (C) نمونه‌ها ۰/۱۲ تا ۰/۴۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و مقدار زاویه اصطکاک داخلی (Φ) حدود ۳۵ تا ۳۸ درجه به‌دست آمده است [۱۶].

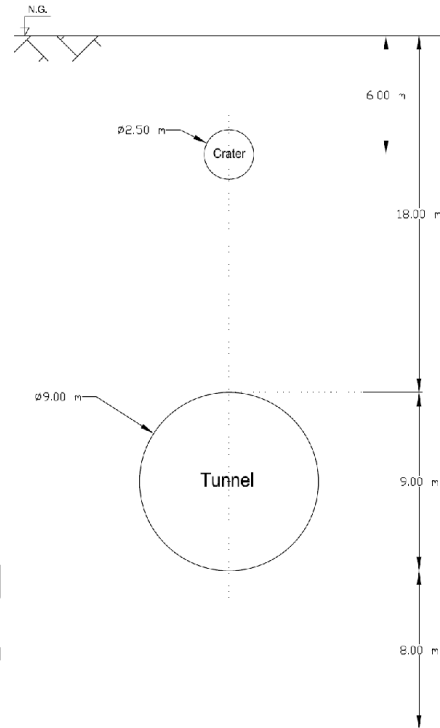
۴-۳. آماده‌سازی نمونه‌های خاک و انجام عملیات تزریق

به‌منظور انجام آزمایش‌ها، با توجه به گستردگی دانه‌بندی در آبرفت تیپ C از یک سو و محدودیت‌های موجود در تعداد نمونه‌های مورد آزمایش از سوی دیگر، نمونه‌ها ابتدا براساس چهار دانه‌بندی متفاوت خاک که بیانگر تمام خواص خاک‌های محدوده دانه‌بندی آبرفت C تهران می‌باشند ساخته شده است.

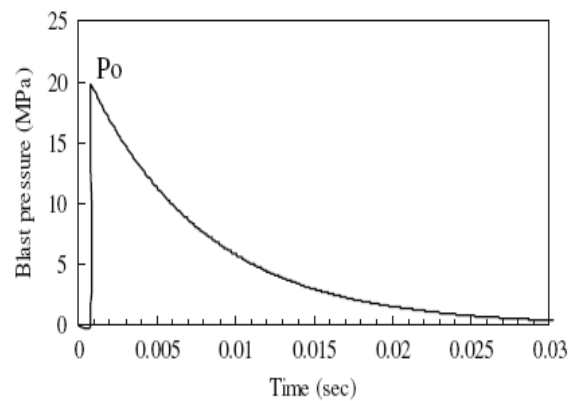
نمونه‌های مورد نظر، با دو درصد تراکم ۵۰٪ و ۷۰٪ درون قالب‌های شفاف استوانه‌ای متراکم شده‌اند. بعد از تخلیه خاک تزریق

مقابل زمان و خصوصیات دینامیکی خاک، بر تونل اثر می‌گذارد.

بر انفجار می‌تواند به‌صورت یک ضربه با یک دیاگرام مقدار- زمان به‌صورت نمایی مشخص شود که به‌سرعت، از لحاظ مقدار و دامنه در حال انتشار کاهش می‌یابد (شکل ۲).



شکل ۱. ابعاد در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی [۲۰]



شکل ۲. دیاگرام فشار انفجار- زمان وارد شده بر مرز داخلی حفره انفجار [۲]

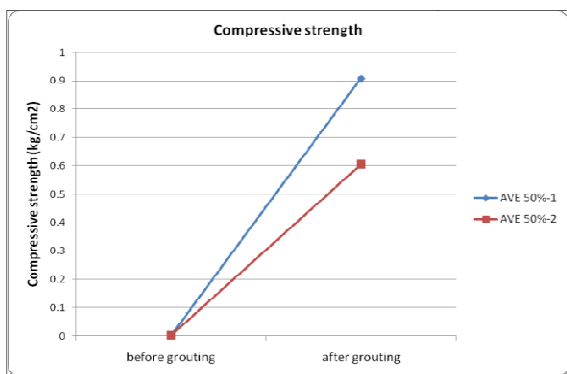
مقدار موج ضربه از P_0 به‌صورت یکنواخت در طول زمان تا حدود صفر به صورت معادله زیر کاهش می‌یابد:

$$P_t = P_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (۴)$$

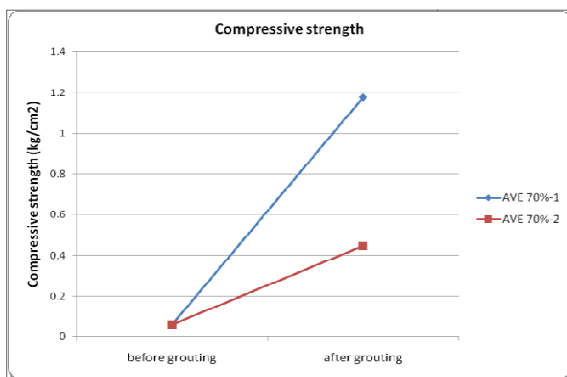
که P_t فشار انفجار در هر زمان داده شده t است. لازم به ذکر است که زمان رسیدن به t_a به‌صورت معکوس متناسب با سرعت لرزه‌ای است،



شکل ۳. یک نمونه شکسته شده با زاویه تقریباً ۴۵ درجه [۱۷]



شکل ۴. افزایش مقاومت برای نمونه‌های با تراکم ۵۰٪ [۱۷]



شکل ۵. افزایش مقاومت برای نمونه‌های با تراکم ۷۰٪ [۱۷]

