

## مدل سازی عددی خسارت ناشی از انفجار داخلی

### بر روی پوشش بتنی تونل

سید حمیدرضا کریمی تبار<sup>۱</sup>، فرنوش باسلیقه<sup>\*۲</sup>، مجید نیک خواه<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲ و ۳- استادیار، دانشگاه صنعتی شاهرود

(تاریخ وصول: ۹۹/۰۱/۱۶، تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۵/۲۵)

#### چکیده

با توجه به نقش تونل های ترافیکی در شبکه حمل و نقل، ملاحظات ایمنی و پدافند غیرعامل در این سازه ها اهمیت زیادی دارد. پوشش سازه ای تونل در مواجهه با انفجارهای داخلی تونل ناشی از عملیات خراب کارانه می تواند دچار آسیب های زیادی شود، بنابراین بررسی تأثیر و آسیب های ناشی از آن، در موضوع پدافند غیرعامل دارای اهمیت فراوانی است. در این مقاله یک انفجار شدید در ارتفاع ۳ متری از سطح تونل و در وسط آن، به میزان انرژی معادل ۲۵۰ کیلوگرم TNT، توسط نرم افزار عددی LS\_DYNA مدل سازی شده است. مدل عددی به صورت کوپل کامل سیال و سازه (FSI) صورت گرفته است. جهت ارزیابی پارامترهای دینامیکی سازه، میزان جابه جایی و سرعت در پنج نقطه از تونل بررسی شده است. در این تحقیق، مشخصات مهندسی یکی از تونل های موجود در نظر گرفته شده و از دو مقطع D شکل و دایره ای شکل، با عرض ۶ متر برای توسعه مدل ها استفاده شده است. نتایج کلی بیانگر آن است که در اثر انفجار داخل تونل، پوشش بتنی دچار آسیب شده و سرعت بیشینه ایجاد شده در مقطع D شکل، بیشتر از مقطع دایره ای شکل است ولی جابه جایی در آن کمتر است.

واژه های کلیدی: تونل، پوشش بتنی، مدل سازی عددی، انفجار، LS\_DYNA.

## Numerical Modeling of Damage Caused by Internal Explosion on the Tunnel Concrete Lining

H. Karimi Tabar, F. Basaligheh\*, M. Nikkhah

Shahrood University of Technology

(Received: 04/04/2020, Accepted: 08/10/2020)

#### Abstract

In general, due to the role of traffic tunnels, structural safety and defense considerations in these structures are very important. The structural lining of the tunnel can cause a lot of damage under the internal explosions resulting from malicious operations. Therefore, it is important to investigate the impact and damage caused by it. In this paper, the gas explosion at a height of 3 meters above ground level in the middle of the tunnel is modeled as the energy equivalent of 250 kilograms of TNT. A fully coupled numerical model has been made as the fluid-structure interaction (FSI) effects. To evaluate the dynamic parameters of the structure, the displacement and velocity in five points of the tunnel were investigated. In this research, engineering characteristics of one of the existing tunnels have been considered and two D shape and circular cross sections with a width of 6 meters are used to develop models. The overall results indicate that in because of the damage caused by the internal explosion, the tunnel is damaged and the maximum velocity generated at the D shape cross section is larger than the circular section, but the displacement is lower.

**Keywords:** Tunnel, Concrete Cover, Numerical Modelling, Explosion, LS\_DYNA.

## ۱- مقدمه

منفجره و بررسی سازوکار تخریب سازه و میزان گسترش آسیب در سازه پرداخته‌اند نتایج نشان داد تأثیر انفجار ابتدا بر روی طاق قوسی و کف وارد شد و سپس در امتداد جهت شعاعی و طولی انتشار یافت [۱۰]. با توجه به اینکه تاکنون در زمینه انفجار در داخل تونل تحقیقات اندکی صورت پذیرفته است، بنابراین در این تحقیق، سعی شده که با استفاده از نرم‌افزار LS\_DYNA به بررسی رفتار سازه تونل در دو حالت مقطع D شکل و دایره‌ای شکل پرداخته شود. مقطع تونل‌ها ۶ متر و ضخامت پوشش بتنی آن، ۸۰ سانتی‌متر و میزان خرج انفجاری معادل برابر ۲۵۰ کیلوگرم است. در جدول (۱)، معیار بیشینه سرعت ذره‌ای (PPV) برای شناخت میزان آسیب در نواحی مختلف آورده شده است [۱۱]. در جدول (۲)، وزن مواد منفجره که می‌تواند توسط وسایل نقلیه مختلف حمل شود، آورده شده است. بنابراین برای یک انفجار سبک میزان ۲۵۰ کیلوگرم ماده منفجره TNT که به‌طور میانگین توسط یک خودروی معمولی می‌تواند حمل شود، در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- نوع آسیب ایجاد شده بر اساس سرعت وارده [۱۱].

ناحیه آسیب	نوع آسیب	بیشینه سرعت ذره‌ای (متر بر ثانیه)
۱	خرابی کلی	۱۲
۲	خرابی موضعی	۴
۳	خرابی غیردائمی	۰/۹ - ۱/۸

جدول ۲- وزن معادل ماده منفجره در وسایل نقلیه [۱۲].

