

بررسی تأثیر موج انفجار بر روی تونل های زیرزمینی مطالعه موردی: محدوده شمال تهران

محمد رضا خیراندیش^۱، بهزاد علیزاده صوری^{۲*}

۱- مری، دانشگاه امام حسین (ع)، ۲- دکتری، مهندسی معدن، شرکت مهندسی سپاسد

(دریافت: ۹۴/۰۲/۲۸، پذیرش: ۹۵/۰۱/۱۹)

چکیده

با توجه به وجود مناطق جمعیتی و مراکز حساس نظامی و نیز توسعه پروژه های عمرانی زیرزمینی از جمله تونل های مدفون در شمال تهران مثل پروژه های خطوط مترو و مراکز نظامی، احتمال تهدیدات نظامی ناشی از حملات هوایی کشورهای معاند به دلیل در پیش داشتن آثار مخرب بر عملکرد شهری، همواره وجود دارد. موشک های نفوذی از جمله عوامل ناپایداری دینامیکی هستند که ایمنی تونل ها را تهدید می کنند. در این تحقیق، با استفاده از تحلیل عددی، پایداری تونل مفروض در مقابل انفجار سنگرشکن GBU-28 در عمق های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت حداقل فاصله بین حفره انفجاری و تاج تونل که وضعیت تنش های انفجار به حالت پایدار قرار می گیرد، در حدود ۲۵ متر تعیین گردید. در فواصل کمتر از ۲۵ متر هر دو معیار جابجایی تاج تونل و نقاط در آستانه شکست، نشان دهنده ناپایداری تونل تحت بار ناشی از انفجار می باشند.

کلید واژه ها: فضا های زیرزمینی، آنالیز عددی، سنگرشکن، GBU-28

The Study of Explosion Impact on Underground Tunnels, Case Study: North of Tehran

M. R. Kheirandish, B. Alizadeh Sevari*

Sepasad Consulting Engineering Co

(Received: 18/05/2015; Accepted: 07/04/2016)

Abstract

On the basis of the population and sensitive military centers in the north of Tehran and also the development of underground civil projects in this region, such as buried tunnels for the Metro lines projects and military centers, there is the possibility of military threats due to the air attacks. The penetrate missiles are of the dynamic instability factors that threaten the safety of the tunnels. In this study, by using of the numerical analysis, resistance of the considered tunnel against explosion of bunker buster GBU-28 in the various depths has been investigated and finally the minimum distance among explosive cavity and crown of the tunnel that remained stable in the explosive tensions situations has been determined about 25m. At the distances lower than 25m, both critiques of replacement of tunnel crown and the breaking point indicated instability of tunnel under load due to the explosion.

Keywords: Underground Spaces, Numerical Analysis, Bunker Buster, GBU-28

*Corresponding Author E-mail: Beh.alizadeh@gmail.com

۱. مقدمه

میرزینی و همکاران [۶] به روش ابتکاری بیشینه فشار میدان آزاد در اثر انفجار پرتابه‌های متعارف همچون GP-2000 در خاک را جهت مدل‌سازی اثر انفجار بر سازه‌های زیرزمینی و روزمینی به کمک نرم‌افزار Flac تعیین کردند. محمد نژاد و همکاران [۷] نیز با استفاده از نرم‌افزار UDEC اثر انفجار یک موشک نفوذی GBU-۸۲ را بر یک تونل مترو شبیه‌سازی کرده‌اند.

انجام اقدامات دفاع غیرعامل در جنگ‌های نامتقارن امروزی در جهت مقابله با تهاجمات خصمانه و تقلیل خسارات ناشی از حملات هوایی و دریایی کشور مهاجم، موضوعی اساسی است که وسعت و گستره آن تمامی زیرساخت‌ها و مراکز حیاتی و حساس نظامی و غیرنظامی کشور را در برمی‌گیرد تا حدی که حفظ امنیت ملی و اقتصادی، شکست‌ناپذیری در جنگ، به نحو چشمگیری وابسته به برنامه‌ریزی و ساماندهی همه‌جانبه در موضوع حیاتی دفاع غیرعامل است. با توجه به فرصتی که در زمان صلح جهت تهیه چنین طرح‌هایی فراهم می‌گردد ضروری است این قبیل تمهیدات در متن طراحی‌ها لحاظ گردند. به‌کارگیری تمهیدات و ملاحظات پدافند غیرعامل علاوه بر کاهش زیاده‌های هزینه‌ها، کارایی دفاعی طرح‌ها، اهداف و پروژه‌ها را در زمان تهاجم دشمن بسیار افزایش می‌دهد.

بنابراین طراحی و مکان‌بنای سازه‌های مذکور باید به‌گونه‌ای باشد که در هنگام تهدیدات هوایی دشمن کمترین آسیب و خسارت را متحمل شود. مجموعه اقدامات و تمهیداتی که به همین منظور صورت می‌گیرد زیرمجموعه پدافند غیرعامل به حساب می‌آید. کلان‌شهر تهران از لحاظ زمین‌شناسی بر روی نهشته‌های آبرفتی بنا شده که تشکیل عوارض مورفولوژیکی همچون کوه، تپه، مخروط‌افکنه و دشت داده است. این آبرفت‌ها توسط سیلاب‌هایی که از دوران چهارم و همزمان با برپایی ارتفاعات البرز تاکنون از این ارتفاعات سرچشمه گرفته‌اند، در نواحی دامنه‌ای و پست برجا گذاشته شده است.