۵-۱. مدل‌های تشکیل‌دهنده و پارامترهای مصالح

خاک: با توجه به این که خاک اطراف حفره انفجار، تحت بارگذاری شدید انفجاری گسیخته می‌شود، مدل الاستو پلاستیک مور-کولمب برای نشان دادن رفتار خاکی که تغییر شکل‌های زیادی را تحمل می‌کند انتخاب می‌شود. شکست آن مطابق با معیار مور-کولمب (تابع مقاومت برشی) بدون تحمل کشش، توسعه می‌یابد. در FLAC، پارامترهای همراه با مدل مور-کولمب برای یک تحلیل زهکشی نشده شامل این موارد می‌باشند: وزن واحد γ (کیلوگرم بر مترمکعب)، مقاومت برشی زهکشی نشده C_u (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)، مدول یانگ E (پاسکال)، و ضریب پواسون ν [۱۶]. همچنین میرایی برابر

شده از درون قالب‌ها، نتیجه عملیات تزریق دوغاب سیمان با استفاده از مشاهدات بصری با سه عبارت موفق، ناکافی و ناموفق ثبت شده است. میزان دوغاب خوری هر نمونه خاک، با استفاده از اختلاف وزن نمونه قبل و بعد از تزریق به‌دست آمده است [۱۷].

۴-۴. افزایش مقاومت تک‌محوری نمونه پس از تزریق

به‌منظور رسیدن دوغاب سیمانی به مقاومتی مطلوب، نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز داخل کیسه پلاستیکی قرار داده شدند تا عمل‌آوری دوغاب سیمانی با رطوبت داخل نمونه انجام شود. سپس برای اینکه بارگذاری در آزمایش تک‌محوری به‌صورت یکنواخت روی نمونه استوانه‌ای وارد شود، درپوش‌گذاری در دو طرف نمونه‌ها با استفاده از اندود گچی انجام شده و نمونه‌ها تحت آزمایش تک‌محوری قرار گرفتند. در شکل (۳) یک نمونه شکسته شده با زاویه تقریباً ۴۵ درجه ملاحظه می‌شود.

همان‌طور که انتظار می‌رفت با انجام عملیات تزریق، مقاومت نمونه‌ها افزایش یافته است که تأثیر تزریق بر این افزایش مقاومت، برای نمونه‌های با درصد تراکم پایه ۵۰٪ بیشتر است و دلیل آن مقاومت پایه کمتر نمونه‌های با درصد تراکم ۵۰٪ و میزان دوغاب‌خوری بیشتر این نمونه‌ها است (شکل‌های ۴ و ۵).

همان‌طور که در شکل‌های (۴ و ۵) دیده شد، برای نمونه‌های با درصد تراکم پایه ۵۰٪ و نسبت آب به سیمان ۱، حدود ۳۰۰ برابر افزایش مقاومت رخ داده است و نیز برای همین نمونه‌ها و نسبت آب به سیمان ۲، حدود ۲۰۰ برابر افزایش مقاومت ملاحظه می‌شود. همچنین برای نمونه‌هایی با درصد تراکم پایه ۷۰٪ و نسبت آب به سیمان ۱، افزایشی در حدود ۲۰ برابر در میزان مقاومت نمونه‌ها رخ داده و همچنین برای نمونه‌های با نسبت آب به سیمان ۲، حدود ۸ برابر افزایش مقاومت ایجاد شده است [۱۷].

۵. مدل‌سازی عددی

برای تحلیل انتشار امواج در شبکه غیرخطی پیوسته با تغییر شکل‌های زیاد، مدل‌سازی عددی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، به‌دلیل اینکه شرایط مرزی پیچیده و مدل‌های خاک مورد استفاده می‌توانند به‌صورتی معقول با معادلات ساده در نظر گرفته شوند. برنامه تفاضل محدود مورد استفاده در این مطالعه FLAC2D است که برای مدل‌سازی سیستم‌های غیرخطی مناسب است. این برنامه، معادلات حرکت دینامیکی را به‌گونه‌ای تطبیق می‌دهد تا از یک تعادل عددی هنگام ناپایداری سیستم فیزیکی مدل شده مطمئن شود [۱۸].

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، انتشار ضربه در شبکه زمین، تابعی از خصوصیات دینامیکی خاک، نوع مصالح انفجار و هندسه انفجار است با ساده‌سازی انجام شده، انتشار سه‌بعدی موج انفجار به‌وسیله موج انفجار دو بعدی تحلیل شده است.

(25 N/mm^2) ، A_{st} سطح مقطع کل فولاد است. در نتیجه e_b برابر است با ۱۱۱ میلی‌متر که با تقسیم مقادیر ممان‌های به‌دست آمده در جدول حساسیت سنجی المان‌های سازه‌ای (جدول ۲)، مقادیر نیروی محوری متناظر با ممان‌ها به‌دست می‌آید. مجموع این مقادیر با نیروی محوری موجود در المان‌ها می‌تواند در طراحی مقطع پوشش نهایی تونل مورد استفاده قرار گیرد. با تقسیم این مقدار نیروی به‌دست آمده بر مقطع پوشش تونل، تنش وارد بر پوشش نهایی تونل به‌دست می‌آید.

۲-۵. مراحل مدل‌سازی

در حین اجرای تحلیل استاتیکی برنامه، برای دستیابی به حالت تنش‌های درجا، هر دو مرز راست و چپ در جهت افقی گیردار شده، در حالی که مرز پائین در هر دو جهت افقی و عمودی محدود شده است. سپس مرزهای ساکن در تحلیل دینامیکی به‌منظور مدل‌سازی شرایط مرزی دور، که ضربه امواج را جذب می‌کند و موج‌ها را از انعکاس دوباره به مدل باز می‌دارد، اضافه شده است.

پس از دستیابی به حالت تنش‌های اولیه زمین، عناصر شبکه در محل تونل به مدل خنثی حفاری تونل تغییر حالت دادند و دوباره برای به تعادل رسیدن تنش‌ها بعد از حفاری تونل مدل، تا رسیدن به حالت صفر تنش‌های نامتعادل تحلیل شدند. سپس حفره ایجاد شده توسط خنثی‌سازی المان‌های شبکه اعمال فشار داخلی وارده برای شبیه‌سازی بارگذاری انفجاری، ایجاد شد. لازم به ذکر است که فشار داخلی وارده ناشی از بارگذاری انفجاری 20 MPa تنظیم شده است (شکل ۲، [۲]).