ظرفیت حدودی خرج انفجاری (کیلوگرم)	نوع وسیله نقلیه
۲۲۷	ماشین سواری
۴۵۴	ماشین ون
۱۸۱۴	کامیون کوچک
۴۵۳۶	کامیون معمولی
۲۷۲۱۶	تریلی

## ۲- مدل‌سازی عددی

بررسی تأثیر انفجار بر روی پوشش بتنی تونل تحت انفجار داخل تونل توسط مدل‌سازی عددی انجام شده است.

## ۲-۱- هندسه مدل

در شکل (۱)، هندسه مدل‌سازی عددی به ابعاد  $۲۰ \times ۱۰ \times ۱۴$  متر در نرم‌افزار عددی LS\_DYNA که یک نرم‌افزار معتبر مبتنی بر روش عددی المان محدود است شامل توده سنگ، تونل، هوا و خرج انفجاری را نشان می‌دهد. در این راستا، دو نوع هندسه مختلف تونل به عرض ۶ متر با مقاطع D شکل و دایره‌ای، واقع در توده سنگ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به‌منظور کم کردن حجم محاسبات و با توجه به تقارن موجود در مدل هندسی، از مدل یک‌چهارم استفاده شده است.

با توجه به گسترش روزافزون استفاده از تونل‌ها، طراحی ایمنی تونل‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. مهندسی تونل نقش مهمی در بهبود شبکه‌های حمل‌ونقل ایفاء می‌کند. با این حال، یک حادثه امنیتی در فضای به نسبت محدود یک تونل می‌تواند منجر به تلفات انسانی، خسارات مالی و خسارت‌های اقتصادی و عواقب اجتماعی منفی شود. از جمله مواردی که باید در طراحی مد نظر قرار گیرد، بررسی پاسخ دینامیکی آن‌ها تحت بار انفجار است. بنابراین با توجه به اهمیت سازه‌های زیرزمینی، تحقیقات زیادی بر روی اثر انفجار بر اینگونه سازه‌ها انجام شده است. مطالعات مفیدی در مورد انفجار بر سازه‌های زیرزمینی در معرض بار انفجار صورت گرفته است. برای مثال، برخی از محققان آزمون‌های مدل‌سازی سانتی‌متری را برای توصیف واکنش‌های تونل‌ها تحت بار انفجار انجام داده‌اند [۱]. همچنین در بررسی شمع‌های مدفون در خاک، شبیه‌سازی عددی پاسخ دینامیکی سازه‌های شمع تحت بارهای آتشیاری با استفاده از نرم‌افزار LS\_DYNA در تحقیقات بسیاری انجام گرفته است. در مقاله جاباسینگ و همکاران به بررسی انفجار درون خاک و انتشار موج انفجاری و تأثیرات آن بر جابه‌جایی شمع و تنش‌های مؤثر آن پرداخته شده است نتایج نشان می‌دهد که قسمت بالایی شمع آسیب‌پذیر است و پاسخ شمع با فاصله از مواد منفجره از بین می‌رود [۲]. بررسی میزان تأثیر آرماتور مورد استفاده در شمع نیز در مقاله دیگری توسط ایشان انجام شده است [۳]. آزمایش‌های تحقیقاتی سازوکارهای مختلف انفجار را نشان داده‌اند و در نتیجه رویکردهای پیشنهادی برای پیش‌بینی میزان تخریب منابع انفجارهای مرتبط را پیشنهاد کرده‌اند [۴]. همچنین از LS\_DYNA برای بررسی پاسخ‌های دینامیکی تونل‌های مترو، که در معرض انفجار در سطح زمین قرار دارند بهره برده شده است، نتایج عددی نشان می‌دهد که قسمت بالایی تونل با جهت‌های مختلف از ۰ تا ۲۲ درجه و فاصله ۰ تا ۷ متر دورتر از مرکز مواد منفجره، مناطق آسیب‌پذیر هستند و تونل مترو ممکن است زمانی ایمن باشد که عمق تونل بیشتر از ۷ متر باشد و جرم تی ان تی در زمین بیش از ۵۰۰ کیلوگرم نباشد [۵]. یانگ و همکاران در سال ۱۹۹۷ پاسخ سازه زیرزمینی را تحت اثر بار انفجار سطحی بررسی کردند [۶]. همچنین آقای مبارکی و واقفی در نرم‌افزار LS\_DYNA به بررسی تأثیر انفجار سطحی بر روی تونل مدفون در خاک با چهار مقطع باکسی، دایره‌ای، نعل اسبی و نیمه بیضی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بیشترین فشار موجود و جابه‌جایی مربوط به تاج تونل و دقیقاً در زیر آن است. صفا پیمان و همکاران با توجه به این مقاله به بررسی معیارهای دیگر از جمله تنش فون مایز پرداخته‌اند [۷] و [۸]. در زمینه انفجار داخلی تونل مطالعات کمی انجام شده است. در زمینه گسترش موج انفجار در تونل‌های مستطیلی و بررسی فشار حداکثر در محل‌هایی داخل تونل تحقیقاتی توسط اوستیپوست و همکاران انجام شده است [۹]. آقای لی و همکاران نیز، به بررسی انفجار داخلی تونل تحت ۲۵۰۰ کیلوگرم ماده

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

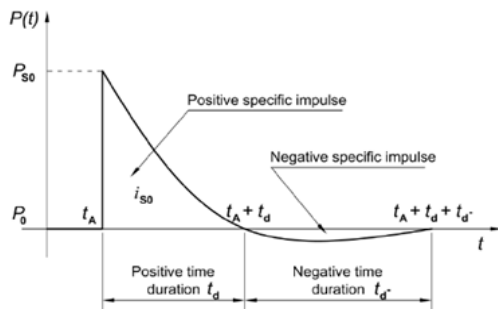
و

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (3)$$

در این معادله،  $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$  ثابت‌های معادله و  $\rho/\rho_0$  نسبت چگالی و  $E_0$  انرژی داخلی واحد حجم است. در جدول (۴) پارامترهای مورد نظر برای هوا در مدل‌سازی عددی آمده است [۱۰].

