

## بررسی تأثیر موجگیر در تونل با خم ۹۰ درجه بر کاهش فشار ناشی از انفجار خارج از تونل

صفا پیمان<sup>۱\*</sup>، مهدی طهماسبزاده بائی<sup>۲</sup>

۱- استادیار ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۴/۰۲/۰۸، پذیرش: ۹۴/۰۷/۲۱)

### چکیده

استفاده از موجگیر یکی از راه کارهای مقابله با موج انفجار و کاهش اثرات آن درون سازه های امن زیرزمینی است. در این مقاله درباره اثر موجگیر بر کاهش بیشینه فشار وارد شده به داخل مسیر اصلی تونل بحث می شود. در این راستا، انتشار موج ناشی از انفجار بمب های با وزن ماده منفجره مختلف در فواصل متفاوت از دهانه تونل های دارای موجگیر، شبیه سازی شده است. برای شبیه سازی عددی از نرم افزار AUTODYN، استفاده شده است. با توجه به نسبت بیشینه فشار وارد شده به محل تقاطع موجگیر و بیشینه فشار به دست آمده برای مسیر اصلی بعد از تقاطع، فاصله مناسب موجگیر از دهانه تونل و طول بهینه آن به دست آمده است. نتایج بررسی ها نشان می دهد که موجگیر می تواند بیشینه فشار وارد شده به محل تقاطع را تا مقدار زیادی کاهش دهد. همچنین هر چه بیشینه فشار وارد شده قبل از تقاطع موجگیر بیشتر باشد، طول مناسب (بهینه) موجگیر و درصد کاهش فشار، افزایش می یابد.

**کلید واژه ها:** تونل، موجگیر، موج انفجار، بیشینه فشار

## Effect of Blast Wave Trap In Tunnels with 90 Degrees Bend on Reduction of Pressure Produced by A Explosion Outside The Tunnel

S. Peyman<sup>\*</sup>, M. Tahmasebzadeh

Imam Hossein University

(Received: 27/04/2015; Accepted: 13/10/2015)

### Abstract

*Blast wave trap is one of the ways to deal with and reduce the effects of blast wave inside the secure underground structures. In this paper, the effect of blast wave trap on reducing the overpressure in the main route of the tunnel has been studied. Accordingly, the blast wave propagation of different explosives in various distances from the tunnel entrance including blast wave trap has been simulated. Autodyn software was employed for numerical simulation. Based on the ratio of the overpressure applied to blast wave trap to obtained overpressure of the main route after blast wave trap, the appropriate distance and optimum length of the blast wave trap were calculated. The results show that blast wave trap can significantly reduce the overpressure applied to the blast wave trap zone. Besides, higher values of overpressure before blast wave trap zone leads to an increase of optimum length of blast wave trap along with more pressure reduction.*

**Keywords:** Tunnel, Blast Wave Trap, Blast Wave, Overpressure

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

## ۱. مقدمه

در هر نقطه از داخل تونل با توجه به بیشینه فشار وارد شده به دهانه تونل به دست می‌آید [۱۰].

علاوه بر این، چند شاخه شدن مسیر تونل و استفاده از موجگیرها نیز بر اندازه و کاهش مقدار فشار در هر نقطه از تونل اصلی اثر گذارند. در طی جنگ جهانی دوم فیلیپ آزمایش‌های تجربی زیادی را درباره انتشار موج ناشی از انفجار درون سازه‌های زیرزمینی کارگاهی و مسیرهای زیرزمینی راه‌آهن که به‌عنوان پناه‌گاه مورد استفاده بودند، انجام داد [۱۰]. در این پژوهش‌ها با قرار دادن ابزارهای اندازه‌گیری فشار روی سطوح سازه کاهش موج انفجار درون سازه‌های زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از پژوهش‌های تجربی انجام‌شده توسط فیلیپ و انجام آزمایش‌های جدید، کریستوفرسون [۱۱] در سال ۱۹۴۶ گزارشی را درباره انتشار موج در تقاطع‌ها انتشار داد. این گزارش هنوز هم یکی از مراجع اساسی در زمینه انتشار موج ناشی از انفجار در تقاطع‌ها و موجگیرها است. همچنین در این خصوص نمودارهایی در آیین‌نامه طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجارات هسته‌ای آمریکا [۷] و آیین‌نامه TM 5-855 ایالات متحده آمریکا [۸] ارائه شده است. در مورد انتشار موج انفجار در کانال‌های پیچ و خم‌دار و انشعاب‌دار، اطلاعات و نمودارهایی نیز توسط هنریچ ارائه شد [۱۰]. بررسی تحقیقات انجام‌شده در این زمینه نشان می‌دهد چگونگی انتشار موج انفجار در تونل‌ها و در محل تقاطع‌ها نیازمند پژوهش‌های بیشتری است.

در این مقاله، با توجه به چگونگی انتشار موج انفجار در داخل سازه‌های زیرزمینی و در محل تقاطع تونل‌ها، بعد از صحت‌سنجی نتایج نرم‌افزار AUTODYN، با شبیه‌سازی انفجار با فواصل مختلف از دهانه تونل در موجگیر با خم ۹۰ درجه، طول بهینه موجگیر و محل قرارگیری خم جهت میزان کاهش فشار مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور فرایند انتشار موج انفجار در هوای آزاد، ورودی تونل، داخل مسیر تونل و در محل تقاطع مسیرها شبیه‌سازی می‌شود.

## ۲. بیان مسئله

شکل (۱) نمای کلی یک تونل امن دارای موجگیر و مسیری که جبهه موج انفجار تا سازه امن زیرزمینی طی می‌کند را نشان می‌دهد. هدف این مقاله به دست آوردن مکان مناسب خم و طول بهینه موجگیر با توجه به بیشینه فشار وارد شده به دهانه تونل می‌باشد.

نحوه عمل موجگیر به این صورت است که وقتی که موج انفجار در طول تونل وارد فضای تقاطع می‌شود، ضریبی از موج انفجار در راستای سازه امن، وارد تونل و ضریبی نیز وارد موجگیر می‌شود. موج انفجار وارد شده به موجگیر، با برخورد به انتهای موجگیر انعکاس می‌یابد. با توجه به شدت بیشینه فشار اولیه، بیشینه فشار موج انعکاسی (Pt) ممکن است چند برابر شود و دوباره به تقاطع برگردد. در این حالت نیز ضریبی از موج انفجار انعکاسی در راستای سازه امن، وارد تونل می‌شود. مناسب‌ترین (بهینه‌ترین) طول برای موجگیر هنگامی است که بیشینه فشار وارد شده در راستای سازه امن ناشی از

سازه‌های امن برای محافظت از تأسیسات مهم نظامی و غیر نظامی در برابر آثار سلاح‌های نفوذکننده و دقیق دشمن احداث می‌شوند. مجموعه‌های سازه‌های امن زیرزمینی جزء بهترین گزینه‌ها برای احداث قرارگاه‌های فرماندهی و کنترل، پناهگاه‌های عمومی، انبار سلاح‌ها، تجهیزات مهم و صنایع دفاعی می‌باشند. ورودی یا نقطه اتصال به سطح سازه‌های امن زیرزمینی از نقاط ضعف این سازه‌ها در برابر بارهای انفجاری بوده که در صورت آسیب، ارتباط با محیط خارج قطع شده و افراد و تجهیزات در داخل فضای امن محبوس می‌شوند. بنابراین مسئله اساسی ارائه راهکارهای مقابله با اثرات موج انفجار بر سازه امن، برای تنزل آسیب‌پذیری می‌باشد. بدین منظور از روش‌هایی همچون استفاده از موجگیرها، خم‌ها، موانع هندسی، درب ضد انفجار، الگوهای مختلف ورودی، تعدد ورودی‌ها و خروجی‌ها می‌توان استفاده کرد [۱] که استفاده از موانع هندسی به ویژه موجگیر یکی از روش‌های موثر در کاهش اثرات انفجار در تونل‌ها است.