در این پژوهش پس از بررسی پارامترهای زمین‌شناسی مهندسی در محدوده مورد نظر، اثر نفوذ و انفجار سنگ‌شکن را بر سازه‌های نظامی زیرزمینی بررسی کرده و راهکارهای لازم جهت انجام تمهیدات در مقابل حملات هوایی دشمن به‌منظور ایمن‌سازی مراکز و تأسیسات مهم جمعیتی و نظامی در اختیار بگذارد. با توجه به شرایط خاص سازه‌های مورد استفاده به منظور مقاصد نظامی از لحاظ پایداری و ایمنی در مقابل حملات هوایی و انفجارها، لزوم توجه به جنبه‌های زمین‌شناسی مهندسی و تحلیل پایداری سازه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. از این رو

فضاهای زیرزمینی از لحاظ راهبردی از اهمیت بالایی برخوردارند، به طوری که در زمان جنگ می‌توان از آن‌ها به عنوان پناهگاه‌های زیرزمینی و یا انبار تجهیزات و مهمات و همچنین جهت حفظ ایمنی تأسیسات و نیروگاه‌های زیرزمینی استفاده کرد. عوامل ناپایداری این فضاهای زیرزمینی شامل عوامل استاتیکی (تنش‌های زمین) و دینامیکی همچون زلزله و انفجار است.

با توجه به خصوصیات زمین‌شناسی و ابزارهای تهدیدات هوایی دشمن، طراحی و انتخاب محل احداث فضاها و سازه‌های مذکور باید به گونه‌ای باشد که در هنگام تهدیدات دشمن کمترین آسیب و خسارت را متحمل شود. مجموعه دیدگاه‌هایی که بدین منظور از نگاه زمین‌شناسی مهندسی ارائه می‌گردد، به منظور ایمن‌سازی مراکز و تأسیسات مهم جمعیتی و نظامی، دستیابی به راهکارهای مناسب در مقابل تهدیدات هوایی دشمن از دیدگاه پدافند غیرعامل مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱].

تحقیقات علمی در مورد نفوذ دینامیکی موشک‌ها با پیشرفت تسلیحات نظامی در قرون هجده و نوزدهم آغاز شد و در حال حاضر تحقیقات وسیعی در مورد نحوه انتشار موج حاصل از انفجار در توده سنگ و خاک و پایداری فضاهای زیرزمینی ارائه شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به تحقیقات ذیل اشاره نمود.

کاسترو و همکاران [۲] انتشار موج حاصل از یک انفجار زیرسطحی را در خاک توسط نرم‌افزار PLAXIS2D مدل کردند و تاریخچه زمانی سرعت و فشار را در نقاطی با فواصل معین از مرکز انفجار به دست آورده و با روابط تجربی مقایسه کردند و ادعا کردند که نرم‌افزار مذکور قابلیت مدل‌سازی انفجار را داشته و می‌تواند جهت پیش‌بینی اثرات انفجار مورد استفاده قرار گیرد. نگی و همکاران [۳] اثر یک انفجار سطحی را بر یک سازه بتنی مدفون در خاک و با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS بررسی کرد. وی از نرم‌افزار ABAQUS و از مدل کپ ۱ با مدل رفتاری دراکر-پراگر استفاده کرد. برای شبیه‌سازی پدیده انفجار از معادله حالت JWL استفاده شده و به این ترتیب وی پدیده انفجار را به شکل مستقیم و به صورت یک پدیده ترمودینامیکی شبیه‌سازی کرد. یانگ و همکاران [۴] اثر انفجار سطحی را بر یک تونل مترو بررسی کردند و نتیجه گرفت که اگر تونل مترو در عمق بیشتر از ۷ متر حفر شده و ماده انفجاری معادل کمتر از ۴۴۵ کیلوگرم TNT باشد تونل مذکور ایمن خواهد بود. شاه نظری و همکاران [۵] از یک مدل دوبعدی اجزاء مجزا (UDEc) برای شبیه‌سازی اثر انفجار سنگ‌شکن نفوذی بر تونل راه‌آهن میانه- اردبیل استفاده کردند و نتیجه گرفتند که بیش‌ترین جابجایی در تاج تونل رخ می‌دهد که با داده‌های تجربی نیز همخوانی دارد.

عمق نفوذ پرتابه در مصالح خاکی، سنگی و بتنی ارائه نموده است [۹].

$$V < 61m/s \Rightarrow D = 0.0008SN(M/A)^{0.7} \ln(1 + 2.15V^2 10^{-4}) \quad (1)$$

$$V > 61m/s \Rightarrow D = 0.000018SN(M/A)^{0.7} (V - 30.5)$$

در این رابطه D عمق نفوذ بر حسب متر، S ضریب نفوذ، N ضریب شکل دماغه، M جرم پرتابه بر حسب کیلوگرم، A سطح مقطع پرتابه بر حسب مترمربع و V سرعت برخورد پرتابه است که در این تحقیق m/s ۵۶۳ در نظر گرفته شده است. ضریب شکل دماغه معمولاً بین $0/6$ تا $1/3$ است. در این تحقیق ضریب شکل دماغه برابر با $0/8$ و ضریب نفوذ برابر با 4 تعیین گردید. بنابراین عمق نفوذ با استفاده از رابطه (۱)، 26 متر به دست می‌آید. با توجه به مسیر I شکل نفوذ پرتابه، لازم است که عمق نفوذ از عمق انفجار تمیز گردد. عمق انفجار برابر با $0/67$ عمق نفوذ است؛ در نتیجه عمق انفجار برابر با 17 متر تعیین گردید.

محاسبه قطر گودال انفجار: برای محاسبه قطر گودال انفجار، تحقیقات مختلفی صورت گرفته و روابط متنوعی پیشنهاد گردیده است. در این تحقیق از رابطه (۲) برای تعیین قطر حفره (گودال) انفجار استفاده گردید [۱۰]. در این رابطه D قطر حفره انفجار (متر)، و W جرم ماده منفجره که برابر 363 کیلوگرم می‌باشد است [۱۰]. با توجه به مشخصات پرتابه مذکور، قطر حفره انفجار برابر با $3/5$ متر تعیین گردید.

$$D = 0.51W^{1/3} \quad (2)$$

۲-۲. تعیین پارامترهای انفجار

حداکثر فشار حاصل از انفجار: فشار آزاد در یک نقطه بافاصله معین از مرکز انفجار به فشاری گفته می‌شود که در آن نقطه طی انفجار ایجاد می‌شود اگر که هیچ سازه یا حفاری زیرزمینی در آن نقطه یا نزدیکی آن وجود نداشته باشد؛ در واقع تنها پارامترهایی که در مقدار فشار آزاد مؤثر هستند مقدار و نوع ماده منفجره، جنس زمین و فاصله از مرکز انفجار است.

