

تعیین طول بهینه موجگیر و تحلیل درب ضد انفجار فولادی در تونل دارای موجگیر

صفا پیمان^{۱*}، هادی طولابی^۲۱- استادیار، ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه جامع امام حسین^(ع)

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۹، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۲)

چکیده

هدف از این پژوهش، بررسی اثر موجگیر در کاهش اثر انفجار در تونل و کاهش بار وارده به درب ضد انفجار انتهای تونل و تحلیل انواع درب برای تعیین عملکرد بهتر در برابر انفجار است. برای نیل به این هدف، انتشار موج ناشی از انفجار خرج‌هایی از نوع TNT با وزن مختلف در دهانه تونل دارای موجگیر شبیه‌سازی شده است. برای شبیه‌سازی عددی از هیدروکد AUTODYN استفاده شده است. شبیه‌سازی و مدل‌سازی عددی با روابط تحلیلی و تجربی مطالعات پیشین مقایسه و اعتبارسنجی شد. با توجه به بیشینه فشار وارده به تقاطع تونل، مکان مناسب موجگیر، طول بهینه موجگیر و اثر آن در مقدار فشار حداکثر انتهای تونل بررسی شده است. خروجی بار وارده به انتهای تونل (محل درب ضد انفجار) حاصل از این مدل‌سازی که به صورت بار انفجاری وابسته به زمان است به نرم‌افزار ABAQUS جهت تحلیل و مقایسه انواع درب‌های ضد انفجار انتقال یافت. با توجه به بار وارده به درب ضد انفجار، درب لولایی با هندسه مختلف تخت و قوسی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS تحلیل شده و تغییر مکان ماکزیمم و تنش فون-میسز در آن با هم مقایسه شد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که عملکرد درب قوسی بهتر از درب تخت است.

کلیدواژه‌ها: انفجار، تونل، طول بهینه موجگیر، تحلیل درب ضد انفجار

The Optimum Length Determination of Blast Wave Trap and Analysis of the Steel Explosion-Proof Door in a Tunnel Equipped with the Blast Wave Trap

S. Peyman*, H. Toulabi

Imam Hossein University

(Received: 21/44/2019; Accepted: 04/10/2021)

Abstract

The purpose of this study is to investigate the effect of blast wave trap on reducing the detonation effect in tunnels and its effect on reducing the load on the explosion-proof door end of the tunnels and to analyze the types of doors in order to determine which type has the best performance against detonation. To this end, the propagation of the waves induced by the explosion of TNT-type beams with different weights is simulated in the tunnel span with a blast wave trap. The AUTODYN hydrocode is used for numerical simulations. The simulation and numerical modeling are compared and validated with analytical and empirical relationships of previous studies. Considering the maximum pressure applied to the tunnel intersection, the proper location of the blast wave trap, the optimal blast wave trap length and its effect on the maximum value of the tunnel end pressure are investigated. The output of the load applied to the end of the tunnel (location of the explosion-proof door) resulting from this time-dependent explosive load modeling is transferred to ABAQUS software to analyze and compare the types of explosion-proof doors. From the point of the load exerted on explosion-proof doors, hinged doors with different flat and arched geometries are analyzed using ABAQUS software and the maximum displacement and von-Mises stress of the doors are compared. The results show that the arch door performs better than the flat door.

Keywords: Explosion, Tunnel, Optimum Length of Blast Wave Trap, Analysis of the Explosion-Proof Door

۱- مقدمه

درب‌های زرهی (ضد انفجار) تنها تجهیزات مقاوم در برابر امواج و ترکش‌ها به داخل فضاها امن هستند. در صورت طراحی و ساخت صحیح آن‌ها می‌توان به ایمنی در این فضاها امیدوار بود. درب‌های زرهی برای بستن ورودی فضاها امن هستند. در آیین‌نامه طراحی سازه‌های فولادی در برابر انفجار (UFC ۳-۳۴۰-۰۲) [۸]، روابطی برای طراحی انواع درب فولادی و همچنین ضوابطی برای کنترل طراحی درب‌ها از جمله کنترل خیز، محاسبه نیروی بازگشتی، کنترل اتصالات و محاسبه برش در تکیه‌گاه‌ها ارائه شده است.

به‌منظور درک دقیق از خصوصیات مقاومتی درب ضد انفجار، چن لی و همکاران [۹] یک آزمایش در مقیاس کامل برای درب ضد انفجار قوسی بتن مسلح برای یک خرج انفجاری واقع در دهانه تونل انجام دادند. در این پژوهش همچنین آنالیز عددی برای ارزیابی عددی پاسخ ساختاری درب و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی انجام شد. انواع مدل‌های آسیب دیدگی درب با شبیه سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که اثر نرخ کرنش مواد و تماس غیرخطی بین اجزای مختلف درب در تکیه‌گاه‌ها (تنش تماسی) تاثیر بسزایی در پاسخ درب ضد انفجار دارد و باید در تحلیل درب مورد توجه قرار گیرد. نتایج آزمایشگاهی و عددی مانند جابجایی، بیشینه فشار و نیروی بازگشتی در این پژوهش با هم تطابق مناسبی داشتند. علاوه بر این یانسیک چویی و همکاران [۱۰]، رفتار یک درب ضد انفجار فولادی دو لنگه که به وسیله اتصالات فولادی به هم متصل بودند را تحت یک خرج انفجاری نزدیک به درب به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. آنالیز عددی به دو روش لاگرانژی (LAGRANGE) و اویلر-لاگرانژ (ALE) انجام شد. در این مقاله نشان داده شد که روش ALE تشکیل موج انفجار و همچنین تغییر شکل درب را لحظاتی پس از انفجار بهتر نشان می‌دهد. در حالی که روش لاگرانژ (LAGRANGE) نتایج بهتری از تغییر شکل کلی درب و گسیخته شدن درب ضد انفجار در مرز دو لنگه درب را نشان می‌دهد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- بیان مسئله

شکل (۱) نمای کلی سازه امن تونل دارای موجگیر و مسیری که موج انفجار تا سازه امن تونل (محل درب ضد انفجار) طی می‌کند را نشان می‌دهد. هدف از این مقاله بدست آوردن مکان مناسب موجگیر، طول بهینه موجگیر، تاثیر موجگیر بر کاهش بار وارده به درب ضد انفجار و تحلیل انواع درب و مقایسه عملکرد آن‌ها است. وقتی که موج انفجار وارد تقاطع تونل می‌شود، ضریبی از آن وارد راستای سازه امن و ضریبی از آن وارد راستای موجگیر می‌شود. موج انفجار وارد شده به موجگیر، با برخورد به انتهای موجگیر انعکاس می‌یابد. در این حالت ضریبی از موج انفجار انعکاسی

انفجار در داخل و یا در دهانه تونل‌های حمل و نقل و سازه‌های زیرزمینی دفاعی و استراتژیک منجر به تلفات و صدمات فراوان خواهد شد. به‌منظور کاهش اثرات تخریبی موج انفجار در داخل تونل‌ها و در فضاها زیرزمینی، از روش‌هایی همچون استفاده از موجگیر، خم‌ها، موانع هندسی، تغییر مقطع عرضی، درب ضد انفجار، الگوهای مختلف ورودی، تعدد ورودی و خروجی‌ها می‌توان استفاده نمود.