بررسی اثر موجگیر در کاهش اثرات انفجار، نیازمند شناخت فرایند انتشار موج در هوای آزاد، درون تونل‌های زیرزمینی، تقاطع مسیرها و موجگیرها می‌باشد. درباره‌ی انفجار در هوای آزاد، رابطه‌هایی برای محاسبه بیش‌فشار انفجار بر مبنای فاصله و وزن خرج انفجار، ارائه شده است. از آن جمله می‌توان به روابط ارائه‌شده توسط براد [۲] در سال ۱۹۵۵ و هنریچ [۳] در سال ۱۹۷۹ و کینی و گراهام [۴] در سال ۱۹۸۵ اشاره کرد. همچنین گراف‌های آیین‌نامه TM5-1300 ایالات متحده آمریکا [۵]، مرجع مناسبی برای محاسبه پارامترهای ناشی از انفجار می‌باشد. علاوه بر این، در سال‌های اخیر نیز پژوهش‌هایی توسط سادوسکی، میلز، هلد، بوساد و همکاران و دیگر محققان در این زمینه انجام شده است که در مقاله چانگ و یانگ مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۶].

انتشار موج انفجار درون سازه‌های زیرزمینی از پیچیدگی بیشتری نسبت به انفجار در هوای آزاد برخوردار است. بر این اساس نحوه انتشار موج انفجار درون سازه‌های زیرزمینی و به دست آوردن بیشینه فشار، در بیرون و درون تونل و در محل تقاطع‌ها دغدغه اصلی بسیاری از محققین می‌باشد.

در مورد انتشار موج در ابتدای دهانه تونل، نمودارهایی توسط آیین‌نامه طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجارات هسته‌ای آمریکا [۷] و آیین‌نامه TM 5-855 ایالات متحده آمریکا [۸]، ارائه شده است. خاطر نشان می‌سازد، زاویه راستای انتشار موج انفجاری با راستای تونل، در فشار ورودی دهانه تونل تأثیرگذار است.

در مورد انتشار موج در طول تونل، در سال ۱۹۴۴ ای.بی. فیلیپ گزارشی در مورد انتشار انفجارهای هوایی در تونل‌ها ارائه کرد و رابطه‌هایی توسط هنریچ [۳] در سال ۱۹۷۹ و گیورک و گلوک [۹] در سال ۱۹۸۰ بر مبنای کارهای تجربی و عددی، برای محاسبه کاهش فشار موج انفجار درون تونل‌ها ارائه شد. در این رابطه‌ها فشار

### ۳-۴. نرم افزار و حلگر مورد استفاده

در این پژوهش از هیدروکد توانمند AUTODYN استفاده می شود. با توجه به وجود تغییر شکل های بزرگ و مسائل درگیر با سیالات و گازها نوع حل گر مورد استفاده در شبیه سازی عددی، اویلری انتخاب می شود.

از دیدگاه اویلری برای شبیه سازی حرکت ماده استفاده می شود. در این روش ناظر ساکن بوده و ماده از کنار آن عبور می کند. به عبارتی، شبکه بندی ماده در فضای تحلیل ثابت بوده و این ماده است که در میان شبکه بندی اجازه عبور دارد. به همین دلیل این روش در تغییر فرم های بسیار بزرگ به راحتی عمل می کند.

### ۴. صحت سنجی شبیه سازی

در این قسمت با حل مثال هایی، اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از شبیه سازی های عددی انجام می شود.

#### ۴-۱. انتشار موج انفجار در هوای آزاد

در جدول (۱) و شکل (۲)، بیشینه فشار در فواصل مختلف از محل انفجار ۱۳۶۰ کیلوگرم TNT در هوای آزاد به دست آمده از حل عددی با نتایج گراف های آیین نامه [۵] TM 5-1300 مقایسه شده است. بیشینه فشار و Z فاصله مقیاس شده است که از رابطه زیر [۵] به دست می آید.

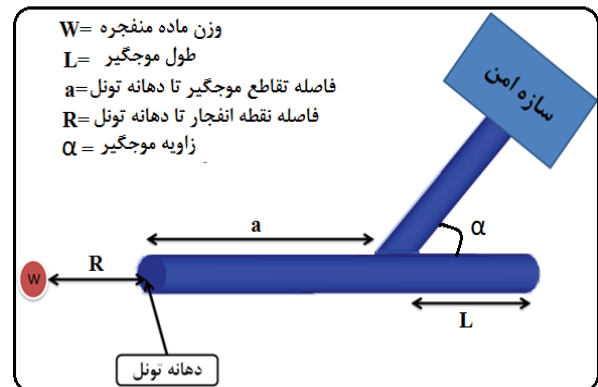
$$Z = R \cdot \left( \frac{1 \text{ Kg}}{W} \right)^{1/3} \quad (1)$$

جدول ۱. مقایسه بیشینه فشار روش عددی با آیین نامه TM5-1300

Z	Pso(bar)		درصد خطا
	AUTODYN	TM5-1300	
۰/۰۹	۳۴۸/۵۶	۳۳۳/۴۸	۴
۰/۱۸	۱۳۶/۴۳	۱۷۴/۳۱	۲۲
۰/۲۷	۸۶/۰۷	۱۰۴/۵۴	۱۸
۰/۳۶	۵۶/۴۵	۶۷/۹۲	۱۷
۰/۴۵	۳۹/۲۴	۴۶/۵۵	۱۶
۰/۵۴	۲۸/۴۵	۳۳/۷۲	۱۶
۰/۶۴	۲۱/۵۱	۲۴/۸۸	۱۴
۰/۷۲	۱۶/۹۳	۱۸/۸۹	۱۰
۰/۸۱	۱۳/۵۳	۱۴/۶۹	۸
۰/۹۰	۱۰/۹۹	۱۱/۷۸	۷
۱/۸۱	۲/۹۹	۲/۴۵	۱۸
۲/۷۱	۱/۸۷	۱/۱۱	۴۱
۳/۶۱	۱/۴۳	۰/۵۷	۶۰

موج انعکاسی، با بیشینه فشار وارد شده در راستای سازه امن ناشی از موج اولیه برابر باشند. از سوی دیگر، اگر بیشینه فشار موج انعکاسی کمتر از بیشینه فشار موج اولیه باشد، طول موجگیر زیاد و اگر بیشتر باشد، طول موجگیر کم می باشد.

این بدین معنی است که طول موجگیر باید اندازه ای باشد تا موج وارد شده به موجگیر زمان کافی برای کاهش فشار هم در حال رفت و هم در حال برگشت را داشته باشد و با میزان بیشینه فشار اولیه وارد در راستای سازه امن، برابر شود.



شکل ۱. نمای کلی یک سازه امن دارای موجگیر

### ۳. شبیه سازی عددی

شبیه سازی عددی انتشار موج ناشی از انفجار بمب های مختلف و با فاصله های متفاوت از دهانه تونل، به صورت سه بعدی با استفاده از نرم افزار AUTODYN انجام می شود.

#### ۳-۱. محیط انتشار موج

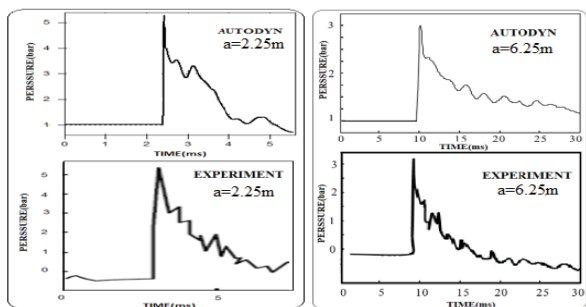
محیط انتشار موج ناشی از انفجار که هوا می باشد، به عنوان گازی ایده آل پر شده است. به منظور حذف اغتشاشات و اثر انعکاس موج در خارج و همگنی موج در ورودی تونل، مرز محیط انتشار بیرون از تونل به گونه ای فرض شده است که موج انفجار اجازه عبور از آن را داشته و در بیرون تونل موج انعکاسی وجود ندارد.