۳-۵. نتایج مدل‌سازی

در حالی که محل بحرانی انفجار به‌دلیل به‌دست آوردن بیشترین تأثیر، به‌طور مستقیم در بالای تونل قرار داده شده است، مشاهده می‌شود که بیشینه جابه‌جایی همواره در تاج این تونل باعث تغییر شکل متقارن اطراف حفره و محل تونل است. در ادامه، نتایج عددی به‌دست آمده در قالب تنش‌های وارد بر پوشش نهایی تونل و میزان جابه‌جایی تاج تونل آورده شده است.

تأثیر تزریق در کاهش جابه‌جایی‌های تاج تونل: شکل (۶ الف و ب) جابه‌جایی‌های ناشی از انفجار را در مدل نشان می‌دهند. حرکات سطح زمین از تغییر شکل تاج تونل واضح‌تر است زیرا سربار بالای حفره انفجار، برای نگهداری بار انفجار ناکافی است. همان‌طور که در شکل (۶ - الف) مشاهده می‌شود، جابه‌جایی تاج تونل در اثر موج ناشی از انفجار در حالت قبل از تزریق به‌طور کاملاً واضح است، در حالی که این جابه‌جایی در حالت بعد از تزریق (شکل ۶ - ب) محسوس نیست. استفاده از تزریق باعث می‌شود میزان جابه‌جایی‌ها تا حدود ۲ برابر کاهش پیدا کند.

• **تأثیر تزریق در کاهش تنش‌های وارد بر تونل:** نحوه انتشار تنش‌های ناشی از موج انفجار در فضای بالای تونل در شکل (۷)

در نظر گرفته شده [۲] و با توجه به عدم برخورد با سفره آب زیرزمینی، سطح آب زیرزمینی در مدل‌سازی در نظر گرفته نشده است.

خاک اصلاح شده: اما برای مدل‌سازی خاک اصلاح شده اطراف تونل، از یک مدل الاستیک با پارامترهای به‌دست آمده از نتایج نمونه‌سازی شرح داده شده در بخش (۳ و ۴) و آزمایش تک‌محوری بر روی این نمونه‌ها استفاده شده است. وزن واحد حجم 2230 kg/m^3 ، مدول الاستیک $6.74 \times 10^8 \text{ Pa}$ و ضریب پواسون برابر 0.25 است. برای خاک اصلاح شده با دوغاب با نسبت آب به سیمان ۲ به ۱ مدول الاستیک، 10^8 Pa و 0.17 در نظر گرفته می‌شود [۱۷].

پوشش نهایی تونل: فرض می‌شود پوشش نهایی تونل، یک سازه یک‌پارچه است و مصالح آن همگن و الاستیک با مشخصات زیر می‌باشد.

$$E = 2/5 \times 10^8 \text{ Pa} \quad \text{مدول الاستیک}$$

$$\nu = 0.2 \quad \text{ضریب پواسون}$$

به‌منظور مدل‌کردن پوشش نهایی دور تونل، از المان سازه‌ای تیر (Beam) با مشخصات ذکر شده استفاده می‌شود. المان‌های سازه‌ای در نرم‌افزار FLAC، نیاز به مشخص کردن ضریب پواسون ندارند. برای در نظر گرفتن تحلیل تنش صفحه‌ای در محاسبات، یک تصحیح کرنش صفحه‌ای برای مدول الاستیسیته بتن پوشش نهایی در نظر گرفته می‌شود که در آن مدول الاستیسیته بر $(1 - \nu^2)$ تقسیم می‌شود [۱۸]. در نتیجه مدول الاستیک برابر است با: $E = 2/6 \times 10^8 \text{ Pa}$. ضخامت قطعات بتنی پیش‌ساخته به‌کار رفته برای پوشش نهایی تونل خط ۷ مترو تهران ۳۵ سانتی‌متر است. بنابراین مشخصات هندسی المان‌های سازه‌ای برای حالت تحلیل دوبعدی از رابطه $I = t^3/12$ به‌دست می‌آید که سطح مقطع المان آن 0.25 m^2 و $a = 3/6 \times 10^{-3} \text{ m}^4$ به‌صورت آن به‌صورت $I = 3/6 \times 10^{-3}$ است. به‌منظور به‌دست آوردن معیاری برای محاسبه میزان تنش‌ها و نیروهای وارد بر پوشش نهایی تونل، ابتدا یک مقطع از پوشش تونل با ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر و عرض ۱ متر در نظر گرفته می‌شود. دو ردیف میلگرد $\Phi 16$ در دو طرف مقطع با فاصله مرکز به مرکز ۲۰ سانتی‌متر و با پوشش ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود تا برون محوری بیشینه نیروی قابل تحمل، خارج از مرکز وارد بر این مقطع محاسبه شود.

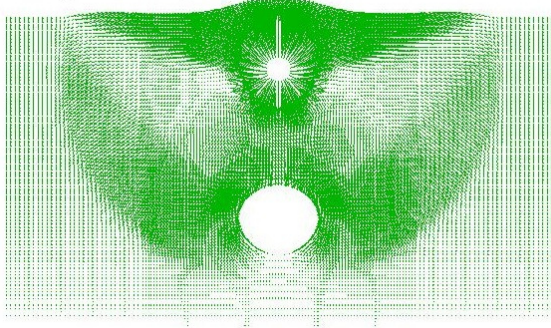
با توجه به رابطه تقریبی ذکر شده برای مقاطع متقارن، مقدار این برون محوری از رابطه مقابل به‌دست می‌آید [۱۹]:

$$e_b = (0.2 + 0.77 \rho_g m) h \quad (5)$$

$$m = \frac{\rho_s f_s}{0.85(\rho_c f_c)} \quad \rho_g = \frac{A_{st}}{bh}$$

که در آن h ارتفاع مقطع (۳۵ سانتی‌متر)، b عرض مقطع (۱ متر)، f_s تنش جاری شدن فولاد (400 N/mm^2)، f_c مقاومت مشخص بتن