حداکثر فشار ناشی از انفجار توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. در تمامی این روابط حداکثر فشار تابع عدد مقیاس شده $Z = R/W^{1/3}$ است. در این رابطه R فاصله شعاعی از مرکز انفجار و W جرم ماده منفجره در واحد کیلوگرم است. از رابطه (۳) برای تعیین حداکثر فشار ناشی از انفجار در این تحقیق استفاده گردید [۱۱].

$$P_0 = \rho CV_{max}^r \quad (3)$$

جهت کاهش صدمات و خرابی‌های ناشی از حملات هوایی و تعیین روش نگهداری مناسب سازه‌های نظامی زیرزمینی، توجه به خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی و ژئومکانیکی واحدهای زیرسطحی و توده‌های دربرگیرنده سازه‌ها ضروری است.

با توجه به خصوصیات زمین‌شناسی و ابزارهای تهدیدات هوایی دشمن، طراحی و انتخاب محل احداث فضاها و سازه‌های مذکور باید به گونه‌ای باشد که در هنگام تهدیدات دشمن کمترین آسیب و خسارت را متحمل شود. مجموعه دیدگاه‌هایی که بدین منظور از نگاه زمین‌شناسی مهندسی ارائه می‌گردد، به منظور ایمن‌سازی مراکز و تأسیسات مهم جمعیتی و نظامی، دستیابی به راهکارهای مناسب در مقابل تهدیدات هوایی دشمن از دیدگاه پدافند غیرعامل مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه کشورهای قدرتمند، به فناوری ساخت موشک‌هایی دست‌یافته‌اند که برای تخریب فضاها و زیرزمینی طراحی شده‌اند (سنگرشکن‌ها)، ضروری است که اطلاعات سنگرشکن‌های مورد استفاده در جنگ‌های مختلف مورد تحلیل قرار گرفته و تبعات انفجار آن‌ها در سازه‌های زمین‌شناسی که سازه‌های مهم نظامی و سیاسی روی آن بنا شده، مورد بررسی و قرار گیرد.

۲. روش تحقیق

به‌طور کلی می‌توان پدیده انفجار را به دو روش مستقیم و غیرمستقیم مدل کرد. در نوع اول پدیده ترمودینامیکی انفجار به شکل مستقیم مدل می‌شود که این کار با حل عددی معادله حالت گاز انجام می‌شود. در روش دوم که روش مورد استفاده در این تحقیق است، انفجار به شکل غیرمستقیم و با اعمال شرایط مرزی تنش یا تغییر مکانی به مرزهای داخلی یک حفاری کروی با شعاع مشخص مدل‌سازی می‌شود. شرایط مرزی استفاده شده تابعی از ماده انفجاری، نوع سنگ و خاک و نیز فاصله از محل انفجار است. در این روش دو پارامتر ماکزیمم تنش و دوم تاریخچه زمانی آن برای تعریف شرایط مرزی اهمیت دارد [۱].

یکی از راه‌های تعیین بیشینه تنش استفاده از روابط تجربی است که با انجام آزمایش‌های متعدد روابطی در قالب دستورالعمل TM-558-5 جهت پیش‌بینی فشار در اطراف محل انفجار ارائه شده است. [۸]

۲-۱. تعیین پارامترهای نفوذ سنگرشکن

عمق نفوذ سنگرشکن: با توجه به پیچیدگی مسئله، عمق نفوذ پرتابه در مصالح ژئوتکنیکی کماکان توسط محققین مختلف در دست بررسی است. آزمایشگاه Sandia رابطه (۱) را برای تعیین

۳-۲. مشخصات ژئوتکنیکی محیط انفجار و تونل

مشخصات ژئوتکنیکی محیط دربرگیرنده تونل در جدول (۲) بیان گردیده است. بر اساس آزمایش دانه بندی محیط مذکور عمدتاً ماسه ای است. با توجه به اینکه درزه های موجود در مدل در واقعیت وجود خارجی ندارد، بنابراین خواص درزه های مجازی بر اساس توصیه راهنمای استفاده نرم افزار تعیین گردید به گونه ای که بر روی بردارهای جابجایی تأثیر نگذارد. سیستم نگهداری تونل نیز شامل سگمنت های پیش ساخته بتنی است مشخصات سیستم نگهداری در جدول (۳) بیان شده است.

جدول ۲. مشخصات ژئوتکنیکی خاک دربرگیرنده تونل

اندازه	پارامتر	
۲۰۰۰	چگالی ($\frac{kg}{m^3}$)	خواص توده خاک
۷۵	مدول الاستیسته (Mpa)	
۰/۳	نسبت پواسن	
۲۰	چسبندگی (Kpa)	
۳۰°	زاویه اصطکاک داخلی (deg)	
۳۰۰۰	سختی قائم ($\frac{Mpa}{m}$)	خواص درزه های ساختمانی
۲۷۰۰	سختی برشی ($\frac{Mpa}{m}$)	
۰	چسبندگی ($\frac{Mpa}{m}$)	
۱۰	زاویه اصطکاک داخلی ($\frac{Mpa}{m}$)	
۰	مقاومت کششی ($\frac{Mpa}{m}$)	

جدول ۳. مشخصات سیستم نگهداری تونل

اندازه	پارامتر
۲۷۰۰	چگالی ($\frac{kg}{m^3}$)
۲۷	مدول الاستیسته (Gpa)
۰/۲	نسبت پواسن
۳۵	ضخامت (cm)
۴۰	مقاومت فشارشی (Mpa)
۴	مقاومت کششی (Mpa)

۳. نتایج و بحث

۳-۱. تحلیل دینامیکی انفجار سنگر شکن

در این تحقیق برای مدل سازی عددی انفجار از نرم افزار UDEC ver 4.00 استفاده شده است. این نرم افزار بر پایه روش عددی اجزا مجزا تهیه گردیده است. اساس تئوریک حل در این روش بر اساس روابط و حل معادلات حرکت اجزای مدل، طبق قانون دوم نیوتن است که با محاسبه شتاب و انتگرال گیری از سرعت، جابجایی و نهایتاً نیرو و تنش برآورد می شوند. [۱۲]