#### ۳-۲. جنس، ابعاد و مقطع تونل

مقطع تونل مورد بررسی که دارای موجگیر با زاویه تقاطع ۹۰ درجه می باشد، مربعی با طول ضلع ۲ متر در نظر گرفته می شود. در شبیه سازی عددی تونل ها به صورت سه بعدی مدل می شوند. در این بررسی جنس پوشش تونل به صورت صلب در نظر گرفته و با تقریب مناسب از زبری سطح آن صرف نظر می شود.

#### ۳-۳. ماده منفجره

خرج انفجاری به شکل کروی، بدون پوشش و به وزن های متفاوت (شعاع های مختلف) از جنس TNT مدل شده است (وزن خرج ها (W) به کیلوگرم می باشد).



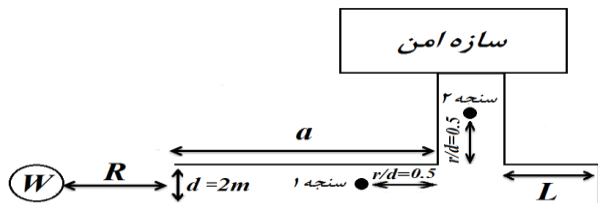
شکل ۵. مقایسه تاریخچه زمانی فشار حل عددی AUTODYN با نتایج تجربی [۱۲]

### ۵. شبیه سازی و نتایج عددی

در شکل (۶) مسیر ورودی تونل دارای موجگیر با خم ۹۰ درجه در یک سازه امن زیرزمینی و جدول (۳) مشخصات مدل سازی آورده شده است. شبیه سازی تونل برای خرج های با وزن ۱۵۰۰، ۳۰۰۰ و ۵۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله های نشان داده شده از دهانه تونل انجام می شود (مقادیر متفاوت وزن و فاصله برای به دست آوردن بیشینه فشارهای مختلف در سنجه یک است و بیانگر تهدید خاصی نیست). در شکل (۷) شبیه سازی حرکت جبهه موج انفجار در تونل دارای موجگیر با خم ۹۰ درجه در زمان های مختلف برای یک انفجار در نرم افزار AUTODYN نشان داده شده است. موج انفجار با ورود به داخل تونل، هوای داخل تونل را با فشار زیاد مانند پیستون به جلو می راند.

برای به دست آوردن نمودار تاریخچه زمانی فشار در تونل دارای موجگیر با طول های متفاوت، دو سنجه در محل های نشان داده شده در شکل (۶) و با فاصله  $r/d=0.5$  (r=فاصله سنجه تا تقاطع و d=ابعاد تونل)، قبل و بعد از تقاطع قرار داده می شوند.

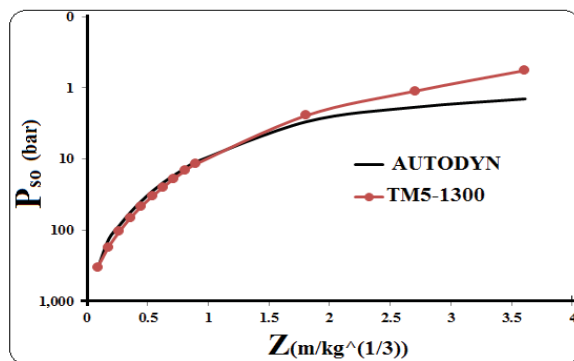
در شکل های (۸-۱۷) تاریخچه زمانی فشار سنجه های ۱ و ۲ برای حالت های مختلف انفجار نشان داده شده است. هر کدام از سنجه ها حداقل دو مرتبه فشار حداکثری را ثبت می کند. اولی مربوط به موج انفجار ورودی به تونل ( $P_{so}$ ) و دومی مربوط به موج انعکاسی ( $P_r$ ) از انتهای موجگیر می باشد ( $P_{so1}$  و  $P_{r1}$  برای سنجه ۱،  $P_{so2}$  و  $P_{r2}$  برای سنجه ۲ است).



شکل ۶. پلان مدل سازی برای تونل های دارای موجگیر با خم ۹۰ درجه

جدول ۳. مشخصات مدل سازی برای تونل های دارای موجگیر با خم ۹۰ درجه

تعداد مدل	W(kg)	R(m)	L(m)	a(m)
۶	۱۵۰۰	۲۰	۱/۵ و ۰	۱۵ و ۱۰ و ۵
۶	۳۰۰۰	۱۲	۱/۵ و ۰	۱۶ و ۸ و ۴
۸	۵۰۰۰	۱۳	۲ و ۰	۴۰ و ۱۴ و ۸ و ۳

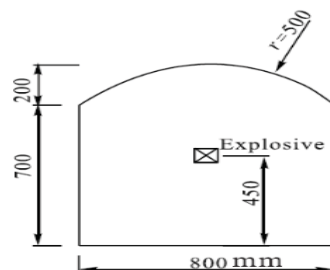


شکل ۲. مقایسه بیشینه فشار حاصل از روش عددی با آیین نامه TM5-1300

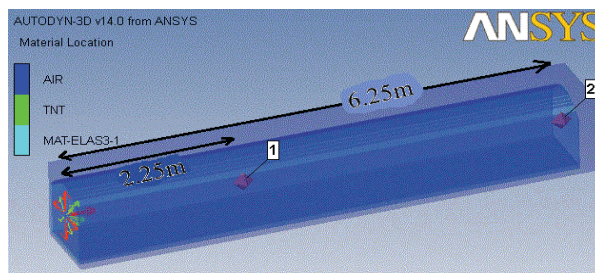
با توجه به نتایج مشاهده می شود، بیشینه فشار عددی به دست آمده در هوای آزاد هر چه به محل انفجار نزدیک تر باشد، تطابق خوبی با نتایج آیین نامه TM 5-1300 دارد.

### ۴-۲. انتشار موج انفجار در داخل تونل

در شکل (۳) و (۴) تونلی با مقطع نعل اسبی نشان داده شده است. ۰/۶ کیلوگرم TNT به صورت مکعبی در موقعیت نشان داده شده منفجر می شود. در شکل (۵) نمودار فشار- زمان انفجار و در جدول (۲) مقدار بیشینه فشار این پژوهش در فاصله ۲/۲۵ و ۶/۲۵ متری از محل ماده منفجره با نتایج تجربی چینگبو و همکاران [۱۲] مقایسه شده است. مشاهده می شود، تطابق بسیار خوبی بین نتایج حل عددی و تجربی وجود دارد.