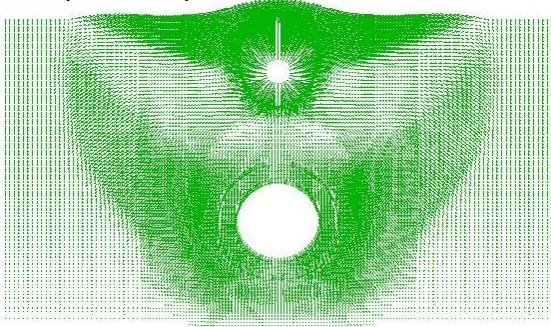
FLAC (Version 4.00)



Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA

(الف)

FLAC (Version 4.00)



Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA

(ب)

شکل ۶. (الف): جابه‌جایی‌های ناشی از بار انفجار برای حالت قبل از تزریق،
(ب): جابه‌جایی‌های ناشی از بار انفجار برای حالت خاک اطراف تونل تزریق شده

FLAC (Version 4.00)



Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA

شکل ۷. انتشار تنش‌های ناشی از موج انفجار

۶-۲. شدت بارگذاری انفجار

شدت بارگذاری، به‌طور عمده وابسته به خصوصیات بمب از قبیل وزن، خرج و خصوصیات خاک از قبیل میرایی است که عدم قطعیت

نشان داده شده است. با اندازه‌گیری تنش‌های بالای تاج تونل، در قبل و بعد از تزریق نشان داده می‌شود که اصلاح خاک اطراف تونل ۱/۵ تا ۲ برابر تنش وارد بر پوشش تونل را کاهش می‌دهد. در نتیجه این امر، می‌توان سازه اقتصادی‌تری را برای پوشش نهایی تونل در برابر بار انفجار طراحی کرد. در شکل (۸) نیروی محوری ناشی از موج انفجار وارد بر المان‌های سازه‌ای پوشش نهایی تونل نشان داده شده است.

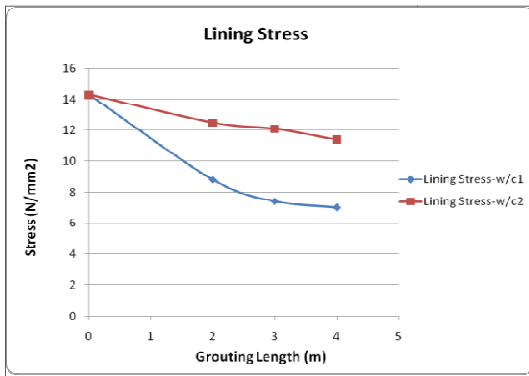
۶. نتایج و بحث

برای فهم بهتر مسئله، حساسیت‌سنجی چندین پارامتر مؤثر بر پاسخ سازه تونل تحت بارگذاری انفجاری، جهت کمک به طراحی برای در نظر گرفتن پارامترها و کمک برای بهینه کردن طراحی‌های مشابه انجام شده است که خلاصه آن در جدول (۲) آورده شده است. بر این اساس روابطی برای پیش‌بینی میزان جابه‌جایی تاج تونل و تنش وارد بر پوشش تونل بر اثر بارگذاری انفجاری استخراج شده است. نحوه محاسبه تنش معادل وارد بر مقطع پوشش نهایی تونل (به‌عنوان معیاری از نیروهای وارد بر پوشش بتنی و تحلیل حساسیت آن در مقابل تغییر دیگر پارامترها) در بخش (۵ - ۱) آورده شده است.

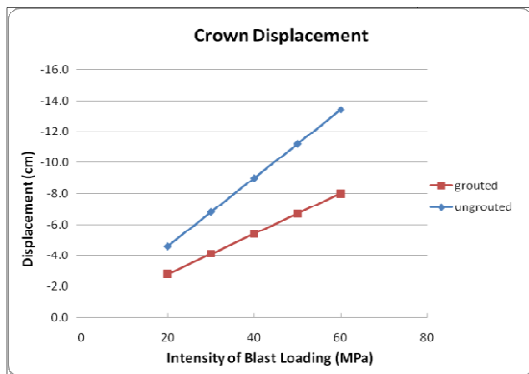
۶-۱. افزایش طول گمانه‌های تزریق

یکی از راهکارهای کاهش اثرات ناشی از موج انفجار بر سازه تونل، افزایش طول گمانه‌های تزریق، به‌منظور اصلاح حجم خاک بیشتری در بالای تونل است که این مسئله نیز به‌منظور به‌دست آوردن طول بهینه گمانه‌های تزریق باید مورد تحلیل حساسیت قرار گیرد. شکل (۹) کاهش میزان جابه‌جایی تاج تونل را با افزایش طول گمانه‌های تزریق و تغییر نسبت آب به سیمان نشان می‌دهد. با افزایش طول گمانه‌های تزریق، نرخ کاهش جابه‌جایی در تاج تونل کاهش می‌یابد و این امر نشان می‌دهد که طول گمانه‌های تزریق تا مقدار مشخصی می‌تواند مؤثر باشد و افزایش بیشتر طول گمانه‌های تزریق اقتصادی نیست. با توجه به شکل (۹)، رابطه جابه‌جایی تاج تونل با طول گمانه‌های تزریق به‌صورت خطی است.