در این رابطه چگالی خاک ($\frac{kg}{m^3}$)، C سرعت انتشار موج در محیط (m/s) و V_{max}^r حداکثر سرعت ذرات محیط (m/s) است که با استفاده از رابطه (۴) تعیین می گردد.

$$V_{max}^r = 48.8 f_c \left(\frac{2.52R}{W^{1/3}} \right)^{-n} \quad (4)$$

در این رابطه R فاصله شعاعی از مرکز انفجار، f_c ضریب جفت شدگی (در این تحقیق برابر با ۰/۴) و n ضریب میرایی است. جدول (۱) برای تعیین ضریب میرایی مورد استفاده قرار می گیرد در این تحقیق با توجه به شرایط ژئومکانیکی مقدار ۲/۵ برای ضریب میرایی لحاظ گردید [۱۱].

جدول ۱. مقادیر پیشنهاد شده برای ضریب میرایی [۱۱]

ضریب میرایی	توصیف مواد
۳-۳/۲۵	ماسه خشک و ضعیف و گراول با دانسیته نسبتاً کم
۲/۷۵	لوم ماسه ای، ماسه رسی خشک و خاک دستی
۲/۵	ماسه دنس با دانسیته نسبتاً بالا
۲/۵	رس ماسه ای مرطوب با حفره خالی هوا بیش از ۴ درصد
۲/۲۵-۲/۵	رس ماسه ای اشباع و ماسه با حفره هوای کمتر از ۱ درصد
۱/۵	رس به شدت اشباع و شیل های رسی

برای تعیین سرعت انتشار موج طولی و برشی در محیط نیز به ترتیب روابط (۵) و (۶) ارائه شده است. در این روابط K و G ترتیب مدول بالک و مدول برشی (Pa) محیط انتشار موج است. با توجه به روابط ارائه شده و شرایط ژئوتکنیکی در نظر گرفته شده، $P_0 = 27 Mpa$ و $V_{max}^r = 65 m/s$ ، $C = 213 m/s$ تعیین گردیدند.

$$C_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} \quad (5)$$

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (6)$$

مدت زمان انفجار: برای تعیین توزیع فشار انفجار بر حسب زمان از رابطه نمایی $P = P_0 \exp(-at/t_0)$ که توسط ارتش آمریکا ارائه شده است، استفاده شد. t_0 از رابطه (۷) قابل محاسبه است.

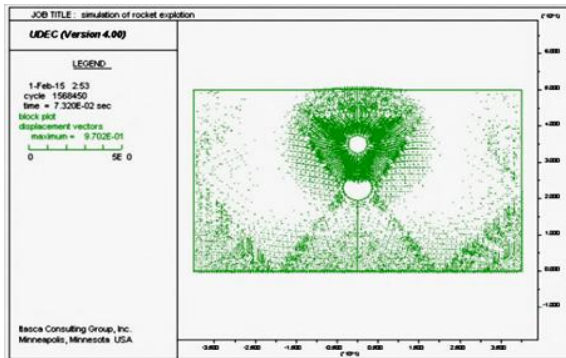
$$t_0 = \frac{R}{C} \quad (7)$$

فشار در مدت زمان ۴-۵ برابر t_0 از مقدار حداکثر به مقدار کمتر از ۱٪ مقدار حداکثر (t_d) کاهش پیدا می کند. مدت زمان کل انفجار نیز از رابطه (۸) قابل محاسبه است [۹]. با توجه به محاسبات انجام شده در این تحقیق $t_d = 0.05 s$ و $t_0 = 0.01 s$ تعیین گردید.

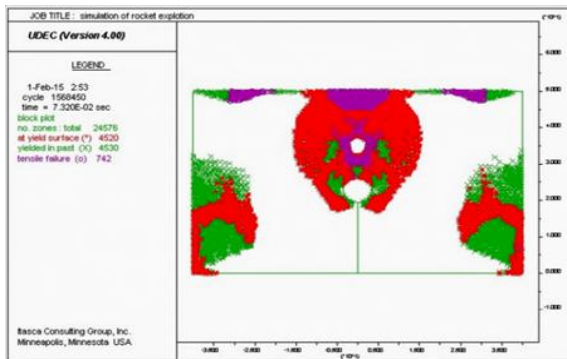
$$t_d = \frac{2i_0}{P_0} \quad (8)$$

که در آن: $i_0 = \rho C x$ و $x = W^{1/3} \cdot 60 \frac{f_c}{C} \left(\frac{2.52R}{W^{1/3}} \right)^{1-n}$

استفاده نرم‌افزار در صورتی که مناطق در آستانه شکست، ۲ سطح آزاد را به صورت ممتد به یکدیگر متصل کنند، سبب تشکیل صفحه شکست و وقوع ریزش می‌شوند با توجه به شکل (۳) در این حالت صفحه شکست به صورت قیف مانند در اطراف تونل شروع شده و به سطح زمین می‌رسد. در نتیجه در این حالت تونل کاملاً ناپایدار است.



شکل ۲. بردارهای جابجایی در مدل در حالت ۱

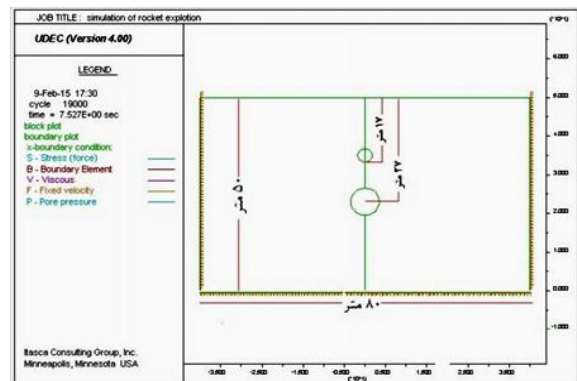


شکل ۳. مناطق پلاستیک شده در حالت ۱

در حالت ۲ نیز مشابه حالت ۱ تونل ناپایدار است. با توجه به فاصله ۱۵ متری بین حفره انفجاری و سقف تونل تقریباً ۰/۰۶ ثانیه طول می‌کشد که موج به سقف تونل برسد و بعد از آن تاج تونل (با شیب زیاد) شروع به حرکت می‌کند به گونه‌ای که بعد از ۰/۱۱ ثانیه تاج تونل در حدود ۱۸ سانتیمتر به سمت داخل تونل جابجا شده است که این میزان جابجایی با شیب نسبتاً زیادی رو به افزایش است. بنابراین در این حالت نیز تونل ناپایدار است.