شکل ۳. ابعاد مقطع تونل نعل اسبی

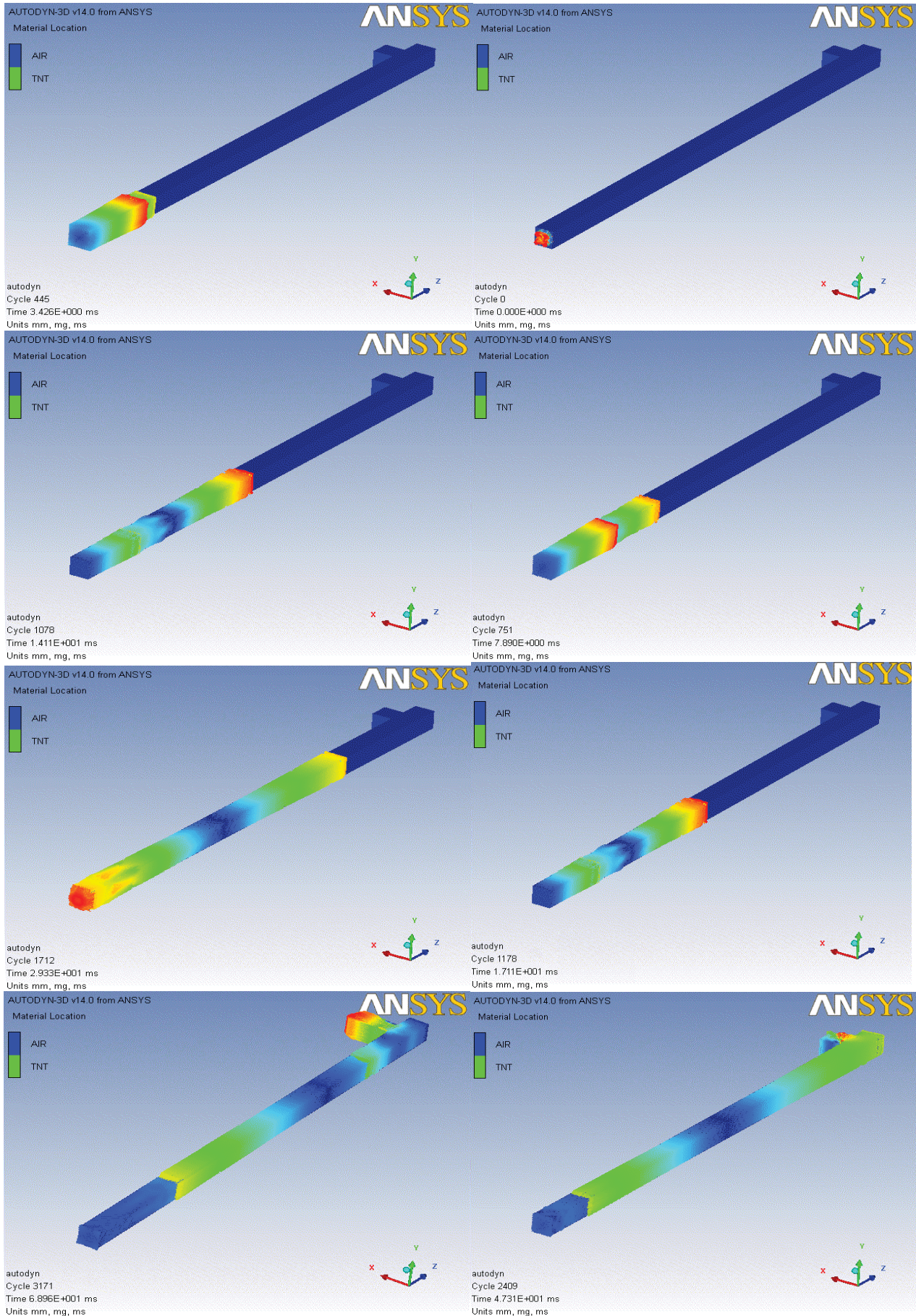


شکل ۴. شبیه سازی تونل نعل اسبی در نرم افزار AUTODYN

جدول ۲. مقایسه بیشینه فشار حل عددی با نتایج تجربی [۱۲]

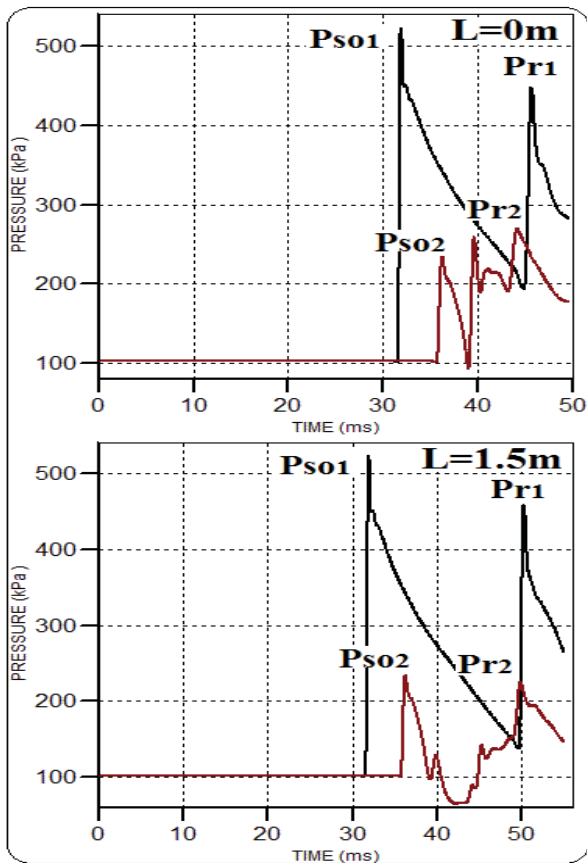
در صد خطا	(bar)Pso تجربی	(bar)Pso حل عددی	فاصله از محل انفجار (m)
۰/۵۷	۵/۳۰	۵/۲۷	۲/۲۵
۳/۸۷	۳/۱۰	۲/۹۸	۶/۲۵