جدول ۳- مشخصات خرج انفجاری مدل‌سازی عددی.

$\rho$ (KG/M <sup>3</sup> )	$V_D$ (M/S)	$P_{C-J}$ (GPa)	$A$ (MPa)
۱۶۳۰	۶۹۳۰	۲۱	۳/۷۳۸E۵
$B$ (MPa)	$R_1$	$R_2$	$\omega$
۳/۷۴۷E۳	۴/۱۵	۰/۹	۰/۳۵
$V_0$	$E_0$ (MPa)		
۱	۶E۳		



شکل ۲- نمودار شماتیک تاریخچه زمانی بارگذاری انفجار [۱۴].

جدول ۴- مشخصات هوا در مدل‌سازی عددی.

$\rho$ (KG/M <sup>3</sup> )	$C_0 \sim C_4$	$C_4 \sim C_5$
۱/۲۹	۰	۰/۴
$C_6$	$E_0$ (J/M <sup>3</sup> )	$V_0$
۰	۲/۵E۵	۱

#### ۴-۲- توده سنگ

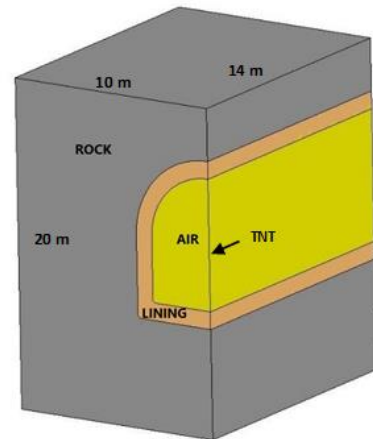
توده سنگ دربرگیرنده تونل و اطراف تونل به صورت مدل رفتاری MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC مدل شده است که می‌تواند به طور مؤثری اثر نرخ کرنش بالا بر سنگ اطراف را تحت بارگذاری انفجار نشان دهد. رابطه آن به شرح زیر است:

$$\sigma_y = \left(1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C}\right)^{\frac{1}{\beta}}\right) (\sigma_0 + \beta E_P \epsilon_{P, EFF}) \quad (4)$$

و

$$E_P = E_{Tan} E_0 / (E_0 - E_{Tan}) \quad (5)$$

که در این رابطه،  $\sigma$  مقاومت تسلیم اولیه،  $\sigma_y$  سختی مقاومت تسلیم،  $\beta$  پارامتر سختی که بین ۰ و ۱ است،  $C$  و  $p$  پارامترهای نرخ کرنش،  $\epsilon_{p, eff}$



شکل ۱- هندسه مدل‌سازی اجزاء محدود.

در مدل‌سازی عددی برای المان بندی از المان‌های هشت گره‌ای SOLID-164 استفاده شده است. اندازه المان‌ها در نزدیک‌ترین نقطه به محل انفجار ۱۰ سانتی‌متر و در قسمت‌های دیگر با اهمیت کمتر، به ۴۰ سانتی‌متر نیز می‌رسد. یک توصیف خلاصه از مدل‌های مواد اختصاص داده شده برای تونل، شارژ تی‌ان‌تی، هوا و توده سنگ در این بخش ارائه شده است.

#### ۲-۲- بار دینامیکی ناشی از خرج انفجاری

ماده انفجاری به صورت بخش مجازی از طریق دستور INITIAL\_VOLUME\_FRACTION\_GEOMETRY در بستر فضای هوای موجود داخل تونل قرار گرفته است. میزان معادل خرج انفجاری برای انفجار گاز، برابر با ۲۵۰ کیلوگرم TNT در نظر گرفته شده است. مدل ماده خرج انفجاری در نرم‌افزار نیازمند تعیین معادله حالت (EOS) است. برای خرج انفجاری از ماده HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN استفاده شده است [۱۳].

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

که در آن،  $P$  برابر با فشار ناشی انفجار،  $E$  برابر با انرژی داخلی بر واحد حجم،  $V$  حجم نسبی ماده منفجره،  $R_1, R_2, B, A, \omega$  ثابت‌های ماده هستند. در جدول (۳)، مشخصات خرج انفجاری مدل آمده است [۷].

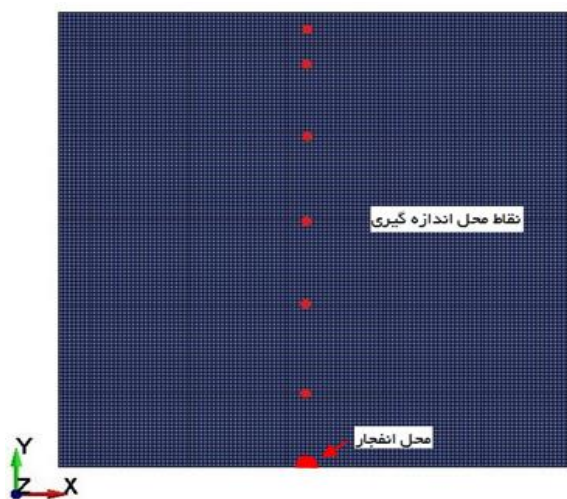
بارگذاری انفجار شامل یک تاخیر است، که نشان دهنده‌ی زمان رسیدن موج انفجار به نقطه‌ی مورد نظری باشد. پس از آن محدوده‌ی تکانه‌ی ویژه مثبت قرار دارد، که جسم تحت فشار است و بلافاصله پس از آن جسم تحت کشش قرار می‌گیرد که تکانه‌ی ویژه‌ی منفی نام دارد. در شکل (۲) نمودار شماتیک از بارگذاری انفجاری نشان داده شده است.