در شکل (۴) نیز بردارهای جابجایی کل مدل بعد از ۰/۱۱ ثانیه نشان داده شده است که تراکم بردارهای جابجایی در اطراف تونل نسبت به حالت ۱ کاهش یافته است. در شکل (۵) نیز مناطق پلاستیک شده در اطراف تونل نشان داده است که با توجه به توضیحات حالت ۱، این شکل نیز نشان‌دهنده ناپایداری تونل است. در حالت ۳، با توجه به فاصله ۲۵ متری بین حفره انفجاری و تاج تونل تقریباً ۰/۱۱ ثانیه طول می‌کشد تا موج انفجاری به تاج تونل برسد.

به منظور ممانعت از انعکاس امواج به داخل مدل، از مرزهای آرام در پایه مدل استفاده شده است و جهت مدل‌سازی میرایی در هنگام تحلیل دینامیکی از میرایی رایلی با فرکانس پایه برابر با ۲ و نسبت میرا شوندگی بحرانی برابر با ۰/۵ استفاده شده است. در شکل (۱) مدل ساخته شده در نرم‌افزار (عمق تونل برابر با ۲۷) به همراه شرایط مرزی نشان داده شده است. مدل رفتاری الاستوپلاستیک موهر-کولمب نیز به عنوان مدل رفتاری در مدل‌سازی لحاظ گردید.



شکل ۱. هندسه مدل ساخته شده در نرم‌افزار به همراه شرایط مرزی

۳-۲. اعمال بار دینامیکی ناشی از انفجار

برای تحلیل دینامیکی با توجه به عدم پایداری تونل در اعماق کم، ۵ حالت مختلف برای تونل در نظر گرفته شد. در جدول (۴) مشخصات حالت‌های مختلف بیان شده است.

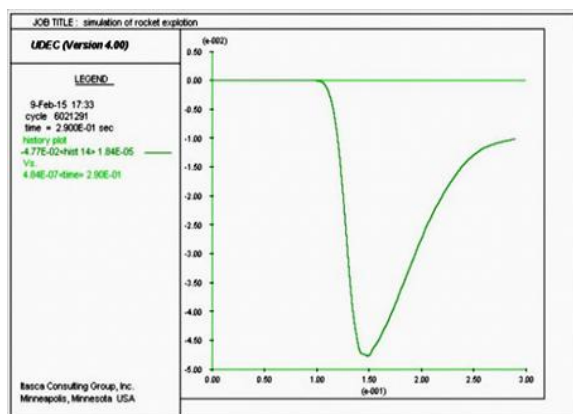
جدول ۴. حالت‌های مختلف برای تحلیل دینامیکی

شماره	عمق نفوذ پرتابه	عمق مرکز تونل	روباره تونل	فاصله حفره انفجار تا تاج تونل
حالت ۱	۱۷	۲۷	۲۳/۵	۷
حالت ۲	۱۷	۳۵	۳۱/۵	۱۵
حالت ۳	۱۷	۴۵	۴۱/۵	۲۵

در حالت ۱ بعد از اعمال فشار انفجار با توجه به سرعت موج (213 m/s) و فاصله حفره انفجاری تا تاج تونل (۷ متر) تقریباً ۰/۰۳ ثانیه طول می‌کشد تا موج انفجار به سقف تونل برسد.

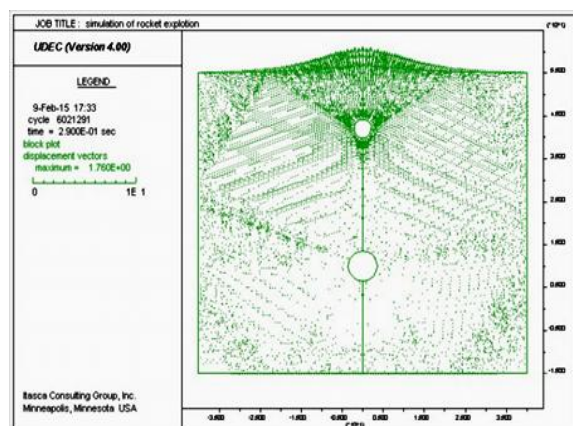
بعد از رسیدن موج انفجار به تاج تونل، جابجایی اطراف تاج تونل به سمت داخل (با شیب بسیار زیادی) شروع می‌شود به گونه‌ای که بعد از ۰/۰۷ ثانیه به میزان ۴۰ سانتیمتر می‌رسد. این میزان جابجایی زیاد، سبب ناپایداری تاج تونل می‌شود.