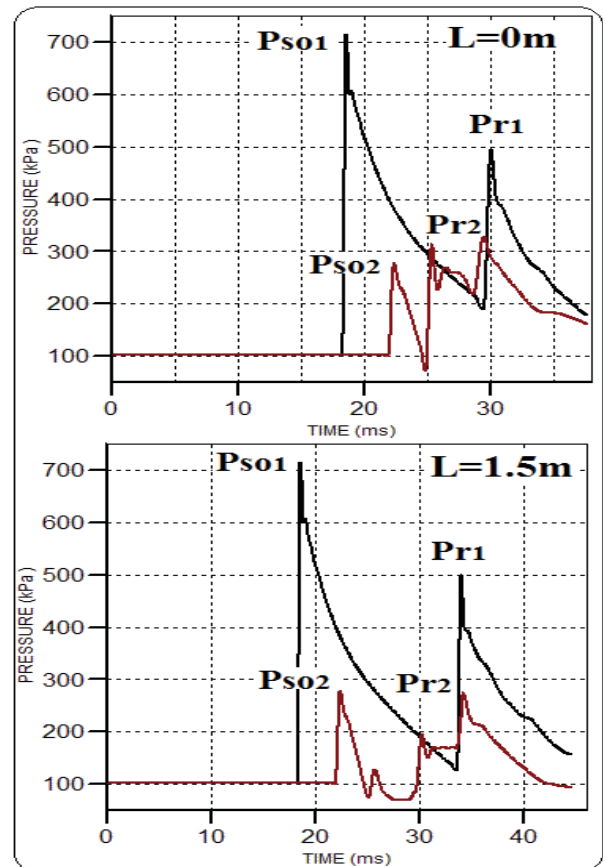


شکل ۷. حرکت جبهه موج انفجار در تونل دارای موجگیر ۹۰ درجه در نرم‌افزار AUTODYN

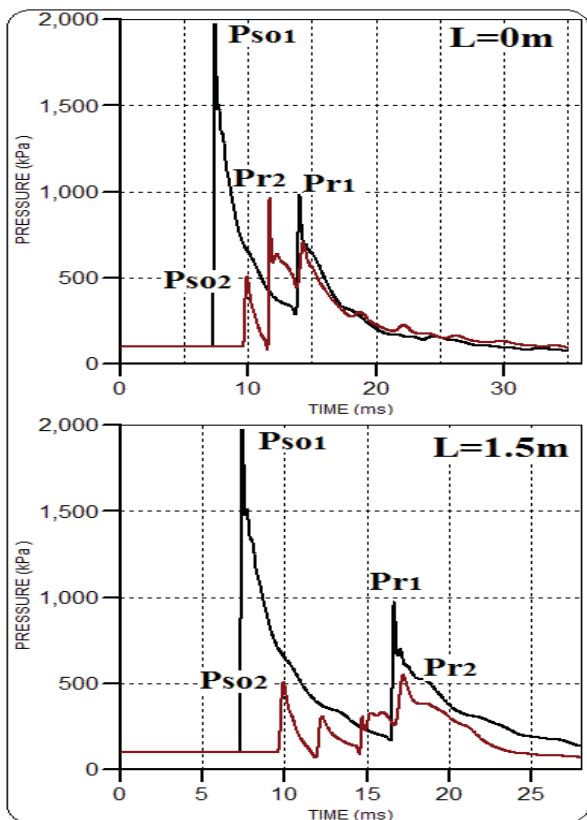




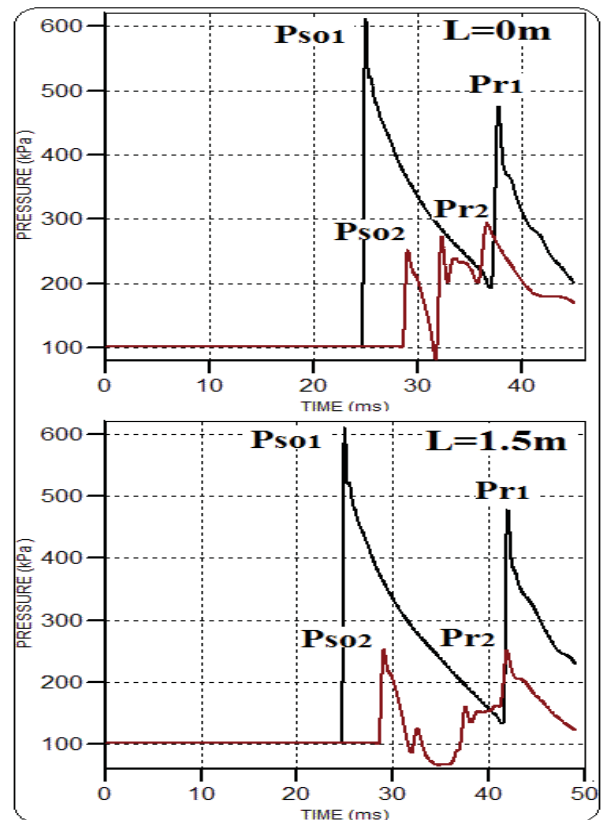
شکل ۱۰. تاریخچه زمانی فشار برای تونل‌های بدون موجگیر ( $L=0$ ) و موجگیر با طول ۱/۵ متر برای خرج ۱۵۰۰kg (فاصله دهانه از تقاطع ۱۵ متر)



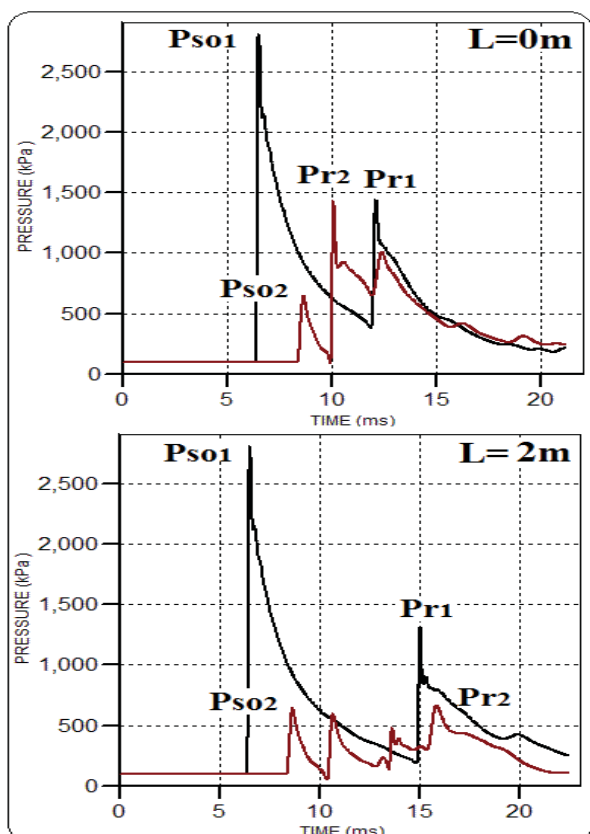
شکل ۸. تاریخچه زمانی فشار برای تونل‌های بدون موجگیر ( $L=0$ ) و موجگیر با طول ۱/۵ متر برای خرج ۱۵۰۰kg (فاصله دهانه از تقاطع ۵ متر)



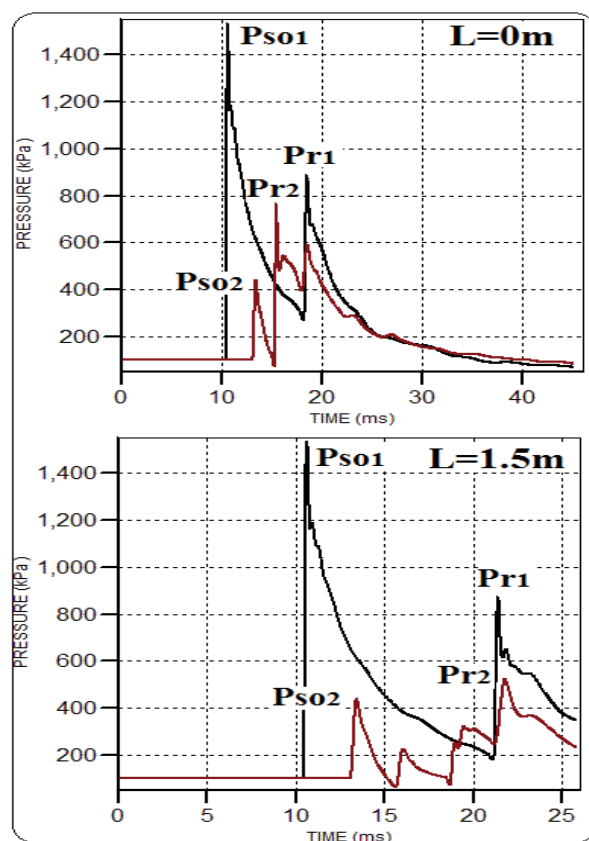
شکل ۱۱. تاریخچه زمانی فشار برای تونل‌های بدون موجگیر ( $L=0$ ) و موجگیر با طول ۱/۵ متر برای خرج ۳۰۰۰kg (فاصله دهانه از تقاطع ۴ متر)



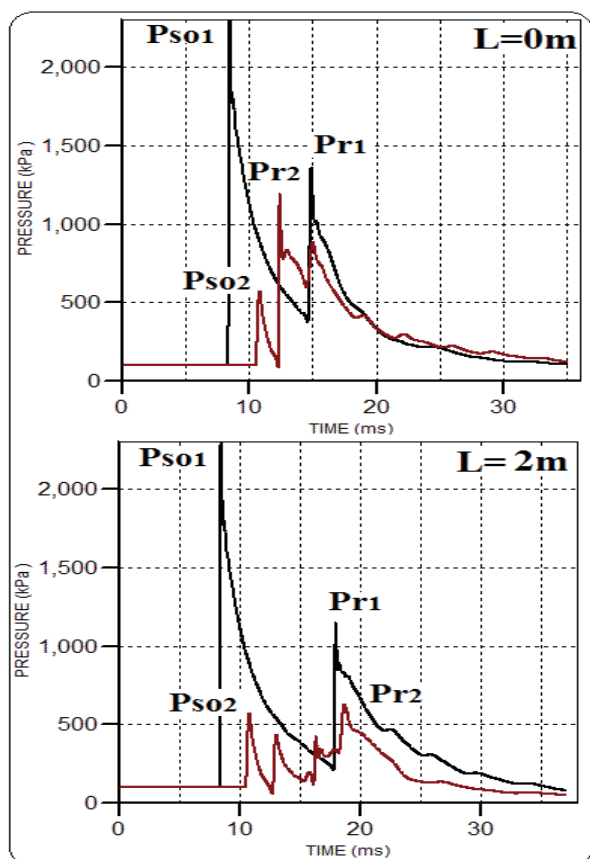
شکل ۹. تاریخچه زمانی فشار برای تونل‌های بدون موجگیر ( $L=0$ ) و موجگیر با طول ۱/۵ متر برای خرج ۱۵۰۰kg (فاصله دهانه از تقاطع ۱۰ متر)