#### ۳-۲- هوا

برای مدل‌سازی عددی هوا با ماده شماره ۹ نرم‌افزار MAT\_NULL معادله حالت EOS\_PLYNONOMIAL\_LINEAR مدل می‌شود [۱۳].

در این معادله انرژی داخلی واحد حجم،  $E$  و فشار،  $P$ ، خطی هستند و معادله آن به شرح زیر است:

در این رابطه،  $\Delta P_f$  اضافه فشار بیشینه ناشی از موج انفجار،  $Z$  فاصله مقیاس شده،  $R$  فاصله از محل انفجار و  $W$  میزان خرج انفجار است. برای صحت سنجی مقادیر به دست آمده در نتایج مقاله، در ابتدا مدل سازی خرج انفجاری در هوا صورت گرفته و با روابط تجربی مقایسه شده است. مدل هوا، مکعبی به ابعاد ۳ متر است و خرج ۱۰۰ کیلوگرم TNT به آن وارد شده است. در شکل (۴)، نتایج حاصل از مدل سازی عددی و رابطه تجربی در نقاط اندازه گیری نشان داده شده در شکل (۳) به صورت نمودار آورده شده است. چنانچه ملاحظه می شود از نظر مقادیر و روند تغییرات انطباق قابل قبولی بین نتایج مدل سازی عددی و رابطه تجربی وجود دارد و بنابراین صحت مدل سازی عددی بارگذاری انفجار تأیید می شود.



شکل ۳- فاصله نقاط اندازه گیری از محل انفجار.

در شکل (۳) نقاط محل اندازه گیری با فاصله های مشخص نسبت به محل انفجار نشان داده شده است. این فاصله ها با توجه به میزان خرج انفجاری در رابطه (۷) گذاشته شده است و فاصله مقیاس شده آن به دست آمده است. با توجه به این، میزان فشار در شکل (۴) آورده شده است.

#### ۴- نتایج و بحث

به منظور بررسی تأثیر انفجار بر روی پوشش بتنی دو مقطع مختلف تونل تعداد پنج نقطه در پیرامون تونل از نظر میزان جابه جایی و میزان سرعت وارده به سازه طبق شکل (۵) در نظر گرفته شده است. این پنج نقطه به ترتیب A تا E برای مقطع دایره ای شکل و F تا J برای مقطع D شکل است. شکل (۶) مرزبندی تنش فون مایزر را هنگام گسترش موج انفجار بر سازه تونل و نحوه اعمال بار انفجار و تأثیر آن بر روی پوشش بتنی را در سه زمان ۱، ۲ و ۴ میلی ثانیه را برای مقطع دایره ای نشان می دهد. در شکل (۷) میزان تنش فون مایزر مقطع D شکل، هنگام گسترش موج انفجار در زمان ۲ و ۴ میلی ثانیه نشان داده شده است.

کرنش پلاستیک مؤثر،  $E_p$  مدول سختی پلاستیک و  $E_{Tan}$  مدول تانژانتی است که مشخصات آن در جدول (۵) آمده است [۱۰].

جدول ۵- مشخصات فیزیکی و مکانیکی توده سنگ مدل سازی عددی.

$\rho$ (KG/M <sup>3</sup> )	E (GPa)	$P_r$	$\sigma_y$ (MPa)
۲۷۰۰	۲۳	۰/۲۲	۵/۶
$E_{Tan}$ (GPa)	$\beta$	C	P
$\gamma$	۱	$2/5E-6$	۴
$F_s$	$V_p$		
۰/۰۱	۰		

#### ۵-۲- پوشش بتنی تونل

برای مدل سازی این قسمت، از ماده شماره ۲۷۲ نرم افزار که MAT\_RHT است، در مدل سازی استفاده شده است. این مدل رفتارهای مکانیکی را در نظر می گیرد و قادر به توصیف فاز تغییر شکل الاستیک، فاز سخت شونده گی خطی و فاز نرم شدگی بتن تحت بارگذاری ضربه ای است. مقاومت فشاری بتن ۲۵ مگاپاسکال است. مشخصات مقطع پوشش بتنی به کار رفته در مدل سازی به صورت جدول (۶) ارائه شده است [۱۰].

جدول ۶- مشخصات پوشش بتنی تونل مدل سازی عددی.