در شکل (۲) بردارهای جابجایی کل مدل بعد از ۰/۰۷ ثانیه نشان داده است که بیشترین جابجایی در اطراف حفره انفجاری در حدود ۹۰ سانتیمتر است. در شکل (۳) نیز مناطق پلاستیک شده نشان داده شده است. مناطق با رنگ قرمز نشان‌دهنده همان‌های در آستانه شکست است. با توجه به توضیحات راهنمای



شکل ۶. تاریخچه جابجایی عمودی تاج به سمت داخل تونل در حالت

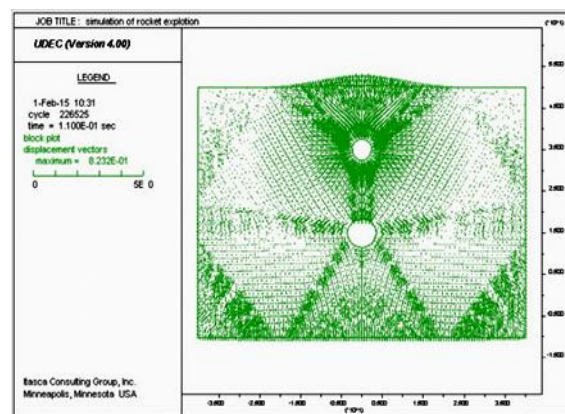
۳



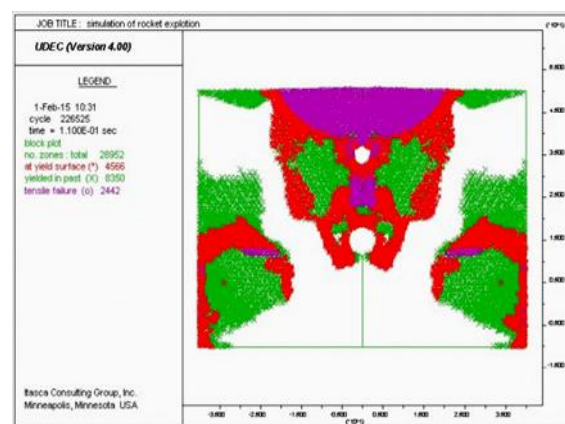
شکل ۷. بردارهای جابجایی در مدل در حالت ۳

شکل (۸) جابجایی دیواره و کف حفره انفجاری را نشان می‌دهد. جابجایی در نقاط مذکور در لحظات آغازین به بیشترین میزان خود می‌رسد و بعد از آن افزایش نمی‌یابد. بیشترین جابجایی دیواره و کف حفره به ترتیب برابر با ۳۰ سانتیمتر و ۵۰ سانتیمتر است. جابجایی کف حفره به دلیل اینکه در مسیر حرکت ذرات به سمت سطوح آزاد (سطح زمین و تونل) قرار دارد، بیشتر از جابجایی دیواره حفره است. علامت مثبت و منفی جابجایی نیز بستگی به جهت جابجایی نقطه موردنظر و جهت مثبت محورهای مختصاتی دارد.

در شکل (۹) نیز حداکثر سرعت ذرات در دیواره و کف حفره انفجاری نشان داده شده است. حداکثر سرعت در کف حفره برابر با 40 m/s و در دیواره برابر با 30 m/s است. مساحت بین سرعت جابجایی و محور افقی برابر با جابجایی است. برای بررسی میرایی محیط، میزان تنش عمودی در المان نزدیک به حفره انفجاری و در یک المان دیگر با فاصله ۵ متری نسبت به المان مذکور ثبت گردید که نتایج در شکل (۱۰) نشان داده است.



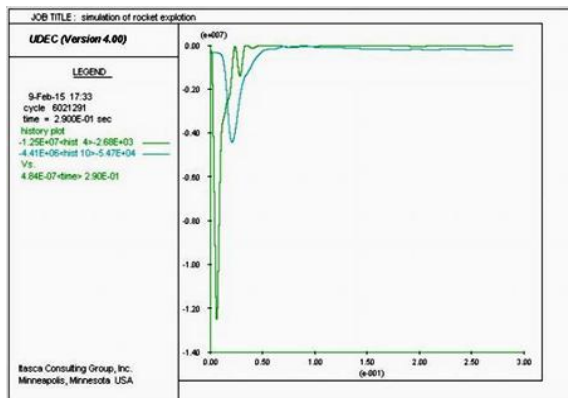
شکل ۴. بردارهای جابجایی در مدل در حالت ۲



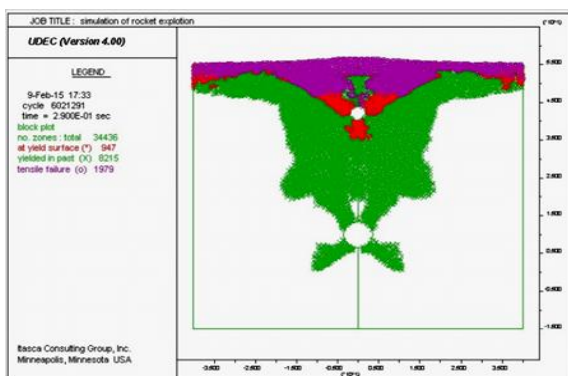
شکل ۵. مناطق پلاستیک شده در حالت ۲

با توجه به فاصله بیشتر طی شده توسط موج در این حالت و میرایی محیط، جابجایی تاج تونل در این حالت کمتر از حالات قبل است. به گونه‌ای که بعد از رسیدن موج به سقف تونل تقریباً ۰/۳ ثانیه طول می‌کشد که تاج تونل به بیشترین میزان جابجایی برسد. بیشینه میزان جابجایی تاج تونل به سمت داخل تونل در حدود ۵ سانتیمتر است، سپس با دور شدن موج از تاج تونل و استهلاک بیشتر موج، در اطراف تونل باربرداری اتفاق می‌افتد که سبب جابجایی به سمت بالا در تاج تونل می‌گردد.

با توجه به شکل (۶) بعد از ۰/۱۵ ثانیه از وقوع انفجار باربرداری در اطراف تونل اتفاق می‌افتد و جابجایی تاج تونل بعد از ۰/۲۹ ثانیه به میزان ۱ سانتیمتر کاهش می‌یابد و شیب جابجایی نیز به سمت صفر میل می‌کند. این میزان جابجایی در محدوده الاستیک است و سبب ناپایداری تونل نمی‌گردد. در شکل (۷) بردارهای جابجایی کل مدل بعد از ۰/۲۹ ثانیه نشان داده شده است. شدت بردارهای جابجایی در اطراف تونل بسیار کم است. بیشترین میزان جابجایی بر روی سطح زمین و به صورت بالازدگی خاک در بالای حفره انفجاری و در حدود ۱/۷ متر مشاهده می‌شود.