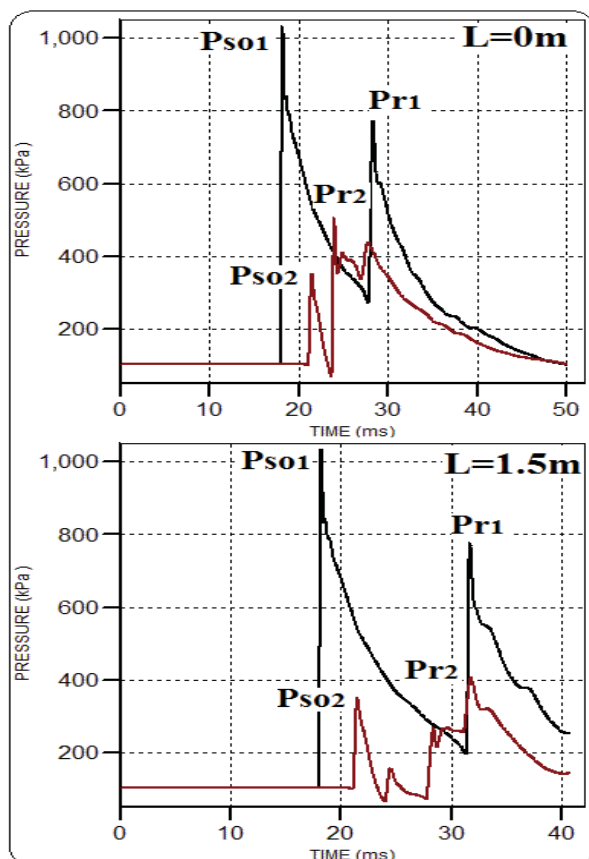
شکل ۱۴. تاریخچه زمانی فشار برای تونل‌های بدون موجگیر ( $L=0$ ) و موجگیر با طول ۲ متر برای خرج  $5000\text{ kg}$  (فاصله دهانه از تقاطع ۳ متر)



شکل ۱۲. تاریخچه زمانی فشار برای تونل‌های بدون موجگیر ( $L=0$ ) و موجگیر با طول ۱/۵ متر برای خرج  $3000\text{ kg}$  (فاصله دهانه از تقاطع ۸ متر)

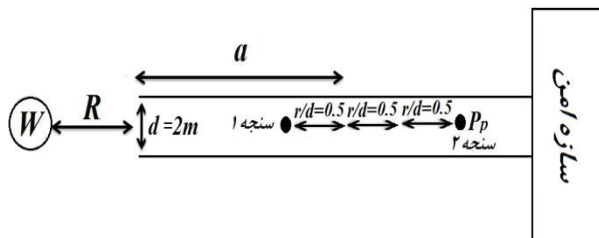


شکل ۱۵. تاریخچه زمانی فشار برای تونل‌های بدون موجگیر ( $L=0$ ) و موجگیر با طول ۲ متر برای خرج  $5000\text{ kg}$  (فاصله دهانه از تقاطع ۸ متر)



شکل ۱۳. تاریخچه زمانی فشار برای تونل‌های بدون موجگیر ( $L=0$ ) و موجگیر با طول ۱/۵ متر برای خرج  $1500\text{ kg}$  (فاصله دهانه از تقاطع ۱۶ متر)

برای به دست آوردن ضریب فشار (Kp) و ضریب کاهش فشار (1-Kp) وارد شده در تونل‌های بدون موجگیر و دارای موجگیر به طول‌های ۱/۵ یا ۲ متر منتهی به سمت سازه امن، بیشینه فشار ثبت شده در سنجه ۲ (MAX(Pso2, Pr2)) با فشار ثبت شده در تونل مستقیم (Pp) (شکل ۱۸): تونل بدون خم و موجگیر و با همان اندازه طول حفاری) مقایسه می‌شود.



شکل ۱۸. مشخصات مدل‌سازی برای تونل‌های مستقیم

این مقایسه در جدول‌های (۴-۶) و شکل‌های (۲۱-۱۹) نشان داده شده است. ضریب کاهش فشار تقاطع در (1-Kp) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$(1 - k_p) = (P_p - P_t) / (P_p) \quad (2)$$

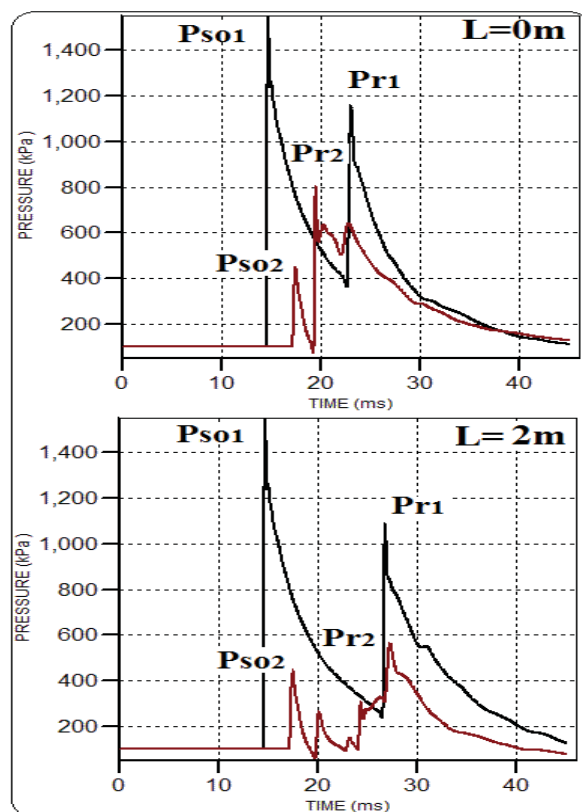
در رابطه (۲) و جداول (۴-۶)، Pso بیشینه فشار ورودی قبل از تقاطع (سنجه ۱)، Pt بیشینه فشار وارد شده به داخل مسیر اصلی تونل دارای موجگیر (MAX(Pso2, Pr2))، Pb بیشینه فشار وارد شده به داخل مسیر اصلی تونل دارای خم و (MAX(Pso2, Pr2)) L=0 و Pp فشار ثبت شده در تونل مستقیم می‌باشد. در این مطالعه بیشینه فشار تا حداکثر ۳۰ بار مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج ارائه شده در جدول‌های (۴-۶) و با بررسی شکل‌های (۲۱-۱۹) مشاهده می‌شود که هر چقدر بیشینه فشار وارد شده به محل تقاطع موجگیر بیشتر باشد، با ضریب بزرگ‌تری کاهش می‌یابد.