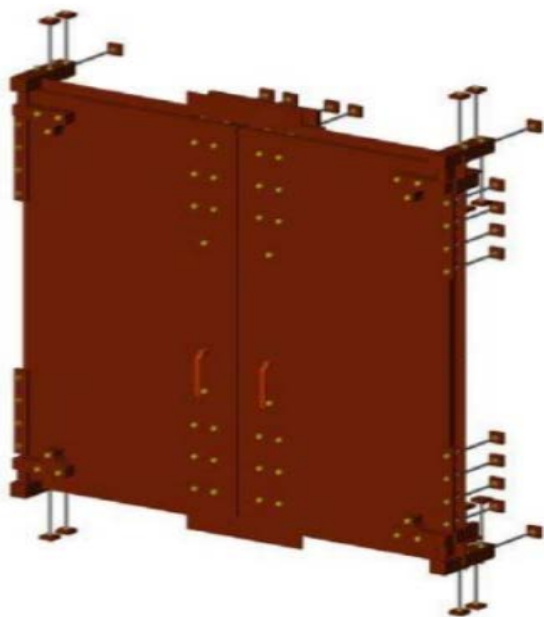
انتشار موج ناشی از انفجار درون سازه‌های زیر زمینی از پیچیدگی بیشتری نسبت به انفجار در هوای آزاد برخوردار است. بر مبنای کارهای پژوهشی تجربی و عددی رابطه‌هایی برای محاسبه اندازه فشار موج ناشی از انفجار درون تونل‌ها ارائه شده است [۱]. در میان این روابط، رابطه‌های هنریچ [۲] و گیورک و گلوک [۳] از اهمیت کاربردی بیشتری برخوردارند. در این رابطه‌ها فشار در هر نقطه از داخل تونل با توجه به فشار بیشینه وارد شده به دهانه تونل به دست می‌آید [۲ و ۳]. بینگلی و برنارت آنت [۴] به دلیل اینکه انتشار موج شوک در دهانه‌ی تونل پیچیده است، محیط اطراف انفجار در دهانه‌ی تونل را به سه قسمت تقسیم کردند. آنها درباره‌ی رفتار موج انفجار در این سه ناحیه شکل‌ها و نمودارهای کاربردی ارائه نمودند. ایگرا و همکاران [۵] به بررسی انتشار موج در کانال‌های با دو خم برای حالت‌های کانال با سطح صیقلی، کانال دارای زبری و کانال با تغییر مقطع عرضی به وسیله آزمایش‌های تجربی و روابط تئوری پرداختند. آنها تاثیر وجود خم در کاهش بیشینه فشار موج انفجار و همچنین تاثیر زبری کانال و تغییر مقطع عرضی کانال بر کاهش بیشینه موج انفجار با توجه به نتایج آزمایشگاهی و روابط تئوری را بررسی نمودند. چند شاخه شدن مسیر تونل و استفاده از موج گیرها نیز بر اندازه و کاهش مقدار فشار در هر نقطه از تونل اصلی اثر گذارند. در طی جنگ جهانی دوم فیلپ آزمايش‌های تجربی زیادی را درباره‌ی انتشار موج ناشی از انفجار درون سازه‌های زیر زمینی کارگاهی و مسیره‌های زیر زمینی راه آهن که به عنوان پناهگاه مورد استفاده بودند انجام داد [۱].

در این پژوهش‌ها با قرار دادن ابزارهای اندازه‌گیری فشار روی سطوح سازه، کاهش موج انفجار درون سازه‌های زیر زمینی مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از پژوهش‌های تجربی انجام شده توسط فیلپ و انجام آزمایش‌های جدید، کریستوفرسوندر سال ۱۹۴۶ گزارشی را درباره انتشار موج در تقاطع‌ها انتشار داد [۶]. در مورد انتشار موج انفجار در کانال‌های پیچ و خم‌دار و انشعاب‌دار، اطلاعات و نمودارهایی نیز توسط هنریچ ارائه شده است [۲]. پیمان و طهماسب زاده [۷] با استفاده از نرم‌افزار آتوداین، انتشار موج در داخل تونل‌ها را بررسی کردند و همچنین به تاثیر موجگیر در کاهش بیشینه فشار موج انفجار در تونل پرداختند.

۲-۳-۱- انواع درب ضد انفجار بر اساس مصالح مصرفی

الف- درب‌های فولادی:

درب‌های فولادی به دلیل تعمیرات و نگهداری آسان و قابلیت جلب اعتماد بهره بردار، بیشترین کاربرد را در پروژه‌های دفاعی دارند. همانگونه که در شکل (۲) دیده می‌شود، درب‌های فولادی دارای بخش‌هایی مانند سازه، لولاه، سیستم آب بندی، قاب، ضامن و سیستم حرکتی است [۱۱].



شکل ۲. نمونه درب ضد انفجار فولادی با فریم.

ب- درب بتنی:

درب‌های بتنی نیز تمام اجزای درب‌های فولادی را دارند با این تفاوت که داخل سازه شبکه‌ای از آرماتورها قرار گرفته و بتن ریزی انجام می‌شود. درب‌های بتنی به دلیل وجود بتن در داخل آنها مقاومت خوبی در برابر نفوذ ترکش دارند [۱۱].

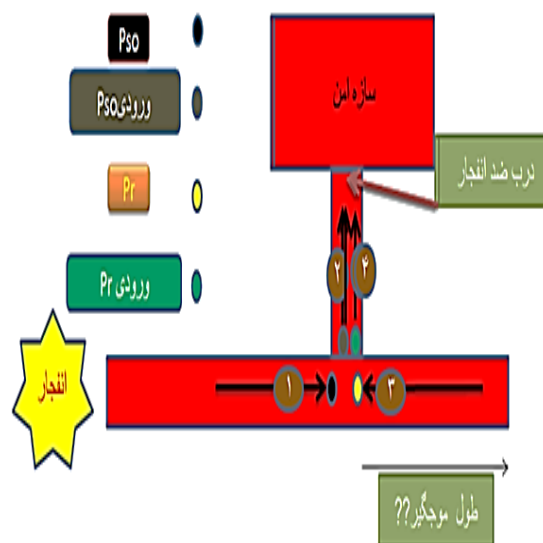
ج- درب کامپوزیتی

کامپوزیت‌ها از ترکیب دو یا چند ماده با یکدیگر به طوری که به صورت شیمیایی مجزا و غیر محلول در یکدیگر باشند و بازده و خواص سازه‌ای این ترکیب نسبت به هر یک از اجزای تشکیل دهنده به تنهایی، در موقعیت برتری قرار بگیرد تشکیل شده‌اند. درب‌های کامپوزیتی به ندرت در پروژه‌های خاص مورد استفاده قرار می‌گیرند. لولاه، ضامن و دیگر اجزای این نوع درب، مشابه درب‌های فولادی است با این تفاوت که به جای فولاد از سازه کامپوزیتی استفاده می‌شود [۱۱].

۲-۳-۲- درب‌های ضد انفجار بر اساس هندسه و شکل

درب ضد انفجار بر اساس هندسه و شکل به انواع درب‌های لولایی، کشویی، قوسی، یک یا دو لنگه، V شکل و خندقی تقسیم می‌شوند [۱۱].

انتهای موجگیر وارد راستای سازه امن می‌شود. مناسب ترین (بهینه‌ترین) طول موجگیر زمانی است که مقدار فشار بازگشتی از انتهای موجگیر با بیشینه فشار وارده به راستای سازه امن ناشی از موج اولیه، برابر باشد.



شکل ۱. نمای کلی مسئله مورد بررسی، ۱- موج ورودی به ابتدای موجگیر، ۲- موج ورودی به داخل تونل اصلی، ۳- موج بازگشتی پس از برخورد به انتهای موجگیر، ۴- ورود موج بازگشتی پس از برخورد به موج ورودی آن زمان به داخل تونل اصلی

۲-۲- شبیه‌سازی عددی

شبیه‌سازی عددی انتشار موج در تونل برای خرج‌های با وزن متفاوت در دهانه تونل با استفاده از هیدروکد AUTODYN به صورت سه بعدی انجام شده است. محیط انتشار موج ناشی از انفجار، هوا است و به صورت گاز ایده‌آل در نظر گرفته شده است. مقطع تونل مورد بررسی که دارای موجگیر و خم ۹۰ درجه است، مربعی به طول ضلع ۶ متر است. جنس پوشش تونل به صورت صلب در نظر گرفته شده است و از زبری سطح تونل صرف نظر می‌شود. همچنین برای تحلیل درب ضد انفجار، از نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است. درب ضد انفجار به صورت دو لنگه فولادی لولایی است. ابعاد درب برای هر لنگه ۶ × ۳ متر در نظر گرفته شده است. مقدار بار وارده به انتهای تونل (محل درب ضد انفجار) که در هیدروکد اتوداین به صورت یک بار فشاری وابسته به زمان است به نرم‌افزار آباکوس انتقال داده و درب ضد انفجار تحت این بار تحلیل شده است.

۲-۳-۳- درب‌های ضد انفجار

درب‌های ضد انفجار برای بستن ورودی فضاهای امن هستند. تنها از درب‌های مجاز و استاندارد که براساس ضوابط خاص خود ساخته شده اند می‌بایست استفاده شود. درب‌های زرهی انواع مختلفی داشته و بر اساس کاربری، مصالح مصرفی و میزان مقاومت به دسته‌های متعددی تقسیم می‌شوند.