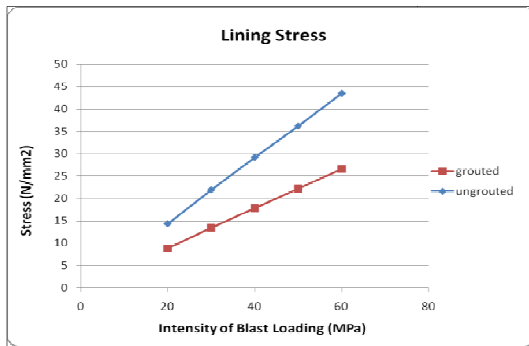
با توجه به آزمایش‌های انجام شده، تزریق دوغاب سیمانی با نسبت آب به سیمان ۱ به ۲ و ۱ به ۱ انجام گرفته است که تأثیر این تغییر در کاهش جابه‌جایی‌های تاج تونل و تنش‌های وارد بر پوشش تونل به‌ترتیب در شکل‌های (۹ و ۱۰) آورده شده است که کاهشی حدود ۵۰ درصد، در میزان جابه‌جایی تاج تونل و تنش‌های وارد بر پوشش تونل با کاهش نسبت آب به سیمان مشاهده می‌شود. همچنین تأثیر افزایش طول گمانه‌های تزریق بر کاهش میزان تنش‌های وارد بر پوشش نهایی تونل در شکل (۱۰) نشان داده شده است که این رابطه نیز به‌صورت خطی در نظر گرفته می‌شود.



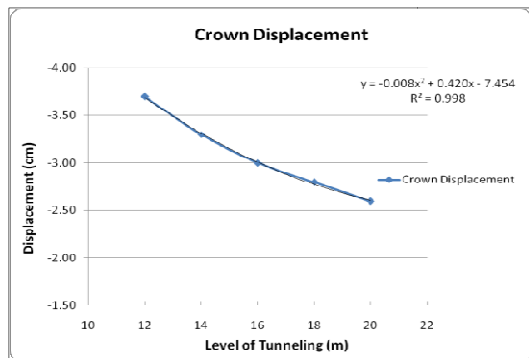
شکل ۱۰. کاهش تنش‌های وارد بر پوشش نهایی تونل به دلیل افزایش طول گمانه‌های تزریق



شکل ۱۱. جابه‌جایی تاج تونل در مقابل تغییرات شدت بارگذاری انفجاری



شکل ۱۲. تغییرات تنش وارد بر پوشش نهایی تونل در مقابل شدت بارگذاری انفجاری



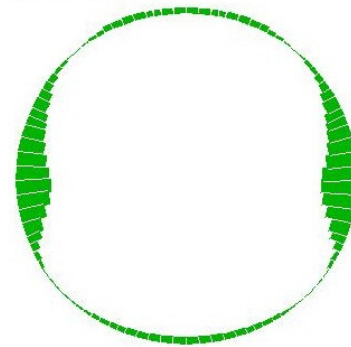
شکل ۱۳. تغییرات جابه‌جایی تاج تونل در اثر بارگذاری انفجاری در مقابل عمق حفاری تونل

در تعیین مشخصات خاک وجود دارد. برای برآورد اهمیت و شدت بارگذاری انفجاری، چندین مقدار شدت انفجار برای طول تزریق ۲ متر در این تحلیل مورد استفاده قرار گرفته است. شکل‌های (۱۱ و ۱۲) نشان می‌دهند که رابطه بین شدت بارگذاری انفجاری با جابه‌جایی تاج تونل و تنش وارد بر پوشش نهایی تونل خطی است که در حالت مدل‌سازی تزریق شده، نرخ افزایش کمتر است.

۳-۶. عمق حفاری تونل

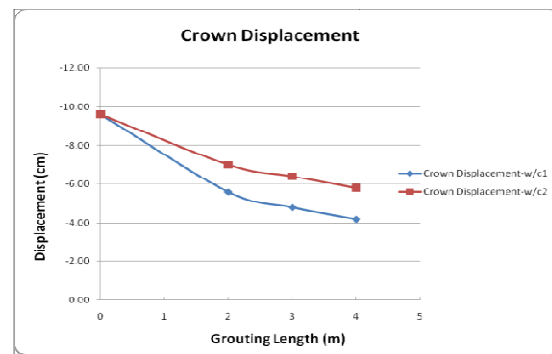
به منظور بررسی اثر عمق‌های مختلف حفاری تونل بر پاسخ سازه تونل در مقابل بارگذاری انفجاری، تغییرات جابه‌جایی تاج تونل و تنش وارد بر پوشش نهایی تونل در مقابل تغییر این پارامتر در شکل‌های (۱۳ و ۱۴) آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بین جابه‌جایی تاج تونل و تنش وارد بر پوشش تونل با عمق حفاری تونل یک رابطه درجه دوم وجود دارد که در ابتدا با دور شدن از مرکز انفجار، میزان جابه‌جایی و تنش وارد بر پوشش نهایی تونل کاهش می‌یابد و سپس در حفاری‌های عمیق، به دلیل افزایش میزان فشار سربار خاک این مقادیر افزایش پیدا می‌کند.

FLAC (Version 4.00)



Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA

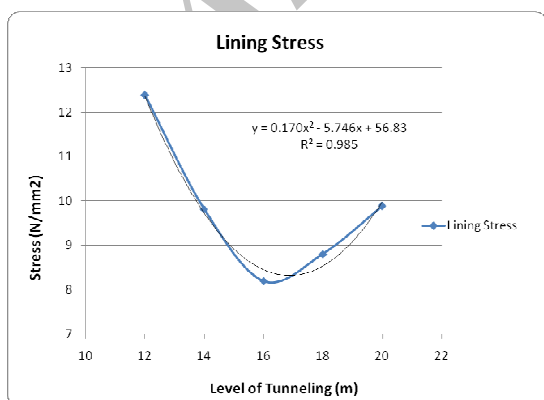
شکل ۸. نیروی محوری وارد بر المان‌های سازه‌ای در اثر موج ناشی از انفجار



شکل ۹. کاهش جابه‌جایی‌های تاج تونل ناشی از موج انفجار به دلیل افزایش طول گمانه‌های تزریق