$\rho$ (KG/M <sup>3</sup> )	G (GPa)	$E_{PSF}$	B0
۲۳۱۴	۱۶/۷	۲	۱/۲۲
B1	$T_1$ (GPa)	A	N
۱/۲۲	۳۵/۲۷	۱/۶	۰/۶۱
$F_c$ (MPa)	$F^*c$	$F^*t$	
۲۵	۰/۱۸	۰/۱	

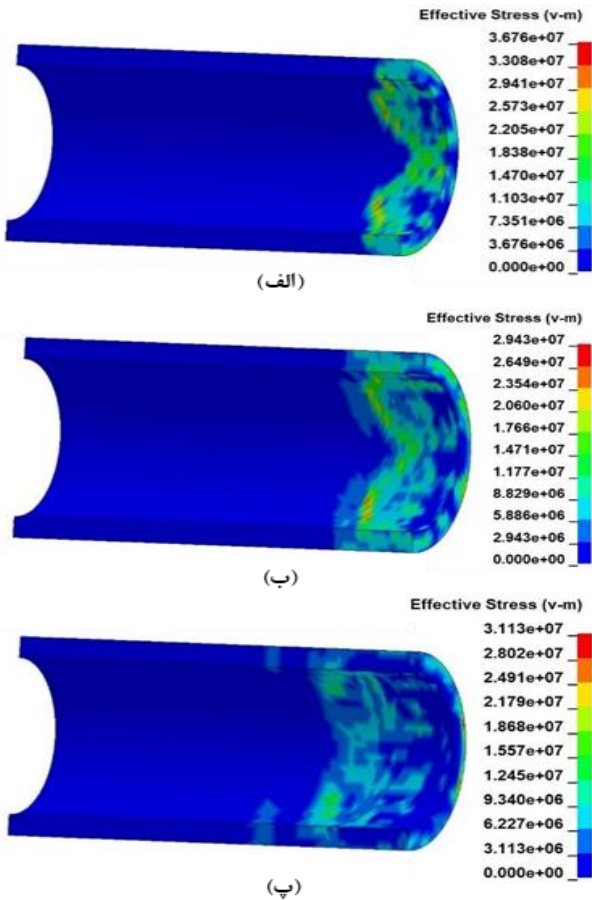
#### ۳- صحت سنجی مدل

با توجه به میزان خرج انفجاری مورد بررسی، عملاً صحت سنجی ۲۵۰ کیلوگرم ماده منفجره در محیط واقعی امکان پذیر نمی باشد. بنابراین با توجه به روابط تجربی موجود به بررسی این موضوع پرداخته شده است. با توجه به اینکه بستر انفجار در هوا است، از رابطه تجربی توسعه داده شده توسط هنریچ و همکاران [۱۵] برای اطمینان از صحت مدل سازی استفاده شده است. در این رابطه هنریچ و همکاران میزان فشار حداکثر ناشی از انفجار را در فاصله مقیاس شده ( $Z$ ) به دست آورده اند که به شرح زیر است:

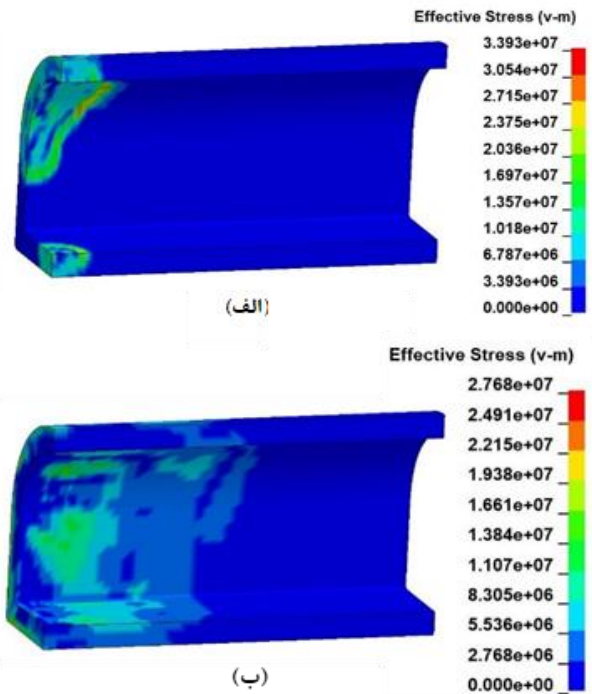
$$\Delta P_f = \begin{cases} \frac{1.40717}{Z} + \frac{0.55397}{Z^2} - \frac{0.03572}{Z^3} + \frac{0.000625}{Z^4} & 0.05 \leq Z \leq 0.3 \\ \frac{0.61938}{Z} - \frac{0.03262}{Z^2} + \frac{0.21324}{Z^3} & 0.3 \leq Z \leq 1 \\ \frac{0.0662}{Z} + \frac{0.405}{Z^2} + \frac{0.3288}{Z^3} & 1 \leq Z \leq 10 \end{cases} \quad (۶)$$

و

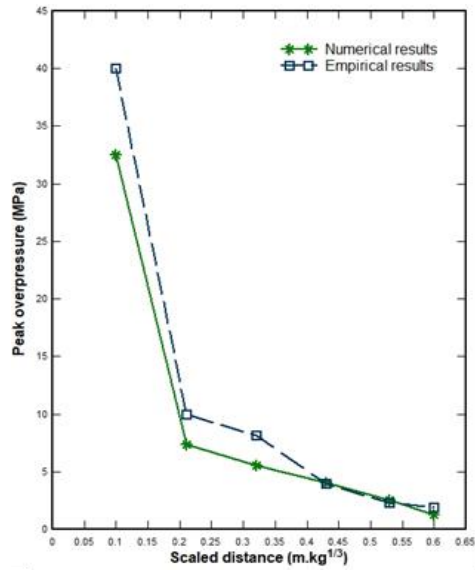
$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (۷)$$