۴-۲-۴- مشخصات مصالح

در بارهای انفجاری، اعمال بار و افزایش تنش در اعضا بسیار سریع اتفاق می‌افتد. این بار گذاری به صورت آنی و گذراست و زمان تداوم آن در اکثر موارد بسیار کوتاه تر از زمان تناوب سازه است. پاسخ مصالح تحت بارگذاری دینامیکی به طور محسوسی متفاوت از بارگذاری استاتیکی است. در بارگذاری سریع، مصالح نمی‌توانند با نرخ مشابه بار وارده، تغییر شکل دهند. این خاصیت باعث ایجاد افزایش در سطح تنش تسلیم و همچنین تنش نهایی قبل از گسیختگی می‌شود. به طور کلی، هرچه مصالح سریع تر تغییر شکل دهند (افزایش سریع نرخ کرنش)، مقاومت مصالح بیشتر افزایش می‌یابد. افزایش مقاومت ایجاد شده در مصالح به علت بارگذاری سریع، این امکان را فراهم می‌کند تا مقاومت سازه نسبت به حالت استاتیکی افزایش یابد. این تأثیرات در تحلیل انفجاری سازه‌ها با استفاده از ضریب افزایش دینامیکی در نظر گرفته خواهد شد. در شکل (۳) رفتار فولاد در دو حالت بارگذاری آهسته و بارگذاری با نرخ کرنش بالا نشان داده شده است. در جدول (۱) ضرایب افزایش مقاومت دینامیکی تنش تسلیم و تنش نهایی فولاد آورده شده است.

۲-۴-۲- ضریب افزایش دینامیکی (DIF)

با توجه به مطالب ذکر شده در قسمت قبل، می‌بایست مقاومت مصالح تحت بار انفجار در ضریبی به نام ضریب افزایش دینامیکی ضرب شوند. برای در نظر گرفتن تأثیر افزایش مقاومت مصالح با نرخ کرنش سریع، ضریب افزایش دینامیکی مطابق دستورالعمل (UFC ۳-۳۴۰-۰۰۲) [۸]، به مقادیر مقاومت استاتیکی مصالح به صورت رابطه‌های (۱) و (۲) اعمال می‌گردد:

$$F_{dy} = C.A.F_y \quad (1)$$

$$F_{du} = C.A.F_u \quad (2)$$

در روابط (۱) و (۲)، C ضریب افزایش تنش تسلیم دینامیکی، F_y تنش تسلیم فولاد، A ضریب افزایش مقاومت تسلیم، F_{dy} تنش تسلیم دینامیکی فولاد، F_u تنش تسلیم نهایی فولاد و F_{du} تنش تسلیم نهایی دینامیکی فولاد است.

جدول ۱. ضریب افزایش مقاومت دینامیکی (C) [۸]

نوع مصالح	ضریب افزایش تنش تسلیم فولاد		ضریب افزایش تنش نهایی فولاد
	خمشی	فشاری یا کششی	
A36	۱/۲۹	۱/۱۹	۱/۲۹
A588	۱/۱۹	۱/۱۲	۱/۱۹
A514	۱/۰۹	۱/۰۵	۱/۰۹

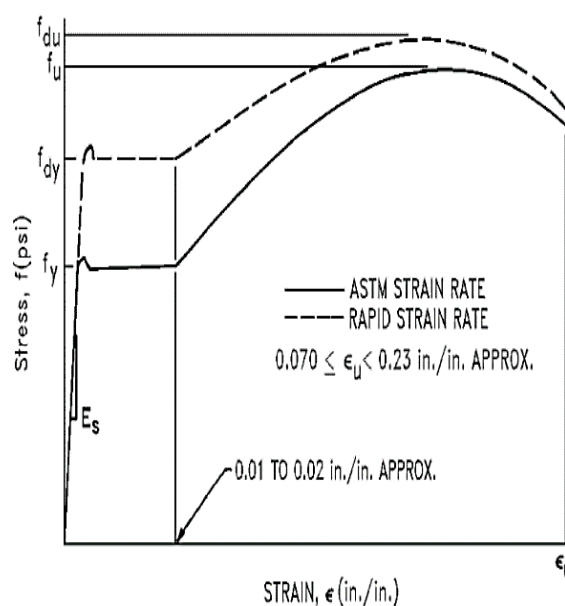
همچنین ضریب A برای فولاد با حداقل تنش تسلیم ۵۰ ksi و کمتر برابر ۱/۱ است در غیر اینصورت برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود.

۲-۵-۵- صحت‌سنجی

در این قسمت با حل مثال‌هایی، نتایج به‌دست آمده از حل عددی اعتبارسنجی شده است.

۲-۵-۱- انتشار موج در داخل تونل

در شکل (۴) مقطع نعل اسبی تونل مورد بررسی در این پژوهش، نشان داده شده است. ابعاد سطح مقطع بر حسب میلی‌متر است. در ورودی تونل ۰/۶ کیلوگرم TNT به‌صورت مکعبی در موقعیت نشان داده شده منفجر می‌شود. در شکل‌های (۵) و (۶) نمودارهای فشار زمان به‌دست آمده از حل عددی این پژوهش در فواصل ۲/۲۵ و ۶/۲۵ متری از دهانه تونل، با نتایج تجربی چینگبو و همکاران [۱۲] مقایسه شده است. مشاهده می‌گردد، نتایج حل عددی تطابق بسیار خوبی با نتایج تجربی دارا است.



شکل ۳. منحنی تنش-کرنش فولاد تحت بار استاتیکی و بار دینامیکی با نرخ کرنش بالا [۸]

۲-۴-۱- مشخصات فولاد مصرفی

در مطالعه عددی انجام شده برای صفحات فولادی و سخت‌کننده‌ها از فولاد ST37 که دارای تنش تسلیم ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و تنش نهایی ۳۷۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد، استفاده شده است. و برای لولاهای فولاد ST52 با تنش تسلیم ۳۶۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و تنش نهایی ۵۲۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع مورد استفاده قرار گرفته است.

مقدمه گفته شد این رابطه برای انتشار موج در تونل است.

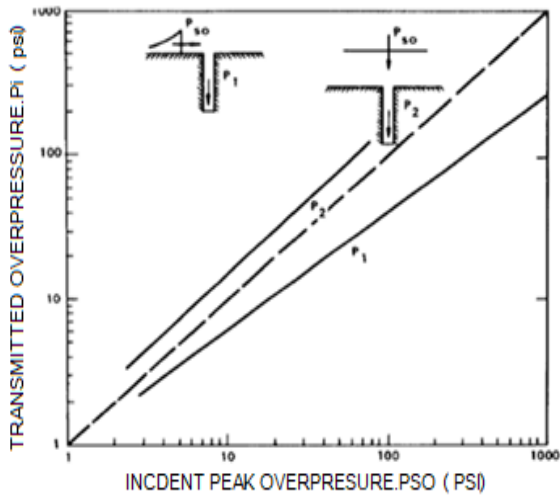
$$P(x) = \frac{P_i}{1 + \tan \left[\left(\frac{\bar{X}}{\bar{X} + \bar{E}} \right) \left(\frac{\pi}{2} \right) \right]} \quad (3)$$

در این رابطه \bar{E} و \bar{X} با رابطه‌های (۴) و (۵) تعریف می‌شوند.

$$\bar{E} = 0.586 \left(\frac{W^{\frac{2}{3}}}{A} \right) \left(\frac{P_a}{P_i} \right)^{0.4} \quad (4)$$

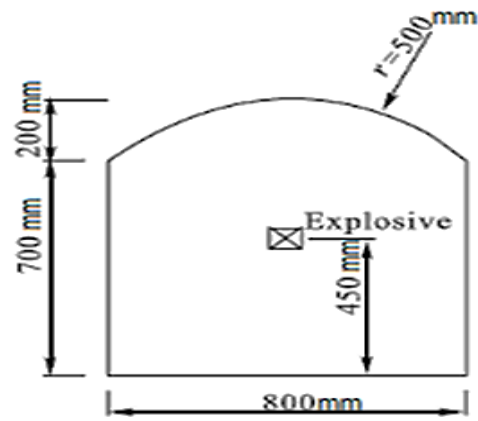
$$\bar{X} = \frac{X}{A^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

که در آن A سطح مقطع تونل بر حسب متر مربع و W قدرت انفجار بر حسب TNT معادل که واحد آن کیلوگرم است، هستند. از سوی دیگر فشار هوا و P_a فشار هوا و P_i فشار محاسبه شده در داخل تونل است. که مقدار P_i را می‌توان با توجه به فشار ورودی به دهانه تونل از نمودارهای شکل (۷) محاسبه نمود.