جدول ۴. ضریب کاهش فشار در مسیر اصلی تونل (خرج ۱۵۰۰kg)

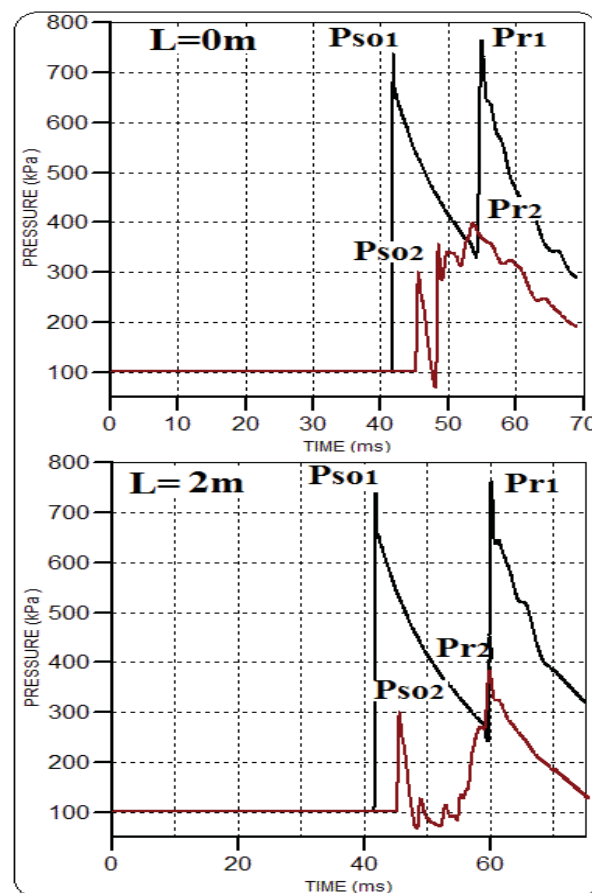
Pso(bar)	Pt(bar) L=1.5m α=90	Pb(bar) L=0 α=90	Pp(bar) L=0 α=0	Kp	1-Kp
۵/۲۲(a=15)	۲/۳۳	۲/۶۹	۴/۸	۰/۴۹	۰/۵۱
۶/۱۰(a=10)	۲/۵۲	۲/۹۳	۵/۴	۰/۴۷	۰/۵۳
۷/۱۳(a=5)	۲/۷۷	۳/۲۷	۶/۲	۰/۴۵	۰/۵۵

جدول ۵. ضریب کاهش فشار در مسیر اصلی تونل (خرج ۳۰۰۰kg)

Pso(bar)	Pt(bar) L=1.5m α=90	Pb(bar) L=0 α=90	Pp(bar) L=0 α=0	Kp	1-Kp
۱۰/۳۲(a=16)	۴/۰۴	۵/۰۴	۸/۸۱	۰/۴۶	۰/۵۱
۱۵/۳۱(a=8)	۵/۲۴	۷/۶۶	۱۲/۴۶	۰/۴۲	۰/۵۸
۱۹/۷۰(a=4)	۵/۴۷	۹/۶۲	۱۵/۳۱	۰/۳۶	۰/۶۴



شکل ۱۶. تاریخچه زمانی فشار برای تونل‌های بدون موجگیر (L=0) و موجگیر با طول ۲ متر برای خرج ۵۰۰۰kg (فاصله دهانه از تقاطع ۱۴ متر)



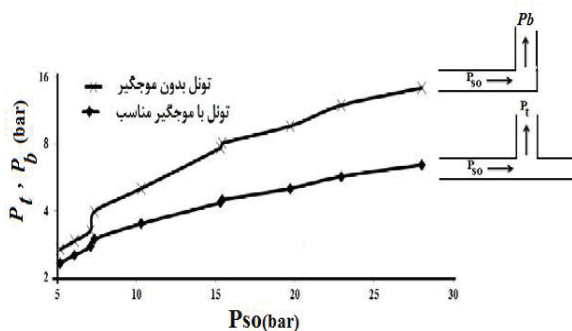
شکل ۱۷. تاریخچه زمانی فشار برای تونل‌های بدون موجگیر (L=0) و موجگیر با طول ۲ متر برای خرج ۵۰۰۰kg (فاصله دهانه از تقاطع ۴۰ متر)



تقاطع بستگی داشته و به وزن خرج و فاصله آن بستگی ندارد. طول مناسب برای موجگیر، طولی است که در آن بیشینه فشار وارد شده به مسیر اصلی (مسیر بعد از خم) ناشی از موج انعکاسی، با بیشینه فشار موج اولیه در مسیر اصلی برابر باشند ( $P_{so2} = P_{r2}$ ). با بررسی مقادیر ارائه شده در جدول (۷) مشاهده می‌شود، طول موجگیر مناسب برای تونل‌های با ابعاد ۲×۲ در خم ۹۰ درجه، با توجه به بیشینه فشار وارد شده به محل تقاطع ( $P_{so}$ )، بیشتر از ۲ متر است. در شکل (۲۲) که از جدول (۷) نتیجه شده، مقایسه‌ای بین بیشینه فشار انتقالی به سازه امن در تونل بدون موجگیر و دارای موجگیر با طول مناسب انجام شده است. مشاهده می‌شود که موجگیر با طول مناسب، سبب کاهش قابل توجه فشار نسبت به تونل بدون موجگیر می‌شود. از سوی دیگر، در شکل (۲۳) ضریب کاهش فشار در مسیر اصلی تونل با طول موجگیر مناسب نشان داده شده است. این ضریب با توجه به اندازه بیشینه فشار موج انفجار وارد شده به محل تقاطع بین ۰/۵ تا ۰/۷۵ می‌باشد.

**جدول ۷.** ضریب کاهش فشار در تونل با طول موجگیر مناسب بر حسب بیشینه فشار در تقاطع برای تمامی خرج‌ها و فاصله‌ها

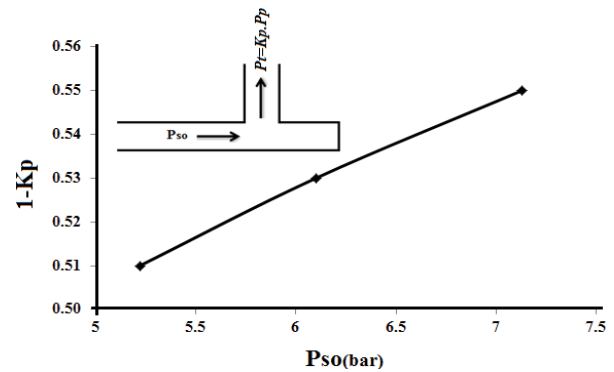
$P_{so}$ (bar)	$P_t$ (bar)	$P_b$ (bar)	$P_p$ (bar)	$K_p$	$1-K_p$	$L_p$
۵/۲۲ (۱۵۰۰kg)	۲/۳۳	۲/۶۹	۴/۸۰	۰/۴۹	۰/۵۱	۲
۶/۱۰ (۱۵۰۰kg)	۲/۵۲	۲/۹۳	۵/۴۰	۰/۴۷	۰/۵۳	۲
۷/۱۳ (۱۵۰۰kg)	۲/۷۷	۳/۲۷	۶/۲۰	۰/۴۵	۰/۵۵	۲
۷/۳۷ (۵۰۰kg)	۲/۹۹	۳/۹۸	۶/۷۴	۰/۴۴	۰/۵۶	۲
۱۰/۳۲ (۳۰۰kg)	۳/۵۰	۵/۰۴	۸/۸۱	۰/۴۰	۰/۶۰	۳
۱۵/۳۱ (۳۰۰kg)	۴/۳۶	۷/۶۶	۱۲/۴۶	۰/۳۵	۰/۶۵	۳
۱۵/۴۴ (۵۰۰kg)	۴/۴۸	۸/۰۴	۱۳/۱۹	۰/۳۴	۰/۶۶	۳
۱۹/۷۰ (۳۰۰kg)	۵/۰۴	۹/۶۲	۱۵/۳۱	۰/۳۳	۰/۶۷	۳
۲۲/۹۲ (۵۰۰kg)	۵/۷۰	۱۱/۹۲	۱۸/۴۴	۰/۳۱	۰/۶۹	۴
۲۸/۰۱ (۵۰۰kg)	۶/۴۴	۱۴/۳۱	۲۱/۵۳	۰/۳۰	۰/۷۰	۴