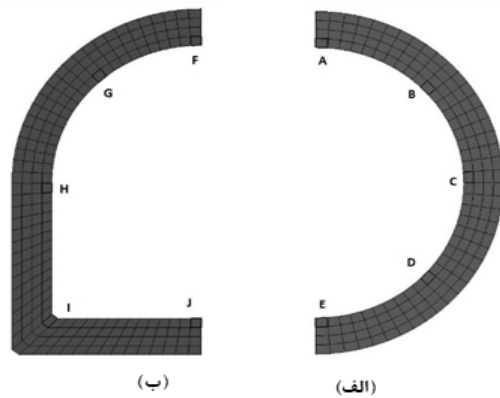
شکل ۶- کانتور تنش فون مایز ایجاد شده در پوشش بتنی تونل مقطع دایره‌ای در زمان‌های: الف) ۱ ms، ب) ۲ ms و پ) ۴ ms.



شکل ۷- کانتور تنش فون مایز ایجاد شده در پوشش بتنی تونل مقطع D شکل در زمان‌های: الف) ۲ ms و ب) ۴ ms.



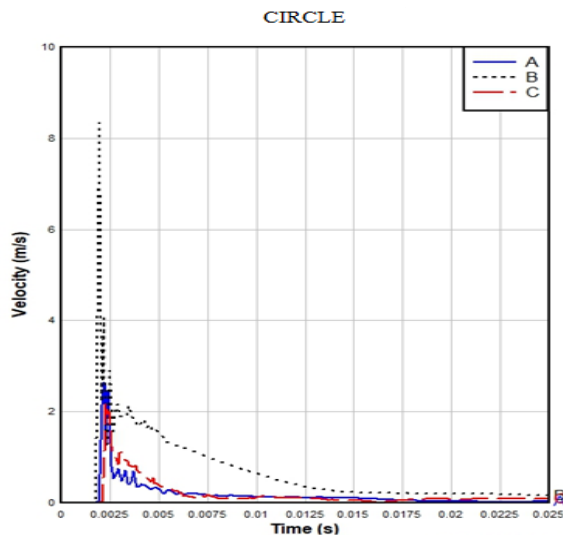
شکل ۴- مقایسه نتایج رابطه تجربی و مدل سازی عددی.



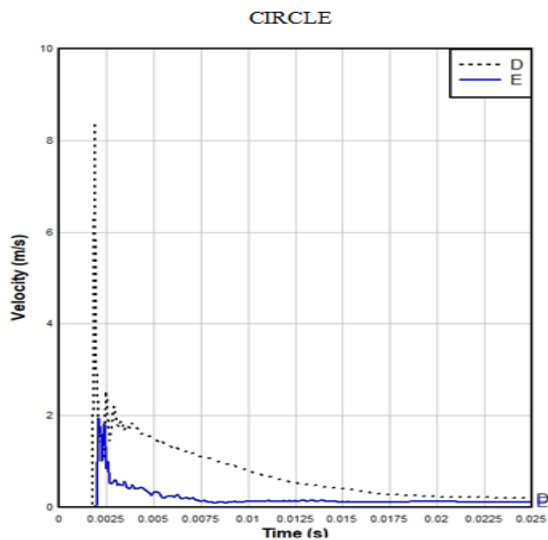
شکل ۵- نقاط مورد بررسی در مقطع تونل: الف) مقطع دایره‌ای و ب) مقطع D شکل.

شکل (۸) نشان می‌دهد که سازه تونل دایره‌ای شکل در اثر انفجار دچار تغییر شکل دائم شده است و بیشترین میزان تغییر شکل ماندگار در سازه نیز در نقاط D و B به ترتیب برابر ۱۱ و ۸ میلی‌متر است. به دلیل تغییر فشار ناشی از بارهای انفجاری و همچنین غیرخطی بودن رفتار بتن، تفاوت در پاسخ سازه تونل مشاهده می‌شود. شکل (۹) میزان جابه‌جایی سازه‌ای در مقطع D شکل را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از نمودار مشاهده می‌شود بیشترین جابه‌جایی برابر ۱۲/۵ میلی‌متر در نقطه G و کمترین مقدار برابر ۰/۵ میلی‌متر در نقطه J به دست آمده است.

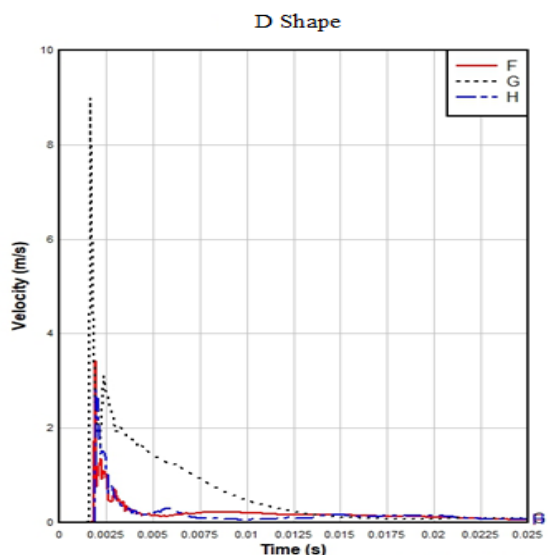
برای بررسی دقیق میزان سرعت ذره‌ای ایجاد شده در پوشش بتنی سازه تونل و جهت عدم تداخل نتایج، نقاط مورد نظر به دو قسمت فوقانی و تحتانی جدا شده‌اند. در تونل دایره‌ای شکل، قسمت فوقانی شامل نقاط A، B و C و در تونل با مقطع D شکل، شامل نقاط F، G و H است.