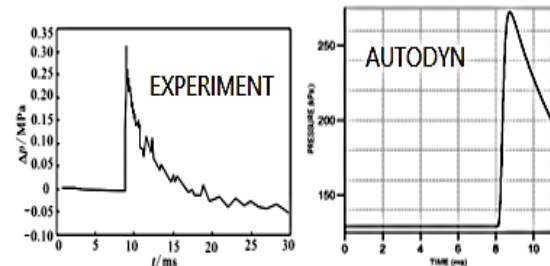
شکل ۷. فشار ورودی به تونل بر حسب فشار محل دهانه تونل [۳]

در شکل (۷) محور افقی مقدار PSO و محور قائم مقدار P_i را برای هر دو حالت انفجار در راستای تونل و عمود بر راستای تونل نشان می‌دهد. با توجه به مقدار فشار دهانه تونل (PSO) به‌دست آمده، مقدار فشار ورودی به تونل (P_i) نیز به‌دست می‌آید. در جدول (۳) بیشینه مقدار فشار به‌دست آمده از حل عددی با نتایج به‌دست آمده از رابطه گیورک و گلوک [۳]، مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود، که نتایج حل عددی و نتایج به‌دست آمده از رابطه تجربی و تحلیلی گیورک و گلوک به هم نزدیک هستند. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که حل عددی از دقت بسیار خوبی برخوردار است. در عین حال دیده می‌شود، پاسخ‌های گیورک و گلوک در انفجارهای نزدیک به دهانه تونل، بزرگتر از پاسخ‌های حل عددی و در انفجارهای دورتر از دهانه تونل، کمتر از نتایج به‌دست آمده از حل عددی هستند. بر این اساس، بهتر است در مسائل واقعی، هر دو روش برای رسیدن به اطمینان بیشتر مورد استفاده قرار بگیرند.



شکل ۴. تصویر سطح مقطع تونل [۱۲]

شکل ۵. مقایسه نمودار فشار- زمان حل عددی و نتایج تجربی [۱۲] (مقاله در فاصله ۲/۲۵ متری)



شکل ۶. مقایسه نمودار فشار- زمان حل عددی با نتایج تجربی [۱۲] (مقاله در فاصله ۶/۲۵ متری)

در جدول (۲) بیشینه مقدار فشار به‌دست آمده از حل عددی با نتایج آزمایشگاهی چینگو و همکاران [۱۲]، مقایسه شده‌اند.

جدول ۲. مقایسه نتایج حل عددی با نتایج تجربی

فاصله از دهانه تونل (m)	نتایج عددی (bar)	نتایج تجربی (bar)
۲/۲۵	۵	۵/۳
۶/۲۵	۲/۷۲	۳/۱۰

۲-۵-۲. مقایسه نتایج عددی با رابطه گیورک و گلوک

در این مثال یک خرج انفجاری به وزن ۱۰۰۰ kg در فاصله ۴ متری از دهانه تونل، روی سطح زمین قرار دارد. خرج از نوع TNT است و تونل با مقطع مربع و طول ضلع ۴ است. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی با رابطه گیورک و گلوک [۳] مقایسه شده است. رابطه گیورک و گلوک به‌صورت رابطه (۳) است. همانطور که در

جدول ۳. مقایسه نتایج حل عددی با رابطه گیورک و گلوک [۳]

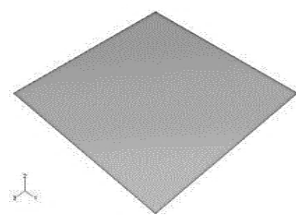
شماره گنج	فاصله گنج از دهانه (متر)	بیشینه فشار (کیلو پاسکال)		در صد خطا
		نتایج عددی	رابطه گیورک و گلوک	
۱	۱۰	۲۴۴۰/۲۰	۲۷۴۷/۴۵	۱۲/۶
۲	۲۰	۱۴۲۷/۳۲	۱۶۴۶/۳۲	۱۵/۳
۳	۳۰	۱۱۹۴/۳۰	۱۱۷۸/۰۱	-۱/۴
۴	۴۰	۹۳۵/۸۳	۹۱۷/۶۸	-۱/۹
۵	۵۰	۸۱۵/۷۶	۷۶۱/۷۴	-۶/۶
۶	۶۰	۷۲۷/۴۰	۶۵۶/۶۶	-۹/۷

۲-۵-۳- بارگذاری ورق فولادی تقویت شده تحت بار انفجار

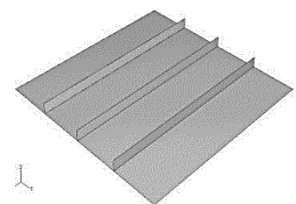
یک صفحه فولادی با ابعاد ۲ × ۲ متر و شرایط تکیه‌گاهی گیردار در چهار طرف با حالات مختلف در شکل (۸) نشان داده شده است. رفتار این صفحه فولادی در حالت‌های ورق ساده با ضخامت‌های ۱۵، ۲۵ و ۳۰ میلی‌متر و حالت‌های ورق ۲۵ میلی‌متر با سه سخت‌کننده در یک راستا و شش سخت‌کننده در دو راستای عمود بر هم تحت اثر بار انفجار بررسی شده است. صفحات مورد بررسی تحت اثر انفجار یک کیلوگرم تی‌ان‌تی در فاصله ده متری از مرکز صفحه قرار گرفته‌اند.

در شکل (۹) نمودارهای جابجایی زمان به‌دست آمده از آزمایشات تجربی انجام شده توسط مجتهدپور بر روی صفحات مورد بررسی تحت اثر بار انفجار یک کیلوگرم تی‌ان‌تی که در فاصله ده متری از ورق‌ها قرار دارد، آورده شده است [۱۶]. در شکل (۱۰) نمودارهای جابجایی زمان به‌دست آمده از حل عددی، برای همان صفحات و تحت اثر همان انفجار آورده شده است. مشاهده می‌گردد، تطابق بسیار مناسبی بین پاسخ‌های حل عددی و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. از سوی دیگر، در جدول (۴) بیشینه مقادارهای جابجایی مرکز صفحات مورد بررسی به‌دست آمده از حل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. مشاهده می‌شود، که در صد اختلاف دو روش با هم کمتر از چهار و نیم درصد است. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که تحلیل دینامیکی انجام شده با نرم‌افزار آباکوس از دقت بسیار مناسبی برخوردار است.

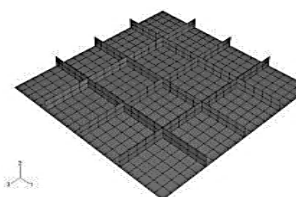
به این ترتیب، اعتبارسنجی نتایج به‌دست آمده از حل عددی با استفاده از نرم‌افزارهای توانمند آتوداین و آباکوس برای انجام تحلیل‌های مورد نیاز در این پژوهش انجام شد.



الف - صفحه بدون سخت کننده

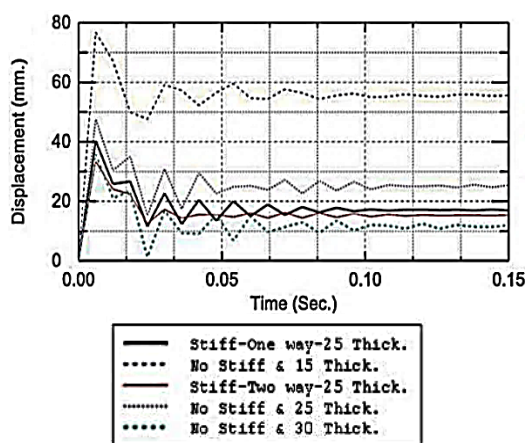


ب - صفحه با سخت کننده در یک جهت

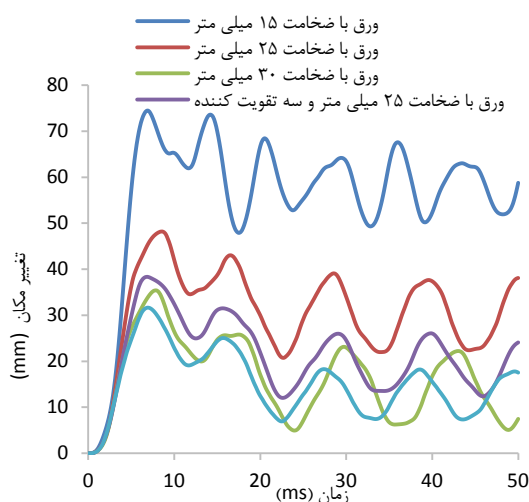


ج - صفحه با سخت کننده در دو جهت

شکل ۸. مدل‌های مختلف ورق با سخت‌کننده [۱۶]

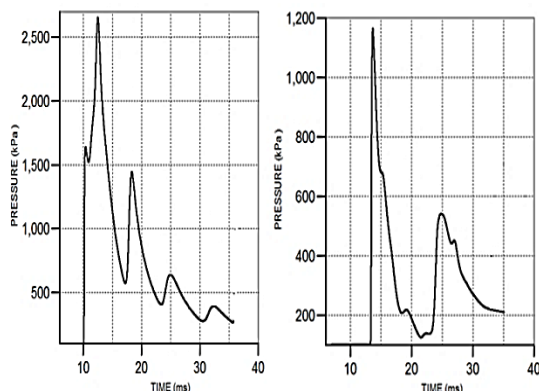


شکل ۹. نمودار تغییر مکان- زمان صفحات مختلف فولادی [۱۶]