جدول ۲. خلاصه حساسیت‌سنجی پارامترهای مؤثر بر جابه‌جایی و نیروهای وارد بر پوشش نهایی تونل

no	Disp (cm)	Axial force	Moment (N.m)	Equivalent stress (N/mm ²)	Level (m)	Soil type (Modulus (Pa))	Blasting intensity (Mpa)	w/c	Grouting length (m)
۱	-۴/۶	۴/۵۰E+۰۶	۴/۶۰E+۰۴	۱۴/۳	۱۸	۳/۳۷E+۰۹	۲۰	۰	۰
۲	-۲/۸	۲/۶۰E+۰۶	۵/۲۰E+۰۴	۸/۸	۱۸	۳/۳۷E+۰۹	۲۰	۱	۲
۳	۲/۴	۲/۲۰E+۰۶	۳/۴۰E+۰۴	۷/۴	۱۸	۳/۳۷E+۰۹	۲۰	۱	۳
۴	۲/۲	۲/۱۰E+۰۶	۳/۸۰E+۰۴	۷/۰	۱۸	۳/۳۷E+۰۹	۲۰	۱	۴
۵	-۳/۴	۳/۸۰E+۰۶	۶/۵۰E+۰۴	۱۲/۵	۱۸	۳/۳۷E+۰۹	۲۰	۲	۲
۶	-۶/۸	۶/۹۰E+۰۶	۸/۴۰E+۰۴	۲۱/۹	۱۸	۳/۳۷E+۰۹	۳۰	۰	۰
۷	-۹/۰	۹/۲۰E+۰۶	۱/۱۱E+۰۴	۲۹/۱	۱۸	۳/۳۷E+۰۹	۴۰	۰	۰
۸	-۱۱/۲	۱/۱۴E+۰۷	۱/۴۰E+۰۴	۳۶/۲	۱۸	۳/۳۷E+۰۹	۵۰	۰	۰
۹	-۱۳/۴	۱/۳۷E+۰۷	۱/۶۸E+۰۴	۴۳/۵	۱۸	۳/۳۷E+۰۹	۶۰	۰	۰
۱۰	-۴/۱	۴/۰۰E+۰۶	۷/۷۰E+۰۴	۱۳/۴	۱۸	۳/۳۷E+۰۹	۲۰	۱	۲
۱۱	-۵/۴	۵/۳۰E+۰۶	۱/۰۴E+۰۴	۱۷/۸	۱۸	۳/۳۷E+۰۹	۲۰	۱	۲
۱۲	-۶/۷	۶/۶۰E+۰۶	۱/۳۰E+۰۴	۲۲/۲	۱۸	۳/۳۷E+۰۹	۲۰	۱	۲
۱۳	-۸/۰	۷/۹۰E+۰۶	۱/۵۷E+۰۴	۲۶/۶	۱۸	۳/۳۷E+۰۹	۲۰	۱	۲
۱۴	-۳/۷	۴/۱۰E+۰۶	۴/۶۰E+۰۴	۱۲/۴	۱۲	۳/۳۷E+۰۹	۲۰	۱	۲
۱۵	-۳/۳	۳/۳۰E+۰۶	۱/۵۰E+۰۴	۹/۸	۱۴	۳/۳۷E+۰۹	۲۰	۱	۲
۱۶	-۳/۰	۲/۸۰E+۰۶	۷/۵۰E+۰۴	۸/۲	۱۶	۳/۳۷E+۰۹	۲۰	۱	۲
۱۷	-۲/۶	۲/۹۰E+۰۶	۶/۲۰E+۰۴	۹/۹	۲۰	۳/۳۷E+۰۹	۲۰	۱	۲
۱۸	-۳/۲	۳/۷۰E+۰۶	۶/۱۰E+۰۴	۱۲/۱	۱۸	۳/۳۷E+۰۹	۲۰	۲	۳
۱۹	-۲/۹	۳/۵۰E+۰۶	۵/۵۰E+۰۴	۱۱/۴	۱۸	۳/۳۷E+۰۹	۲۰	۲	۴
۲۰	-۷/۶	۴/۴۰E+۰۶	۱/۰۷E+۰۴	۲۱/۰	۱۸	۲/۰۰E+۰۹	۲۰	۰	۰
۲۱	-۱۴/۴	۹/۳۰E+۰۶	۲/۳۳E+۰۴	۳۲/۶	۱۸	۱/۰۰E+۰۹	۲۰	۰	۰
۲۲	-۲۷/۴	۱/۳۰E+۰۷	۴/۷۹E+۰۴	۴۹/۵	۱۸	۵/۰۰E+۰۹	۲۰	۰	۰
۲۳	-۴/۰	۳/۲۰E+۰۶	۵/۹۰E+۰۴	۱۰/۷	۱۸	۲/۰۰E+۰۹	۲۰	۱	۲
۲۴	-۷/۳	۴/۱۰E+۰۶	۶/۷۰E+۰۴	۱۳/۴	۱۸	۱/۰۰E+۰۹	۲۰	۱	۲
۲۵	-۱۳/۹	۴/۶۰E+۰۶	۷/۵۰E+۰۴	۱۵/۱	۱۸	۵/۰۰E+۰۹	۲۰	۱	۲



شکل ۱۴. تغییرات تنش وارد بر پوشش تونل در مقابل عمق حفاری تونل

۴-۶. جنس خاک

در این تحقیق، تأثیر جنس خاک بر پاسخ سازه تونل در مقابل بارگذاری انفجاری برای سربار ثابت ۱۸ متر و دو حالت خاک اصلاح شده اطراف تونل (طول گمانه تزریق ۲ متر) و اصلاح نشده آورده شده است. برای نشان دادن جنس خاک از مدول الاستیسیته خاک استفاده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش مدول الاستیسیته خاک، میزان جابه‌جایی تاج تونل و تنش وارد بر پوشش نهایی تونل در اثر بارگذاری انفجاری کاهش می‌یابد (شکل‌های ۱۶ و ۱۵).