شکل ۱۰- حداکثر سرعت در نقاط A، B و C مقطع دایره‌ای.

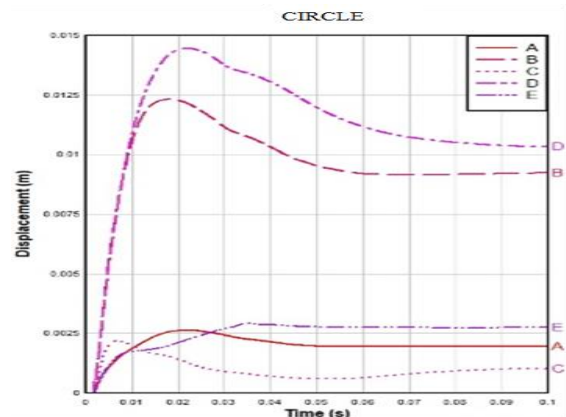


شکل ۱۱- حداکثر سرعت در نقاط D و E مقطع دایره‌ای شکل.

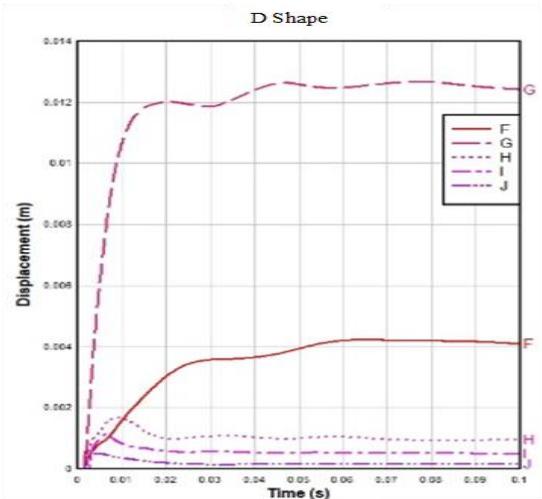


شکل ۱۲- حداکثر سرعت در ذرها در نقاط H، G و F مقطع D شکل.

با توجه به نمودار شکل‌های (۸) و (۹)، همان‌طور که انتظار می‌رود، بیشترین تغییر شکل‌ها در نقاطی است که بالاترین سرعت ذره‌ای به آن‌ها اعمال شده است. در نمودار شکل‌های (۱۰) و (۱۱)، میزان بیشینه سرعت ذره‌ای در تونل با مقطع دایره‌ای نشان داده شده است. همچنین در نمودارهای شکل‌های (۱۲) و (۱۳) میزان بیشینه سرعت در تونل با مقطع D شکل آمده است. میزان سرعت حداکثر وارده در نقطه G، که مربوط به تونل با مقطع D شکل است، به حدود ۹ متر بر ثانیه می‌رسد.



شکل ۸- میزان جابه‌جایی در نقاط A تا E تونل دایره‌ای.



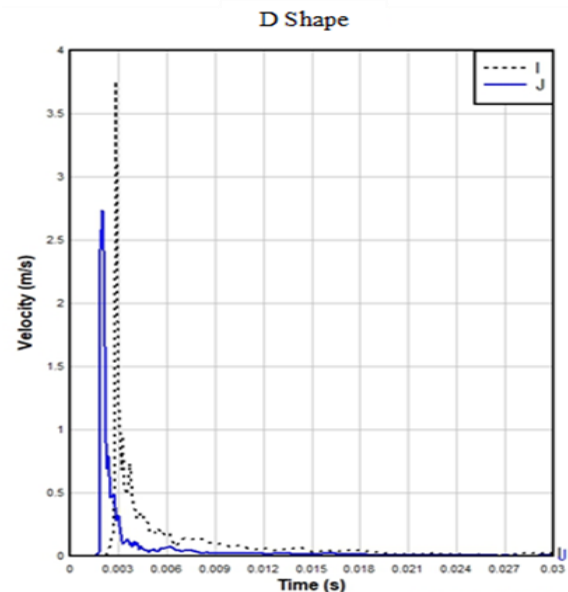
شکل ۹- میزان جابه‌جایی در نقاط F تا J مقطع D شکل.

در حالی که میزان حداکثر سرعت ذره‌ای در تونل دایروی حدود ۹ درصد کمتر است. حال با توجه به این موضوع، مشاهده می‌شود میزان بیشترین جابه‌جایی در تونل دایروی حدود ۱۶ درصد بیشتر است. البته در مقطع D شکل تغییر شکل به صورت ماندگار است و بتن حالت ارتجاعی خود را از دست می‌دهد. میزان خرابی سازه ارتباط مستقیم با بیشینه سرعت ذره‌ای ایجاد شده در آن سازه دارد. در صورتی که میزان سرعت در سازه به ۱۲ متر بر ثانیه برسد، می‌توان انتظار خرابی و شکست کلی را داشت. برای سرعت‌های کمتر، خرابی به صورت موضعی است [۹].