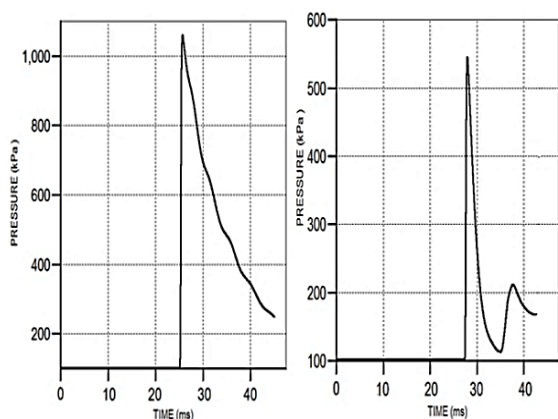


نمودار ۱۰. نمودار تغییر مکان- زمان صفحات فولادی (حل عددی)

بیشینه فشار ورودی به تقاطع دارد. به گونه‌ای که فشار بیشینه گیج ۱ برای طول مستقیم ۴۰ متر تقریباً ۶۰٪ فشار بیشینه همین گیج در طول مستقیم ورودی ۳۰ متر است. از سوی دیگر فشار به‌دست آمده در گیج ۲ برای همه طول‌های مستقیم کمتر از ۶۰٪ بیشینه فشار گیج ۱ در همان طول است. بر این اساس، با افزایش طول و استفاده از موجگیر فشار ورودی به تونل به شدت کاهش می‌یابد.



شکل ۱۲. نمودار فشار- زمان قبل از تقاطع و بعد از تقاطع (داخل خم) در تونل با طول مستقیم ۳۰ متر.



شکل ۱۳. نمودار فشار- زمان قبل از تقاطع و بعد از تقاطع (داخل خم) در تونل با طول مستقیم ۵۰ متر.

با توجه به نتایج به‌دست آمده در جدول (۶)، نتیجه می‌شود که هر چه موج در طول تونل پیش می‌رود بیشینه فشار با شدت کمتری کاهش می‌یابد. به‌طور مثال بیشینه فشار گیج ۱ برای طول مستقیم ۴۰ متر ۶۱/۷٪ این مقدار برای تونل با طول مستقیم ۳۰ متر است، در حالی که این نسبت برای طول‌های مستقیم ۷۰ و ۶۰ متر حدود ۸۶/۷٪ است. این در حالی است، که با استفاده از موجگیر بیشینه فشار گیج ۲ نسبت به گیج ۱ حداقل ۴۵٪ کاهش می‌یابد. بنابراین برای جلوگیری از افزایش طول مستقیم تونل می‌توان از موجگیر استفاده کرد. علاوه بر این، ورودی به سازه اصلی نباید به‌طور مستقیم انجام شود، تا امکان ورود موشک‌های کروز به داخل سازه و یا هدف قرار گرفتن درهای ضد انفجار نا ممکن گردد.

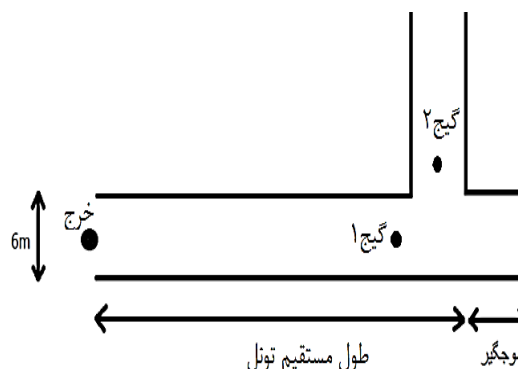
جدول ۴. مقایسه تغییر مکان بیشینه صفحات با و بدون تقویت به‌دست آمده از حل عددی با نتایج آزمایشگاهی

ضخامت صفحه (میلی‌متر) با تعداد سخت‌کننده	تغییر مکان بیشینه (میلی‌متر)		در صد خطا
	شکل (۱۳) [۱۶]	نتایج مدل سازی	
۱۵	۷۶	۷۴/۵	٪-۱/۹۷
۲۵	۴۸	۴۸	٪۰
۳۰	۳۶	۳۵/۴	٪-۱/۶۷
۲۵ با سه سخت‌کننده	۴۰	۳۸/۳	٪-۴/۲۵
۲۵ با شش سخت‌کننده	۳۳	۳۱/۸	٪-۳/۶۴

۳- نتایج و بحث

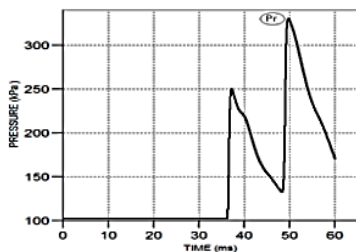
۳-۱- اثر طول بخش مستقیم تونل و موجگیر بر کاهش بیشینه فشار ناشی از انفجار در تقاطع

در شکل (۱۱) پلان تونلی با مقطع مربعی و به طول ضلع ۶ متر که دارای موجگیری به طول شش متر نیز است، نشان داده شده است. برای بررسی اثر موجگیر بر کاهش بیشینه فشار ورودی به تقاطع تونل، ۱۶۰۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی در دهانه تونل نشان داده شده در شکل منفجر می‌شود. فشار ناشی از انفجار مزبور در داخل تونل قبل از تقاطع (گیج ۱) و بعد از تقاطع (گیج ۲) اندازه‌گیری می‌شود. طول قسمت مستقیم تونل از ۳۰ تا ۷۰ متر متغیر است.

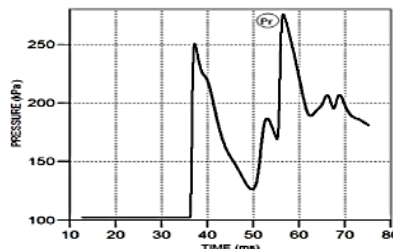


شکل ۱۱. پلان تونل با مقطع مربعی به طول شش متر و دارای موجگیری به عمق شش متر

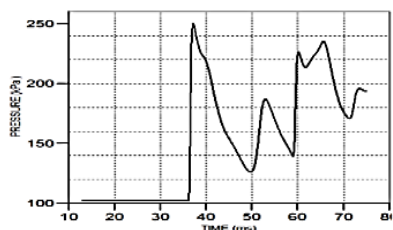
در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نمودارهای بیشینه فشار زمان برای گیج‌های ۱ و ۲ و برای تونل‌های با طول مستقیم ۳۰ و ۵۰ متر نشان داده شده است. علاوه بر این در جدول ۵ مقادیر بیشینه فشار اندازه‌گیری شده در گیج‌های ۱ و ۲ برای طول‌های مستقیم ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ متر آورده شده است. مشاهده می‌شود، وجود موجگیر سبب کاهش قابل توجه بیشینه فشار ثبت شده در گیج ۲ نسبت به گیج ۱ می‌گردد. از سوی دیگر، مشاهده می‌شود، افزایش طول مستقیم تا محل موجگیر اثر قابل ملاحظه‌ای بر



(الف)

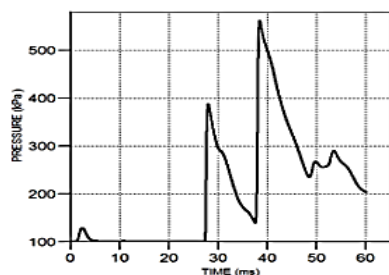


(ب)

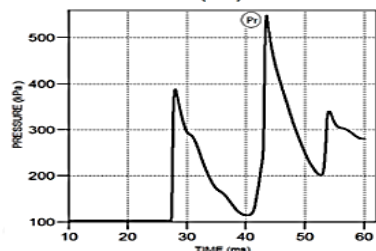


(ج)

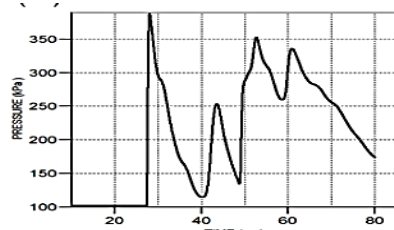
شکل ۱۴. نمودار فشار-زمان برای خرج ۲۰۰ کیلوگرمی با طول موجگیر مختلف



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۵. نمودار فشار-زمان گنج ۲ برای خرج ۴۰۰ کیلوگرمی با طول موجگیر مختلف

جدول ۶. مقادیر بیشینه فشار اندازه‌گیری شده در گنج‌های (۱) و گنج (۲) برای طول‌های مستقیم مختلف