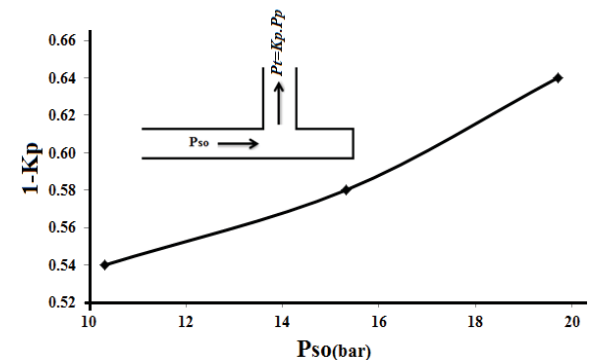
**شکل ۲۲.** مقایسه بیشینه فشار انتقالی به سمت سازه امن در تونل بدون موجگیر و با موجگیر با طول مناسب

**جدول ۶.** ضریب کاهش فشار در مسیر اصلی تونل (خرج ۵۰۰kg)

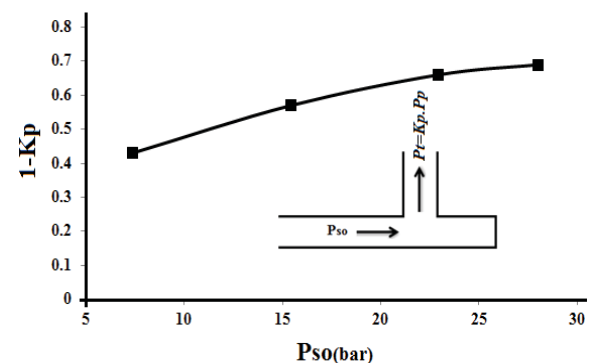
$P_{so}$ (bar)	$P_t$ (bar) $L=2m$ $\alpha=90$	$P_b$ (bar) $L=0$ $\alpha=90$	$P_p$ (bar) $L=0$ $\alpha=0$	$K_p$	$1-K_p$
۷/۳۷(a=40)	۳/۸۳	۳/۹۸	۶/۷۴	۰/۵۷	۰/۴۳
۱۵/۴(a=14)	۵/۶۳	۸/۰۴	۱۳/۱۹	۰/۴۳	۰/۵۷
۲۲/۹(a=8)	۶/۲۶	۱۱/۹۲	۱۸/۴۴	۰/۳۴	۰/۶۶
۲۸/۰۱(a=3)	۶/۶۰	۱۴/۳۱	۲۱/۵۳	۰/۳۱	۰/۶۹



**شکل ۱۹.** منحنی ضریب کاهش فشار در مسیر اصلی تونل (خرج ۱۵۰۰Kg)



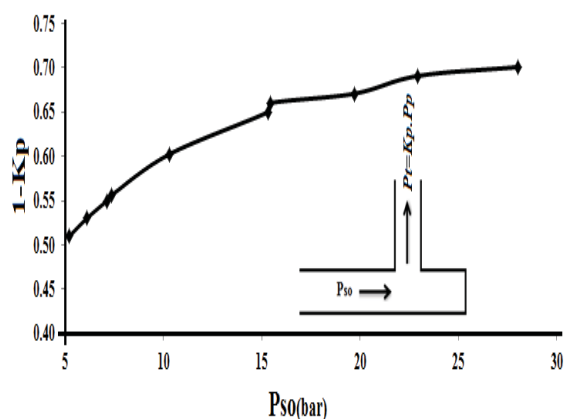
**شکل ۲۰.** منحنی ضریب کاهش فشار در مسیر اصلی تونل (خرج ۳۰۰۰Kg)



**شکل ۲۱.** منحنی ضریب کاهش فشار در مسیر اصلی تونل (خرج ۵۰۰kg)

از سوی دیگر، با توجه به طول مناسب (بهینه) موجگیر ( $L_p$ ) و با کمک نتایج سه جدول (۴-۶)، نتایج ارائه شده در جدول (۷) بر اساس میزان بیشینه فشار در تقاطع به دست می‌آید. یکی از نتایج این جدول این است که درصد کاهش فشار به میزان بیشینه فشار در

- [4] Kinney, G. F.; Graham K. J. "Explosive Shocks in Air"; Springer-Verlag, Berlin 1985.
- [5] TM5-1300 "The Design of Structures to Resist the Effect of Accidental Explosions"; Technical Manual, US Department of the Army, Navy and Air Force, Washington DC, 1990.
- [6] Chang, D. B.; Young, C. S. "Probabilistic Estimates of Vulnerability to Explosive Overpressures and Impulses"; J. Phys. Secur. 2010, 4, 10-29.
- [7] "Design of Structures to Resist Nuclear Weapons Effects"; ASCE Manuals and Reports of Engineering Practice, No. 42.
- [8] TM5-855-1 "Fundamental of Protective Design for Conventional Weapons"; US Army Eng. Water Ways Experiment Station, 1984.
- [9] Gurke, G.; Scheklinski-Gluck, G. "An Investigation of Blast Wave Penetration into a Tunnel Entrance"; Report E7/80, Ernst-Mach-Institut der Fraunhofer-Gesellschaft, Freiburg, Germany, 1980.
- [10] Bulson, P. S. "Explosive Loading of Engineering Structures"; E&FN SPON, 1997.
- [11] Christopherson, D. G. "Structural Defence"; UK Ministry of Home Security; Civil Defence Research Committee Paper RC 450, 1946.
- [12] Jingbo, L.; Qiushi, Y.; Jun, W. "Analysis of Blast Wave Propagation Inside Tunnel"; Transactions of Tianjin University, October 2008, 14, 358-362.



شکل ۲۳. منحنی ضریب کاهش فشار در مسیر اصلی تونل دارای طول موجگیر مناسب

## ۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر موجگیر بر کاهش بیشینه فشار وارد شده به داخل مسیر اصلی تونل مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، انتشار موج ناشی از انفجار بمب‌های با وزن ماده منفجره مختلف در فواصل متفاوت از دهانه تونل‌های دارای موجگیر با استفاده از نرم‌افزار AUTODYN، شبیه‌سازی شد. بررسی نتایج به‌دست‌آمده نشان دادند که استفاده از موجگیر می‌تواند بیشینه فشار وارد شده به محل تقاطع را تا مقدار زیادی کاهش دهد. به عبارت دیگر، استفاده از موجگیر یکی از راه‌های مؤثر برای کاهش اثرات انفجار بوده و این روش در کنار دیگر روش‌های کاهش اثرات انفجار، می‌تواند موجب کاهش آسیب‌پذیری افراد و تجهیزات درون سازه امن شود. نتایج نشان می‌دهند که هر چقدر بیشینه فشار وارد شده به محل تقاطع موجگیر بیشتر باشد، با ضریب بزرگ‌تری کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر فشار ورودی و ضریب کاهش رابطه مستقیم دارند. از طرف دیگر مشخص گردید که با افزایش بیشینه فشار وارد شده به محل تقاطع موجگیر، طول مناسب موجگیر افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود طول موجگیر مناسب برای تونل‌های با ابعاد ۲×۲ دارای خم ۹۰ درجه، برای بیشینه فشار ۳۰ بار، بیشتر از ۴ متر می‌باشد. میزان کاهش فشار انفجار برای مسیر دارای خم ۹۰ درجه و بدون موجگیر، برای بیشینه فشار ۵ تا ۳۰ بار در محل تقاطع، ۳۳ تا ۴۴ درصد و برای تونل با طول موجگیر مناسب، ۵۰ تا ۷۰ درصد می‌باشد. نشان‌دهنده این است که موجگیر با طول مناسب، سبب کاهش قابل توجه فشار نسبت به تونل بدون موجگیر می‌شود.

## ۷. مراجع

- [1] Peyman, S.; Ghazanfarinia, S. "Defence and Security Structures"; MAUT Press, 2007 (In Persian).
- [2] Brode, H. L. "Numerical Solution of Spherical Blast Waves"; J. Appl. Phys. 1995, 6, 766-775.
- [3] Henrych, J. "The Dynamics of Explosion and Its Use"; Elsevier, Amsterdam, 1979.