## مراجع

- [1] Kutter, B. L.; O'Leary, L. M.; Thompson, P. Y.; Lather, R. "Gravity-Scaled Tests on Blast-Induced Soil-Structure Interaction"; J. Geotech. Eng. 1988, 114, 431-447.
- [2] Jayasinghe, L. B.; Thambiratnam, D. P.; Perera, N.; Jayasooriya, J. H. A. R. "Computer Simulation of Underground Blast Response of Pile in Saturated Soil"; Comput. Struc. 2013, 120, 86-95.
- [3] Jayasinghe, L. B.; Thambiratnam, D. P.; Perera, N.; Jayasooriya, J. H. A. R. "Blast Response of Reinforced Concrete Pile Using Fully Coupled Computer Simulation Techniques"; Comput. Struc. 2014, 135, 40-49.
- [4] Dong, L.; Sun, D.; Li, X.; Ma, J.; Zhang, L.; Tong, X. "Interval Non-Probabilistic Reliability of Surrounding Jointed Rockmass Considering Microseismic Loads in Mining Tunnels"; Tunn. Undergr. Sp. Tech. 2018, 81, 326-335.
- [5] Yang, Y.; Xie, X.; Wang, R. "Numerical Simulation of Dynamic Response of Operating Metro Tunnel Induced by Ground Explosion"; Rock Mech. Rock Eng. 2010, 2, 373-384.
- [6] Yang, Z. "Finite Element Simulation of Response of Buried Shelters to Blast Loadings"; Finite Elem. Anal. Des. 1997, 24, 113-132.
- [7] Mobaraki, B.; Vaghefi, M. "Numerical Study of the Depth and Cross-Sectional Shape of Tunnel Under Surface Explosion"; Tunn. Undergr. Sp. Tech. 2015, 47, 114-122.
- [8] پیمان، صفا؛ سنبلستان، سیدحسین "ارزیابی رفتار سازه‌های زیرزمینی تحت بار انفجار بر مبنای سرعت بیشینه ذرات؛" مجله علوم و فناوری‌های پدافند نوین، سال هشتم، شماره ۱، صفحه ۵۰-۴۵، ۱۳۹۶.
- [9] Uystepuyst, D.; Monnoyer, F. "A Numerical Study of the Evolution of the Blast Wave Shape in Rectangular Tunnels"; J. Loss Prevent Proc. 2015, 34, 225-231.
- [10] Li, Z.; Wu, S.; Cheng, Z.; Jiang, Y. "Numerical Investigation of the Dynamic Responses and Damage of Linings Subjected to Violent Gas Explosions inside Highway Tunnels"; Shock Vib. 2018.
- [11] Hendron, A. J. "Engineering of Rock Blasting on Civil Projects"; Int. J. Rock Mech. Min. 1978, 15, 66-66.
- [12] Koneshwaran, S. "Blast Response and Sensitivity Analysis of Segmental Tunnel"; Ph.D. Thesis, Queensland University of Technology, 2014.
- [13] LSTC, LS-DYNA User's Manual. Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- [14] Trajkovski, J.; Kunc, R.; Perenda, J.; Prebil, I. "Minimum Mesh Design Criteria for Blast Wave Development and Structural Response-MMALE Method"; Lat. Am. J. Solids Struct. 2014, 11(11), 1999-2017
- [15] Henrych, J.; Major, R. "The Dynamics of Explosion and Its Use"; Amsterdam Elsevier, 569, 1979.



شکل ۱۳- حداکثر سرعت ذره‌ای در نقاط I و J مقطع D شکل.

در همه نقاط تونل‌های D شکل و دایره‌ای با توجه به سرعت‌های کمتر از ۴ متر بر ثانیه، شرایط بحرانی وجود ندارد. از آنجا که میزان ماده منفجره ۲۵۰ کیلوگرم، در حد انفجار توسط یک ماشین سواری است، در صورتی که نوع وسیله که در آن ماده منفجره جاسازی شده باشد کامیون و بزرگ‌تر باشد، می‌تواند آسیب جدی به تونل وارد نماید. اما در نقاط B و D مقطع دایره‌ای و همچنین نقطه G مقطع D شکل، مشاهده می‌شود که مقادیر سرعت بالاتر از بقیه نقاط است و بنابراین در زمان طراحی سازه باید مورد توجه قرار گیرد.

## ۵- نتیجه‌گیری

بر اساس تحقیق صورت گرفته مشخص شد که نرم‌افزار LS\_DYNA که در این تحقیق برای مدل‌سازی انفجار در تونل استفاده شده است، نرم‌افزار مناسبی است که قابلیت مدل‌سازی انفجار را در سازه‌های ژئوتکنیکی و سازه‌ای دارد. نتایج نشان داد که سرعت حداکثر ذره‌ای ایجاد شده در المان‌های موقعیت B و D تونل دایره‌ای، بسیار بیشتر از مقادیر آن در تاج، کناره و کف تونل است، بنابراین میزان آسیب در این نقاط، بیش از سایر نقاط تونل است. همچنین حداکثر جابه‌جایی در آن المان‌ها اتفاق می‌افتد. بیشترین میزان سرعت ذره‌ای و جابه‌جایی در تونل D شکل با توجه به نحوه انتشار موج انفجار، در قوس بالای تونل واقع می‌شود. میزان خرج انفجاری در هر دو مقطع یکسان است، اما مشاهده می‌شود، با توجه به اینکه سرعت ذره‌ای بالاتری به المان‌های D شکل به نسبت مقطع دایره‌ای ایجاد می‌شود، اما جابه‌جایی و تغییر شکل در آن کمتر است. بنابراین نتایج نشان می‌دهد که تونل‌های با مقطع D شکل دارای عملکرد مناسب‌تری در برابر بارهای دینامیکی در مقایسه با مقطع دایره‌ای شکل هستند.