طول مستقیم تونل (متر)	بیشینه فشار گنج ۱ (کیلوپاسکال)	بیشینه فشار گنج ۲ (کیلوپاسکال)
۳۰	۲۶۵۴	۱۱۸۵
۴۰	۱۶۳۵	۸۸۰
۵۰	۱۰۵۷	۵۴۰
۶۰	۸۰۵	۴۴۰
۷۰	۶۹۸	۳۹۱

۳-۲- تعیین طول بهینه موجگیر

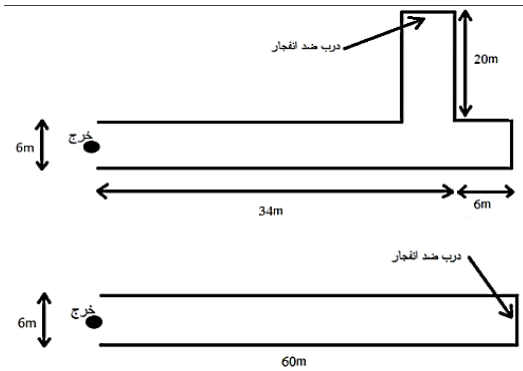
برای بررسی انتشار موج در تونل و تعیین طول بهینه موجگیر، انفجارهایی با وزن تی‌ان‌تی متفاوت در ورودی تونل نشان داده شده در شکل (۱۱) در حالتی که طول بخش مستقیم آن ۳۵ متر باشد، رخ می‌دهد.

۳-۲-۱- بررسی طول بهینه موجگیر برای انفجار ۲۰۰ کیلوگرمی تی‌ان‌تی در دهانه تونل

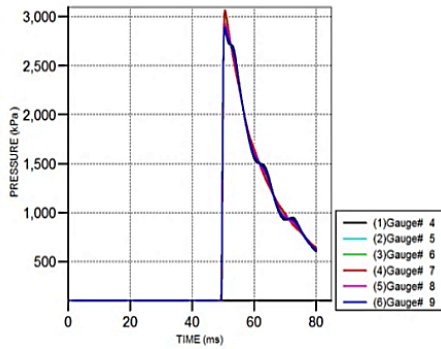
در شکل (۱۴- الف، ب و ج) به ترتیب نمودارهای فشار زمان در گنج ۲ تونل مورد بررسی برای موجگیرهای با طول ۰، ۲ و ۳ متر در اثر انفجار ۲۰۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی در دهانه تونل مورد بررسی، نشان داده شده است. مشاهده می‌شود، در حالتی که طول موجگیر صفر است یا در واقع موجگیر وجود ندارد، فشار انعکاسی پس از برخورد به موج‌های در حال ورود، تشدید شده و بسیار بیشتر از اولین بیشینه فشار ورودی به محل تقاطع است. موجگیر ۲ متری سبب کاهش قابل ملاحظه بیشینه فشار موج برگشتی به داخل تقاطع است، با این وجود هنوز مقدار این فشار از اولین بیشینه فشار وارد شده به تقاطع بیشتر است. همانگونه که در شکل (۱۴- ج) دیده می‌شود، موجگیر ۳ متری سبب می‌شود، بیشینه فشار موج‌های بازگشتی، به تقاطع پس از تشدید، از اولین بیشینه فشار ورودی به تقاطع کمتر باشند. بر این اساس، برای این مقدار انفجار طول بهینه موجگیر ۳ متر است.

۳-۲-۲- بررسی طول بهینه موجگیر برای انفجار ۴۰۰ کیلوگرمی تی‌ان‌تی در دهانه تونل

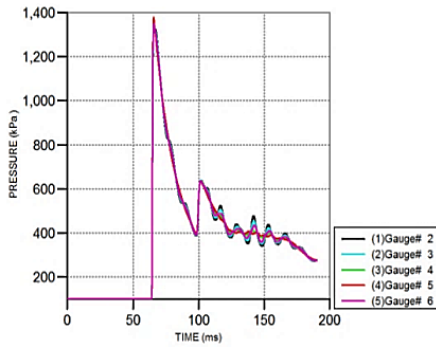
در شکل (۱۵- الف، ب و ج) به ترتیب نمودارهای فشار زمان در گنج ۲ تونل مورد بررسی برای موجگیرهای به با طول ۰، ۲ و ۴ متر در اثر انفجار ۴۰۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی در دهانه تونل مورد بررسی نشان داده شده است. همانند آنچه که برای انفجار ۲۰۰ کیلوگرمی بیان شد، در این حالت نیز وجود دارد. طول بهینه موجگیر برای این مقدار انفجار تی‌ان‌تی در دهانه تونل مورد نظر، ۴ متر است



شکل ۱۷. پلان تونل با موجگیر و بدون موجگیر



الف



ب

شکل ۱۸. بیشینه فشار انعکاسی روی درب ضد انفجار الف-

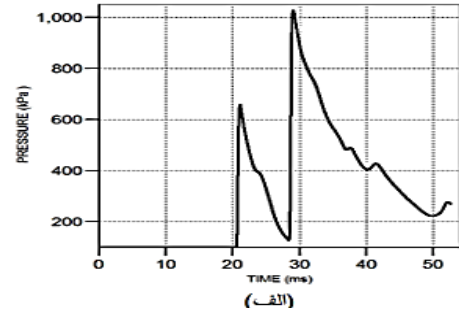
تونل بدون موجگیر ب- تونل دارای موجگیر

۳-۴- بارگذاری و تحلیل انواع درب‌های ضد انفجار و مقایسه عملکرد آنها

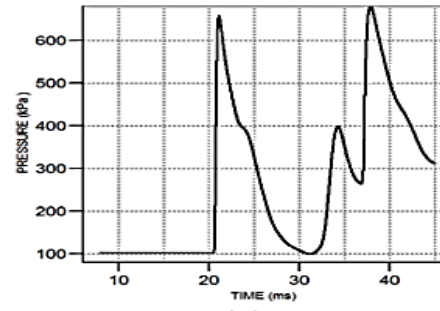
با توجه به مقدار بیشینه فشار انعکاسی روی درب ضد انفجار دارای موجگیر، درب‌های ضد انفجار تخت، قوسی حول محور Y و قوسی حول محور X با اندازه قوس متفاوت تحت بارگذاری نشان داده در شکل (۱۸ ب) قرار گرفتند. مدلسازی این درب‌ها با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام می‌شود. با توجه به ابعاد مقطع تونل که مربعی با طول ضلع ۶ متر است، درب دو لنگه‌ای که کل سطح ورودی را پوشش بدهد، انتخاب می‌شود. هر لنگه درب دارای ابعاد ۳ متر طول و ۶ متر ارتفاع است. اتصال درب‌ها به پوشش بتنی تونل ورودی به صورت لولایی است. در شکل (۱۹) قوس حول محور میانی و اندازه قوس نشان داده شده است.

۳-۲-۳- بررسی طول بهینه موجگیر برای انفجار ۸۰۰ کیلوگرمی تی‌ان‌تی در دهانه تونل

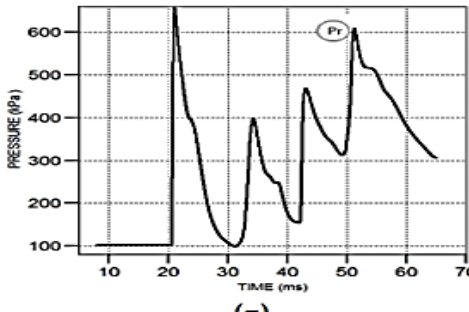
در شکل (۱۶- الف، ب و ج) به ترتیب نمودارهای فشار زمان در گیج ۲ تونل مورد بررسی برای موجگیرهای به طول ۰، ۵ و ۶ متر در اثر انفجار ۸۰۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی در دهانه تونل مورد بررسی نشان داده شده است. همانند آن چه که برای انفجار ۲۰۰ کیلوگرمی و ۴۰۰ کیلوگرمی بیان شد، در این حالت نیز وجود دارد. طول بهینه موجگیر برای این مقدار انفجار تی‌ان‌تی در دهانه تونل مورد نظر، ۶ متر است.