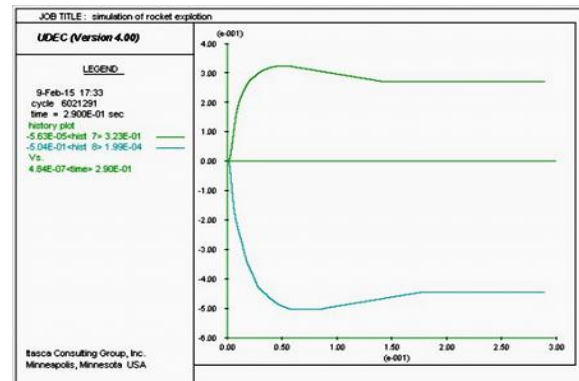


شکل ۱۰. تاریخچه تنش در ۲ المان بافاصله ۵ متری در حالت ۳

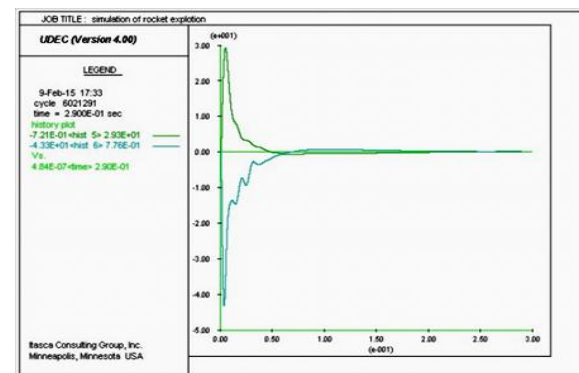


شکل ۱۱. مناطق پلاستیک شده در حالت ۳

در نوع اول پدیده ترمودینامیکی انفجار به شکل مستقیم مدل می‌شود که این کار با حل عددی معادله حالت گاز انجام می‌شود. در روش دوم که روش مورد استفاده در این تحقیق است، انفجار به شکل غیرمستقیم و با اعمال شرایط مرزی تنش یا تغییر مکانی به مرزهای داخلی یک حفاری کروی با شعاع مشخص مدل‌سازی می‌شود. شرایط مرزی استفاده شده تابعی از ماده انفجاری، نوع سنگ و خاک و نیز فاصله از محل انفجار است. در این روش دو پارامتر ماکزیمم تنش و دوم تاریخچه زمانی آن برای تعریف شرایط مرزی اهمیت دارد. یکی از راه‌های تعیین بیشینه تنش استفاده از روابط تجربی است که با انجام آزمایش‌های متعدد روابطی در قالب دستورالعمل ۱-۵۵۸-۵- TM جهت پیش‌بینی فشار در اطراف محل انفجار ارائه شده است. در این تحقیق امکان برداشت نتایج به روش ایزراندی نبوده و تنها به روش‌های تجربی و عددی اکتفا گردیده است. همچنین مدل‌سازی به روش عددی با دو نرم‌افزار UDEC و FLAC انجام شده که در ابتدای امر به منظور صحت سنجی مدل‌سازی، نتایج به دست آمده از این دو نرم‌افزار مورد تأیید است. برای اعتبار سنجی نتایج به دست آمده از نرم‌افزار UDEC، با استفاده از نرم‌افزار FLAC نیز مدل‌سازی با شرایط مشابه انجام



شکل ۸. تاریخچه جابجایی دیواره و کف حفاره انفجاری در حالت ۳



شکل ۹. تاریخچه سرعت ذرات در دیواره و کف حفاره انفجاری در حالت ۳

بر اساس این شکل با توجه به فاصله ۵ متری، تنش از میزان بیشینه ۱۲ مگاپاسکال در المان نزدیک‌تر به حفاره انفجاری به میزان بیشینه ۴ مگاپاسکال در المان دورتر کاهش یافته است. لحظه به اوج رسیدن تنش عمودی در المان دورتر نسبت به المان نزدیک‌تر با فاصله زمانی در حدود ۰/۰۲۵ ثانیه اتفاق می‌افتد که در واقع مدت‌زمان لازم برای رسیدن موج از المان نزدیک‌تر به المان دورتر است. کاهش تنش بین دو المان، نشان‌دهنده صحت عملکرد میرایی رایلی است. در شکل (۱۱) نیز نقاط پلاستیک شده نشان داده شده است. با توجه به این شکل نیز صفحه شکست ممتد تشکیل نمی‌شود که بیانگر عدم ریزش قیفی به سمت داخل تونل است. به عبارت دیگر این شکل نیز نشان‌دهنده پایداری تونل است.

۳-۳. اعتبارسنجی مدل‌ها

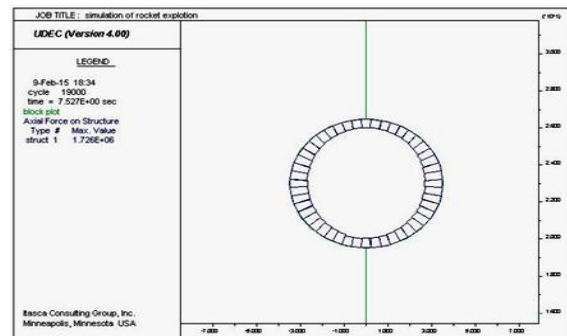
در تحلیل‌های انجام شده در مباحث علم ژئوتکنیک، اعتبارسنجی از اهمیت بالایی برخوردار است. روش تحقیق در این مقاله به صورت توصیفی، تجربی و مدل‌سازی ارائه شده است و بر اساس آن، تأثیر موج انفجار سنگر شکن بر روی تونل مفروض به روش عددی مدل‌سازی گردیده است. به‌طور کلی می‌توان پدیده انفجار را به دو روش مستقیم و غیرمستقیم مدل کرد.