اثر بارگذاری انفجاری و در نظر گرفتن رابطه خطی و یا غیرخطی هرکدام از این پارامترها با میزان جابه‌جایی، با انجام برازش بین این پارامترها و با استفاده از کد نویسی در نرم‌افزار MATLAB ضرایب معادله پیش‌بینی جابه‌جایی تاج تونل به صورت زیر به دست آمده است:

$$dis = -0.024 \times lev^2 - 0.129 \times \ln(st) - 0.021 \times l \quad (۶)$$

$$1.42 \times \frac{w}{c} + 1.87 \times gl$$

که در این معادله، dis (cm) میزان جابه‌جایی پیش‌بینی شده تاج تونل، lev (m) عمق حفاری تونل، st نوع خاک که به صورت مدول الاستیسیته برحسب واحد Pa و b بر حسب واحد MPa در معادله قرار می‌گیرند، همچنین w/c نسبت آب به سیمان و gl طول گمانه‌های تزریق که با واحد m در معادله وارد می‌شود. با توجه به اینکه این معادله با استفاده از روش‌های آماری (حدافل مربعات) به دست آمده است، به منظور رسیدن به واحد مورد نظر برای جابه‌جایی تاج تونل، واحد هر کدام از ضرایب معادله را می‌توان به صورت (واحد جمله مورد نظر/cm) در نظر گرفت.

۶-۶. پیش‌بینی میزان تنش وارد بر پوشش نهایی تونل

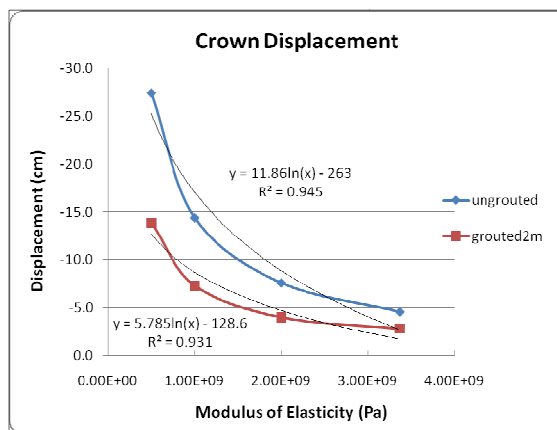
همچنین مشابه بخش قبل، با انجام برازش بین پارامترهای ذکر شده با استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB، ضرایب معادله پیش‌بینی تنش وارد بر پوشش نهایی تونل به صورت زیر به دست می‌آید:

$$str = 0.03 \times lev^2 + 0.41 \times \ln(st) + 0.32 \times b - 1.30 \times \frac{w}{c} - 4.90 \times gl \quad (۷)$$

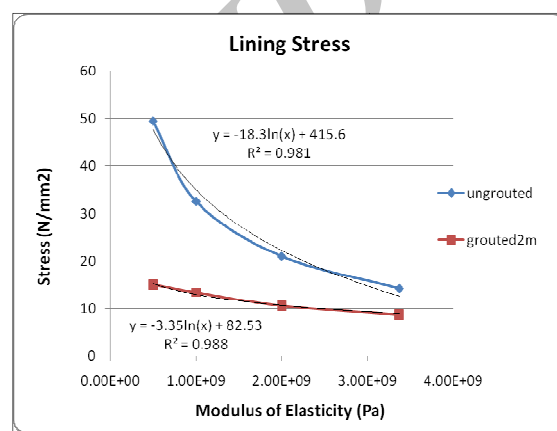
که در این معادله، str (N/mm^2) تنش وارد بر پوشش نهایی تونل است و بقیه پارامترها مطابق توضیحات بیان شده برای رابطه قبلی است. در اینجا نیز به منظور رسیدن به واحد مورد نظر برای تنش وارد بر پوشش تونل واحد، هر کدام از ضرایب معادله را می‌توان به صورت (واحد جمله مورد نظر N/mm^2) در نظر گرفت. استفاده از این روابط می‌تواند در پیش‌بینی میزان جابه‌جایی تاج تونل و همچنین تنش وارد بر پوشش نهایی تونل با توجه شرایط مختلف خاک، عمق حفاری، عملیات تزریق و قدرت بارگذاری، مفید واقع شود و در مراحل ابتدایی طراحی فضاهای زیرزمینی به منظور مقاومت در برابر بارگذاری انفجاری مدنظر قرار گیرد.

۷. نتیجه‌گیری

پارامترهای مورد استفاده در تحلیل مقاومت در برابر انفجار یک تونل زیرزمینی، می‌تواند به دو گروه عمده تقسیم شود که شامل پارامترهای خاک و مشخصات سلاح است. پارامترهای خاک قابل تعیین یا قابل کنترل توسط طراح می‌باشند، در حالی که مشخصات



شکل ۱۵. کاهش جابه‌جایی تاج تونل در اثر بار انفجار در مقابل افزایش مدول الاستیسیته خاک



شکل ۱۶. کاهش میزان تنش‌های وارد بر پوشش نهایی تونل در مقابل افزایش مدول الاستیسیته خاک

با توجه به شکل (۱۶) چنین استنباط می‌شود که هر چه مدول الاستیسیته خاک افزایش یابد میزان جابه‌جایی در دو حالت تزریق شده و تزریق نشده به یکدیگر همگرا می‌شود که این مسئله، نشان‌دهنده نزدیک شدن خصوصیات خاک اصلاح نشده به خاک اصلاح شده در اثر افزایش مدول الاستیسیته خاک است. همچنین می‌توان چنین نتیجه گرفت در حالتی که خاک اطراف تونل به لحاظ مقاومتی از کیفیت بالایی برخوردار باشد، ممکن است نیازی به انجام عملیات تزریق نباشد و به احتمال زیاد عملیات تزریق در چنین خاکی ناموفق خواهد بود و مقرون به صرفه نیست. در این پژوهش، برای برازش منحنی از دیاگرام لگاریتمی استفاده شده که ضریب همبستگی پیرسون (R-Squared Value) برای هر دو نمودار بالای ۰/۹۰ است. لازم به ذکر است که دیاگرام‌های درجه ۲ و ۳ ضریب همبستگی بیشتری دارند، اما در مقادیر بالای مدول الاستیسیته، جهت تغییرات جابه‌جایی تاج تونل و تنش وارد بر پوشش تونل را با واقعیت متفاوت نشان می‌دهند.