(الف)



(ب)



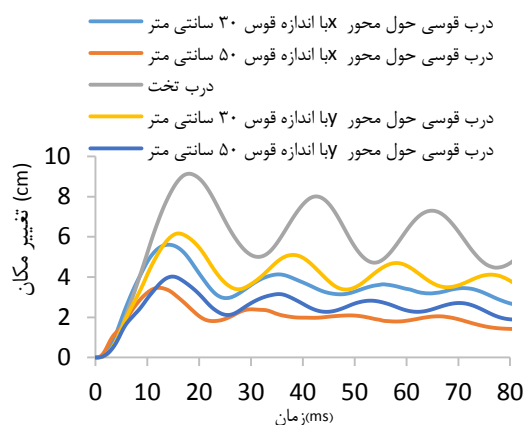
(ج)

شکل ۱۶. نمودار فشار- زمان برای خرج ۲۰۰

کیلوگرمی با طول موجگیر مختلف

۳-۳- بارگذاری درب ضد انفجار در تونل با و بدون موجگیر

در شکل (۱۷) محل درب ضد انفجار دو تونل با طول حفاری یکسان نشان داده شده است که یکی از آنها دارای موجگیر و دیگری به صورت مستقیم و بدون موجگیر است. همانگونه که در شکل (۱۸) مشاهده می‌شود، بیشینه فشار وارد به درب ضد انفجار در حالت بدون موجگیر بیش از دو برابر بیشینه فشاری است که به درب ضد انفجار دارای موجگیر وارد شده است.



شکل ۲۱. تغییر مکان بیشینه انواع درب ضد انفجار با دهانه ۶ متر در ۶ متر و با وزن یکسان

۳-۴-۲- بررسی تغییر مکان با افزایش طول درب

اکنون فرض می‌شود، عرض تونل به دوازده متر افزایش یابد ولی ارتفاع آن همان ۶ متر باشد. در این صورت هر لنگه درب ضد انفجار دارای عرض ۶ متر و ارتفاع ۶ متر خواهد بود. در شکل (۲۲) تغییر مکان درها در این حالت، با هم مقایسه شده است. با توجه به نمودارهای شکل ۲۲، مشاهده می‌شود، تغییر مکان درب قوسی حول محور X با اندازه قوس ۵۰ سانتی‌متر، از ۳/۴۵ سانتی‌متر به ۱۰/۵ سانتی‌متر، تغییر مکان درب قوسی حول محور Y با اندازه قوس ۵۰ سانتی‌متر، از ۶ سانتی‌متر به حدود ۱۱ سانتی‌متر و تغییر مکان درب تخت، از حدود ۹/۱ سانتی‌متر به ۱۸/۸ سانتی‌متر افزایش یافته است. با توجه نمودارهای شکل (۲۱) دیده می‌شود، که انحنا حول محور در راستای بعد کوتاه درب نتایج بهتری را به دست می‌دهد. از سوی دیگر، در این حالت که لنگه در مربعی شکل است، ایجاد قوس حول هر کدام از محورها تقریباً نتایج یکسانی را در پی دارند و تغییر مکان بیشینه در هر دو حالت یکی است. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که تغییر مکان حول محوری که موازی بعد کوچکتر لنگه درها باشد، نتایج بهتری دارد و سبب کاهش بیشتر، جابجایی‌های به وجود آمده در درهای قوسی نسبت به درهای تخت می‌گردد.

۳-۴-۵- بررسی وضعیت تنش در درهای تخت و قوسی

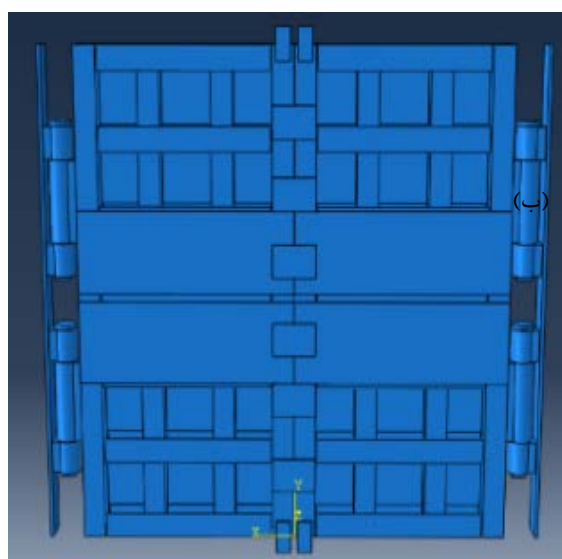
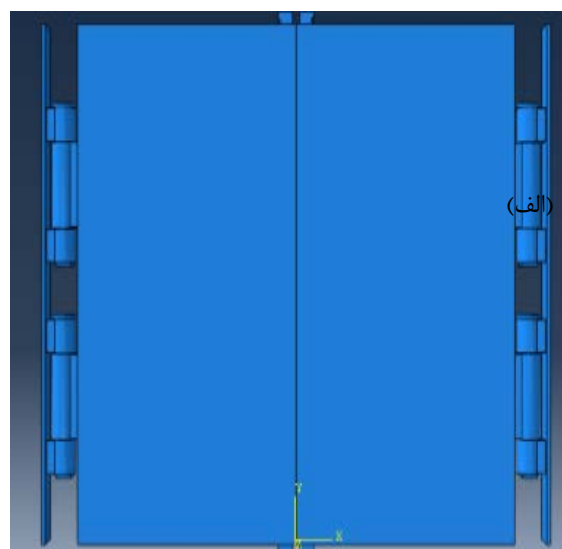
معیارهایی متفاوتی برای بررسی وضعیت تنش و بررسی تسلیم یا گسیختگی در نقاط مختلف سازه‌های تحلیل شده تحت اثر بارهای وارد بر آنها وجود دارد. یکی از این معیارها که برای فلزات نرمی



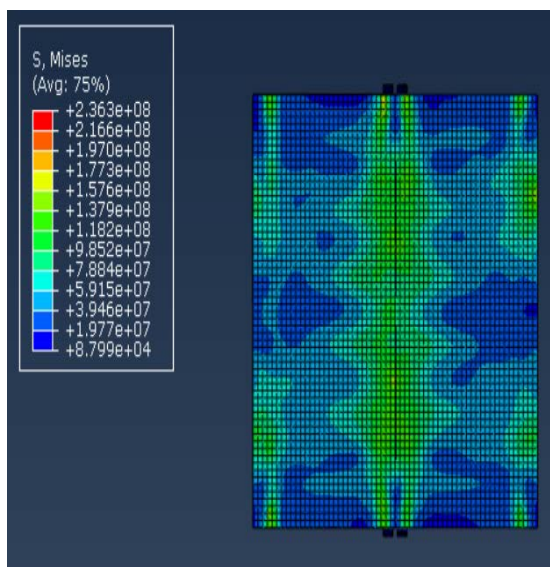
شکل ۱۹. اندازه قوس درب ضد انفجار

۳-۴-۱- مقایسه تغییر مکان بیشینه انواع درب

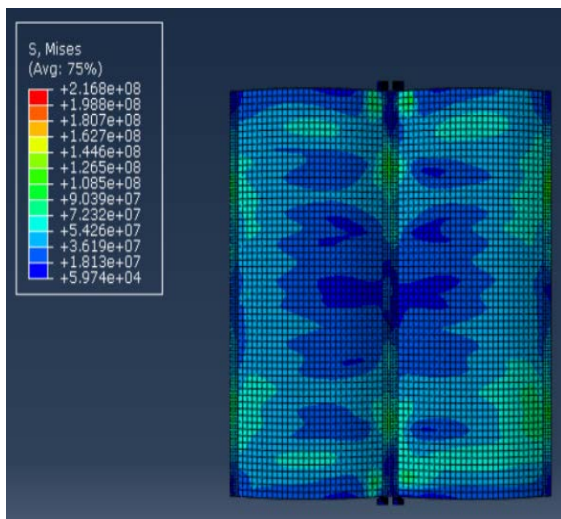
در شکل (۲۰)، نمای از روبرو و از پشت، درهای ضد انفجار مورد بررسی نشان داده شده است. در شکل (۲۱) نمودار تاریخچه زمانی تغییر مکان، نقطه مرکزی درهای مقاوم در برابر انفجار، تخت، قوسی حول محور Y و قوسی حول محور X با وزن یکسان، تحت اثر بار انفجار مورد نظر با هم مقایسه شده است. مشاهده می‌شود، بیشینه مقدار تغییر شکل ایجاد شده درب با قوس حول محور X کمترین است. از سوی دیگر، مشاهده می‌شود، با افزایش اندازه قوس حول هر کدام از محورها بیشینه مقدار جابجایی باز هم کاهش می‌یابد. با این وجود اندازه قوس اگر ۵٪ بعد عمود بر محور انحنا باشد، کاهش تغییر شکل قابل توجهی را در پی دارد.