گردید. در حالت اول فاصله حفره انفجار تا تونل ۷ متر در نظر گرفته شد و در این حالت بعد از ۰/۷ ثانیه به دلیل رسیدن المان‌های در حال شکست از سطح آزاد تونل به سطح زمین و جابجایی ۴۰ سانتی‌متری تاج تونل که در محدوده تحمل زون الاستیک خاک نیست تونل ناپایدار شده و ریزش اتفاق می‌افتد. در حالت دوم فاصله حفره انفجار تا تونل را ۸ متر افزایش دادیم که در این حالت جابجایی تاج تونل نسبت به حالت اول بهبود پیدا کرد ولی تونل همچنان به حالت ناپایدار قرار گرفت. در حالت سوم فاصله حفره انفجار با تونل به ۲۵ متر افزایش پیدا کرد. در این حالت بار حاصل از انفجار در محدوده تحمل الاستیک و تونل به حالت پایدار قرار گرفت.

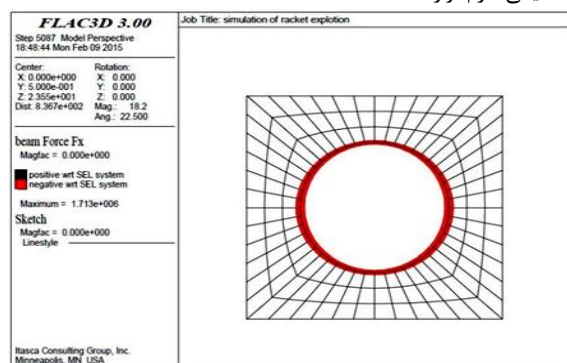
۵. مراجع

- [1] Fakher, A.; Cheshomi, A.; Khamechiyan, M., "The Addition of Geotechnical Properties to a Geological Classification of Coarse-Grained Alluvium in a pediment Zone"; Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology 2010, 40, 163-174.
- [2] Castro, J. S.; Bryson, L. S.; Gamber, N. K.; Lusk, B. T. "Numerical Modeling of Subsurface Blasts"; Pan-Am CGS, Geotechnical Conference 2011.
- [3] Nagy, N.; Mohamed, M.; Boot, J. C. "Nonlinear Numerical Modeling for the Effects of Surface Explosions on Buried Reinforced Concrete Structures"; Geomechanics and Engineering 2010, 2, 1-18.
- [4] Yang, Y.; Xie, X.; Wang, R. "Numerical Simulation of Dynamic Response of Operating Metro Tunnel Induced by Ground Explosion"; Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 2010, 4, 373-384.
- [5] Shahnazari, H.; Esmaili, M.; H. Ranjbar, H. "Simulating the Effects of Projectile Explosion on a Jointed Rock Mass Using 2D DEM: A Case Study of Ardebil-Mianeh Railway Tunnel"; International Journal of Civil Engineering 2010, 8, 2.
- [6] Mirzeinali, S. H.; Baziari, M. H.; Rabeti Moghaddam, M.; Hashemi, H. R. "Determination of Maximum Free Field Explosion Pressure of Conventional Projectiles in Soil for Modeling of Blast Loading Effect on the Underground and Above Ground Structures using FAC Software"; 1st Conf. on Passive Defence and Resistance Structures, Babol Noshirvani University of Technology, 2010 (In Persian).
- [7] Mohammadnejad, M.; Ramazanzadeh, A.; Jalali, M. E. "Dynamic Analysis of Underground Structure Under Explosion of Penetrating Bunker Buster"; 6st International Conf. on Seismology and Engineering 2010 (In Persian).
- [8] Jabbarzadeh, M. "Sensitivity Analysis of Penetrating Bunker Buster on Barren Underground Spaces by Numerical Method"; Sepasad Engineering Co, Unpublished Internal Report, 2013 (In Persian).
- [9] TM5-855-1 "Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons"; Headquarters, Department of the Army; 1986.
- [10] Young, C. W. "Penetration Equations"; Applied Research Associates, Sandia National laboratories, 1997.
- [11] Bangash, M. Y. H. "Shock Impact and Explosion Structural Analysis and Design"; Springer Publication, 1993.
- [12] Itasca Consulting Group Inc., "UDEC User's Manual F"; Minneapolis, MN, 1998.

گردید. در تحلیل با استفاده از نرم‌افزار FLAC نیروی محوری القایی در سیستم نگهداری برابر با ۱/۷۱ مگا نیوتن تعیین گردید. تطابق نتایج به دست آمده از نرم‌افزارهای UDEC و FLAC حاکی از صحت روند مدل‌سازی و مورد قبول بودن نتایج است. در شکل (۱۲) نیروی محوری القایی در سیستم نگهداری در نرم‌افزار UDEC و در شکل (۱۳) نیروی مذکور در نرم‌افزار FLAC نشان داده شده است.



شکل ۱۲. نیروی محوری القایی در سیستم نگهداری در تحلیل استاتیکی (نرم‌افزار UDEC)



شکل ۱۳. نیروی محوری القایی در سیستم نگهداری در تحلیل استاتیکی (نرم‌افزار FLAC)

۴. نتیجه‌گیری

فضاهای زیرزمینی از لحاظ استراتژیک از اهمیت بالایی برخوردارند بطوریکه در زمان جنگ می‌توان از آن‌ها به‌عنوان پناهگاه‌های زیرزمینی و یا انبار تجهیزات و مهمات و همچنین جهت حفظ ایمنی تأسیسات و نیروگاه‌های زیرزمینی استفاده کرد. عوامل ناپایداری این فضاهای زیرزمینی شامل عوامل استاتیکی (تنش‌های زمین) و دینامیکی همچون زلزله و انفجار است. موشک‌های نفوذی از جمله عواملی هستند که ایمنی سازه‌های این‌چنینی را تهدید می‌کنند. در این تحقیق یک تونل زیرزمینی با ابعاد و مشخصات معین در نظر گرفته شد و اثر انفجار سنگ‌شکن نفوذی GBU 28 بر آن به ازای عمق‌های مختلف و با استفاده از نرم‌افزار UDEC Ver.4 مورد بررسی قرار گرفت. سپس برای تحلیل دینامیکی تونل، ۳ حالت مختلف با فواصل مختلف تونل و حفره انفجار در نظر گرفته شد و پایداری تونل بررسی