۵-۶. پیش‌بینی میزان جابه‌جایی تاج تونل

با توجه به تأثیر پارامترهای ذکر شده بر میزان جابه‌جایی تاج تونل در

¹ Soil Type

² Blasting Intensity

³ Grouting Length

- 6] Converse, F. J. "Compaction of Sand At Resonant Frequency"; Symposium on Dynamic Testing of Soils, ASTM Special Technical Pub. 1953, 156, 124-137.
- 7] Department of Defence US Army. "Soil Dynamics and Special Design Aspects"; MIL-HDBK-1007/3, NFESC. 1997.
- 8] Helwany, S. "Applied Soil Mechanics with ABAQUS' Applications"; Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons Inc. 2007.
- 9] U.S. Dep't of Army. "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions"; TM 5-1300. Headquarters of the Department of the Army, Navy, and Air Force, Washington, D.C. 1990.
- 10] Yang, Z. "Finite Element Simulation of Response of Buried Shelters to Blast Loadings"; Finite Elem. 1997, 24, 113.
- 11] Brode, H. L. "Numerical Solution of Spherical Blast Waves"; J. Applied Physics, American Institute Of Physics, New York, 1955.
- 12] Newmark, N. M.; Hansen, R. J. "Design of Blast Resistant Structures"; Shock and Vibration Handbook, Eds. Harris and Crede. McGraw-Hill, New York, 1961, 3.
- 13] Mills, C. A. "the Design of Concrete Structure to Resist Explosions and Weapon Effects"; Proc. of the 1st Int. Conf. on Concrete for Hazard Protections, Edinburgh, UK, 1987, 61-73.
- 14] U.S. Department of Army. "Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons"; TM 5-855-1. Headquarters of the U.S. Dep't of the Army, Washington, D.C. 1986.
- 15] Cheshomi, A.; Fakher, A.; Khamechian, M. "Geological Engineering of Tehran Alluvium of and Evaluate the Classification Rieben for Geology Studies"; J. Tehran Univ. 2008, 34, 1-15 (In Persian).
- 16] Asghari, A. "Final Geotechnical Report and Foundation Engineering of I2Q7 Station"; Pajouhesh Omran Rahvar Consulting Eng. Group 2010 (In Persian).
- 17] Esmaili, M.; Gharouni Nik, M.; Hoseinpour, H. "Assessment of Grouting Applicability in Type C Tehran Alluvium with Experimental Method"; Proc. of the Int. Conf. on Ground Improvement and Ground Control, Univ. Wollongong, 2012, 1277-1283.
- 18] Itasca Consulting Group, Inc. "FLAC2D Version 3.4: Fast Lagrangian Analysis of Continua User's Guide"; Minneapolis, USA. 1999.
- 19] Tahouni, Sh. "Designing Concrete Structures Based on Iranian Concrete Code"; Eighth Ed., 2005, 366 (In Persian).
- سلاح برای طراح به‌طور عمدۀ غیرقابل تعیین یا غیرقابل کنترل است. در این پژوهش، تأثیر تزریق و عوامل دیگر از قبیل محل و عمق قرارگیری تونل بر کاهش اثرات انفجار بر سازه تونل مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت دو رابطه برای پیش‌بینی جابه‌جایی تاج تونل و تنش وارده بر پوشش نهایی تونل استخراج شده است.
- در صورت عدم آگاهی نسبت به پارامترهای خاک محل، فرض شدت زیاد بارگذاری انفجاری برای تحلیل ضربه پوشش تونل غیرعقلانه است زیرا این مسئله، سازه تونلی را نتیجه می‌دهد که مقاصد اقتصادی را برآورده نمی‌کند. با استفاده از نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، طراح می‌تواند به‌جای طراحی یک سازه تونل صلب با استفاده از یک پوشش نهایی ضخیم و تقویت بیش از اندازه آن، اصلاح خاک اطراف تونل تا یک طول مشخص را مورد توجه قرار دهد، که این مسئله به کاهش تأثیر موج انفجار بر سازه تونل کمک می‌کند و باعث ایجاد سازه تونل اقتصادی‌تری می‌شود. همچنین با استفاده از رابطه ارائه شده می‌توان یک تخمین اولیه از جابه‌جایی تاج تونل و تنش‌های وارد بر پوشش نهایی تونل با توجه به پارامترهای ذکر شده در مراحل ابتدایی طراحی تونل به‌دست آورد.

۸. مراجع

- [1] Ranjbar, H.; Esmaili, M.; Shahnazari, H. "Study of the Effects of Blasting Rockets in Discontinuous Rock1215 Environments by the DEM Method"; Case Study: Tunnel in Kilometer 345+500, Ardebil-Miane Railway, Iranian Association Eng. Geology, 2010, 79-90 (In Persian).
- [2] Gui, M. W.; Chien, M. C. "Blast-Resistant Analysis for a Tunnel Passing Beneath Taipei Shongsan Airport—a Parametric Study"; Springer, Geotechnical and Geological Eng. 2006, 24: 227-248.
- [3] ASCE. "Design of Structures to Resist Nuclear Weapons Effects"; Manual 42, American Society of Civil Eng., Washington, D.C. 1985.
- [4] Newmark, N. M.; Haltiwanger, J. D. "Air Force Design Manual, Principles and Practices for Design of Hardened Structures"; Tech Documentary Report Number AFSWC-TDR-62-138, 1962.
- [5] Newcomb, W. K. "Principles of Foundation Design for Engines and Compressors"; Trans. of the ASME, 1951, 73, 307-318.