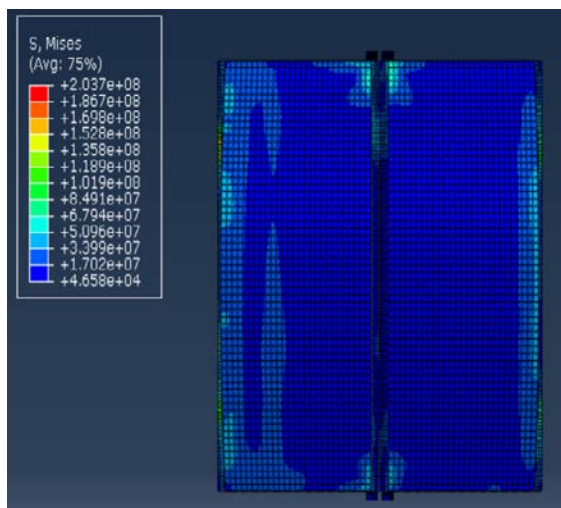
شکل ۲۰. الف- نمای از روبرو ب- نمای از پشت درب ضد انفجار



شکل ۲۳. تنش فون- میسز درب تخت

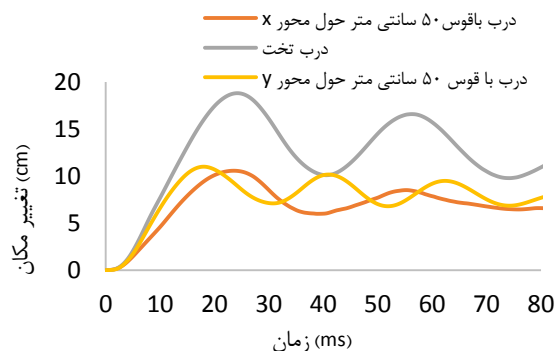


شکل ۲۴. تنش فون- میسز درب با قوس حول محور Y



شکل ۲۵. تنش فون- میسز درب با قوس حول محور X

مانند فولاد مناسب است، معیار تسلیم فون میسز است. این معیار با توجه به تنش‌های اصلی هر نقطه از یک جسم پیوسته به صورت رابطه (۶) تعریف می‌گردد. در رابطه (۶) σ_1 ، σ_2 و σ_3 به ترتیب، تنش‌های اصلی مربوط به صفحات اصلی در هر نقطه از جسم پیوسته هستند.



شکل ۲۲. نمودار تغییر مکان بیشینه انواع درب ضد انفجار دارای عرض ۱۲ متر و ارتفاع ۶ متر.

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (6)$$

در ادامه وضعیت تنش درب‌های ضد انفجار مورد بررسی تحت اثر بار انفجاری مورد نظر بر مبنای این معیار سنجیده می‌شود. اگر تنش فون میسز به دست آمده در یک نقطه بیشتر از تنش تسلیم ماده باشد یعنی ماده به نقطه تسلیم رسیده است و لازم است با افزایش ضخامت، مقاومت سازه افزایش یابد. ولی اگر تنش بدست آمده کمتر از تنش تسلیم باشد شکست رخ نمی‌دهد. در شکل‌های (۲۳)، (۲۴) و (۲۵)، به ترتیب وضعیت تنش فون میسز برای درب‌های ضد انفجار، تخت، قوسی حول محور Y و قوسی حول محور X برای درب دو لنگه مربعی با بعد ضلع ۶ متر تحت اثر بار انفجاری شکل (۱۸) ب نشان داده شده است. مشاهده می‌شود، وضعیت تنش در درب‌های قوسی بسیار مناسب‌تر از درب تخت است. از سوی دیگر، دیده می‌شود، در بیشتر محدودهدرب دارای قوس حول محور X، تنش فون میسز کمتری نسبت به درب‌های دیگر وجود دارد. به این ترتیب، نتیجه گرفته می‌شود، که استفاده از درب‌های قوسی بهتر از درب‌های تخت است و همچنین بهتر است قوس حول محور موازی با بعد کمتر لنگه‌های درب ضد انفجار باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا اثر طول موجگیر بر کاهش بیشینه فشار در تونل و همچنین کاهش بار وارده به درب ضد انفجار انتهایی تونل با استفاده از هیدروکود آتوداین بررسی شد. سپس تحلیل رفتار درب‌های ضد انفجار تخت و قوسی تحت اثر بارهای ناشی از انفجار با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که- طول بهینه موجگیر متأثر از قدرت انفجار در ورودی تونل است. به‌عبارت دیگر، با افزایش قدرت انفجار، طول بهینه موجگیر افزایش می‌یابد. از طرف دیگر مشخص شد که هرچه مقدار خرج انفجاری در دهانه تونل و بیشینه فشار ورودی به داخل تونل زیادتر باشد، روند کاهش فشار در طول تونل سریع‌تر است. با این وجود، با فاصله گرفتن از ابتدای تونل، گرادیان کاهش فشار کم می‌شود. بر این اساس، برای جلوگیری از افزایش طول ورودی تا رسیدن به فشار مطلوب بهتر است از موجگیر استفاده شود. - با توجه به اندازه فشار بازگشتی از انتهای موجگیر برای خرج‌های ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ کیلوگرم با چند برابر شدن وزن خرج، طول موجگیر بهینه چند برابر نمی‌شود و می‌توان طول موجگیر ۶ متر و یا بیشتر را برای هر سه خرج انتخاب کرد. تحلیل رفتار درب‌های ضد انفجار، تخت و قوسی نشان می‌دهد، که رفتار درب‌های قوسی بسیار بهتر از رفتار درب‌های تخت است. به‌عبارت دیگر، بیشینه تغییر شکل و بیشینه تنش به وجود آمده در درب‌های قوسی، نسبت به درب‌های تخت با ابعاد و وزن یکسان، بطور قابل ملاحظه‌ای کمتر است. این عملکرد، سبب می‌شود که برای یک انفجار یکسان، درب قوسی طراحی شده وزن کمتری نسبت به درب تخت داشته باشد. با افزایش اندازه قوس، رفتار درب در برابر انفجار بهتر می‌شود و بیشینه مقادیرهای جابجایی و تنش کاهش می‌یابد. بررسی درب‌های مستطیلی نشان می‌دهد، اگر محور دوران قوس موازی با بعد کمتر لنگه‌های درب ضد انفجار باشد، رفتار درب در برابر بارهای انفجاری خیلی بهتر می‌شود.

۵- مرجع‌ها

- [1] Bulson, P. S. "Explosive Loading of Engineering Structures"; E & FN SPON, 1997.
- [2] Henrych J. "The Dynamics of Explosion and Its Use"; Elsevier, Amsterdam, 1979.
- [3] 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.
- [4] Binggeli, E.; Anet, B. "Experimentelle Untersuchung der Ausbreitung Iconventioneller Luftstösse in Tunnelsystemern"; Proc. 5th Int. Symp. Interaction of Conventional Munitions with Protective Structures, Mannheim, Germany, April 1991, p. 209.
- [5] Igara, O.; Wu, X.; Falcovitz, J.; Meguro, T.; Takayama, K.; Heilig, W. "Experimental and Theoretical Study of Shock Wave Propagation through Double-Bend Ducts"; J. Fluid Mech. 2001, 437, 255-282.
- [6] Christopherson, D. G. "Structural Defence"; UK Ministry of Home Security, Civil Defence Research Committee paper RC 450, 1946.
- [7] Peyman, S.; Tahmasebzadeh, M. "Effect of Blast Wave Trap in Tunnels with 90 Degrees Bend on Reduction of Pressure Produced by An Explosion Outside The Tunnel"; Adv. Defence Sci. & Technol. 2015, 201-210.
- [8] DOD, U.F.C. "UFC3-340-02: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions"; US DOD. Washington, DC, USA, 2008.
- [9] Li, Ch.; Qin, F.; Ya-Dong, Z.; Yi, Z.; Jun-Yu, F. "Numerical and Experimental Investigations on the Blast-resistant Properties of Arched RC Blast Doors"; Int. J. Protect. Struct. 2010, 17, 425-441.
- [10] Choi, Y.; Lee, J.; Yoo, Y. H.; Yun, K. "A Study on the Behavior of Blast Proof Door under Blast Load"; Int. J. Precision Eng. Manufacturing 2016, 17, 119-124.
- [11] Underground structural department "Design of Explosion-proof Doors"; Translated and Edited: Emen Gostaran Mohit Company in Persian.
- [12] Jingbo, L.; Qiushi, Y.; Jun, W. "Analysis of Blast Wave Propagation inside Tunnel"; Trans. Tianjin University, 2008, 14, 358-362.
- [13] "Design of Structures to Resist Nuclear Weapons Effects"; ASCE Manuals and Reports of Engineering Practice; no. 42
- [14] Mojtahedpour, M. "Influence of Building Shape on Stress Distribution caused by Blast Wave"; M.Sc. Thesis, Persian Gulf University, Bushehr.