

نشریه علمی پدافند غیرعامل

سال یازدهم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۹، (پیاپی ۴۲): صص ۲۱-۱۵

"علمی-ترویجی"

بررسی تأثیر دو پارامتر زاویه چرخش محور طولی (خم) و تغییر موضعی سطح مقطع تونل بر کاهش فشارهای ناشی از انفجار در دهانه تونل

مصطفی امینی مزرعه نو^{۱*}، محمدرضا حسنی خورسندی^۲، صفا پیمان^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۱۶

چکیده

انفجار در دهانه ورودی تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی می‌تواند منجر به خسارات و تلفات سنگینی شود. به‌منظور کاهش اثرات موج ناشی از انفجار در دهانه ورودی تونل، از روش‌هایی همچون استفاده از موج‌گیرها، خم‌ها، موانع هندسی، درب ضد انفجار، الگوهای مختلف ورودی و تعدد ورودی و خروجی می‌توان استفاده نمود که استفاده از موانع هندسی به ویژه موج‌گیرها از پرکاربردترین و اقتصادی‌ترین روش استهلاک موج در تونل‌ها است. هدف از این مقاله بررسی اثر زاویه چرخش محور طولی (خم) و تغییر موضعی سطح مقطع تونل در کاهش اثرات انفجار است که با بررسی عددی با استفاده از نرم‌افزار اباکوس زاویه چرخش مناسب محور طولی و محل قرارگیری مناسب برای تغییر موضعی سطح مقطع تونل در راستای تونل منتهی به سازه امن مشخص، در نهایت شاخص‌های مناسب با در نظر گرفتن کمترین حفاری (اقتصادی‌ترین روش) و بیشترین کاهش اثرات انفجار (کاهش آسیب‌پذیری) در انفجارهای نزدیک دهانه و دور از دهانه پیشنهاد می‌گردد همچنین تغییر موضعی سطح مقطع تونل در انتهای مسیر مستقیم و تغییر زاویه چرخش محور طولی از حاده ۱۳۵ درجه تا قائم (۹۰ درجه) بیشترین کاهش فشار را شاهد خواهید بود.

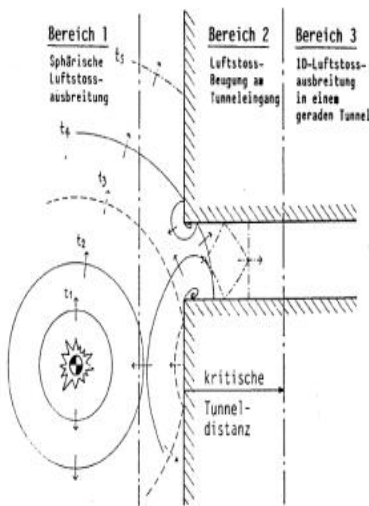
کلیدواژه‌ها: اضافه فشار، زاویه چرخش، تونل، موج‌گیر، انفجار

۱- مربی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران (amini.maz.59@gmail.com) - نویسنده مسئول

۲- کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

۳- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

موج شوک به صورت نیم کره‌ای غالب است منطقه دو که ناحیه تعامل انفجار در ورودی تونل است که با اثرات پیچیده تشکیل گرداب در ورودی تونل و لبه‌ها مشخص می‌شود. هوا که از ناحیه بیرون جریان دارد این ناحیه را تقویت می‌کند. منطقه سه هم مانند انفجار در هوای آزاد عمل می‌کند.



شکل (۱): چگونگی انتشار موج شوک در دهانه تونل.

متیو وهمکاران [۴] ظرفیت‌های روش شبیه‌سازی یک اویلر-لاگرانژ برای ارزیابی خطرات ناشی از تهدیدات در سناریوهای واقع‌بینانه را نشان داد. همچنین آن‌ها برای صحت سنجی خود از تیوب شوک استفاده کردند. اضافه فشارهای به دست آمده از شبیه‌سازی و مقایسه شده با آزمون‌های تجربی آن‌ها به این نتیجه دست یافتند زمانی که موج انفجار به دیواره برخورد می‌کند دوباره موج انعکاس پیدا کرده و مقداری افزایش پیدا کرده است.

در این مقاله، با توجه به چگونگی انتشار موج انفجار در داخل سازه‌های زیرزمینی و به ویژه در محل تقاطع تونل‌ها، بعد از صحت سنجی نتایج نرم‌افزار اباکوس، با شبیه‌سازی انفجار داخل تونل بهترین موقعیت تغییر سطح مقطع و زاویه خم مورد بررسی قرار می‌گیرد و شبیه‌سازی می‌شود.

۲. مدل هندسی سازه امن

شکل (۲) و شکل (۳) نمای کلی یک تونل امن با زاویه خم آلفا دارای موج‌گیر، تغییر مقطع عرضی تونل و مسیری که جبهه موج انفجار تا سازه امن زیرزمینی طی می‌کند را نشان می‌دهد. هدف از این مقاله به دست آوردن مکان تغییر مقطع عرضی و زاویه مناسب خم می‌باشد.

۱. مقدمه

انفجار در داخل و یا در دهانه تونل‌های حمل‌ونقل و انبارهای استراتژیک نتیجه تلفات مستقیم خواهد بود و آسیب‌های بعدی ساختارهای تونل می‌تواند منجر به زیان‌های بزرگی اجتماعی و اقتصادی شود درک تعامل تونل و زمین، انتشار موج تونل، خسارت پوششی که در معرض بارگذاری انفجاری داخل تونل است بسیار مهم است.

به منظور کاهش اثرات موج انفجار در دهانه ورودی تونل‌ها و در مسیرهای داخل تونل‌ها، از روش‌هایی همچون استفاده از موج‌گیر تا خم‌ها، موانع هندسی، تغییر مقطع عرضی تونل، درب ضد انفجار، الگوهای مختلف ورودی تعدد ورودی و خروجی‌ها، استفاده مناسب از طبیعت می‌توان استفاده نمود که استفاده از موانع هندسی به ویژه موج‌گیرها از پرکاربردترین و اقتصادی‌ترین روش کاهش اثرات انفجار در تونل‌ها است.

صفا پیمان و طهماسب زاده [۱] با استفاده از نرم‌افزار اتوداین در خصوص زاویه موج‌گیر با راستای سازه امن به نتایج زیر رسیدند:

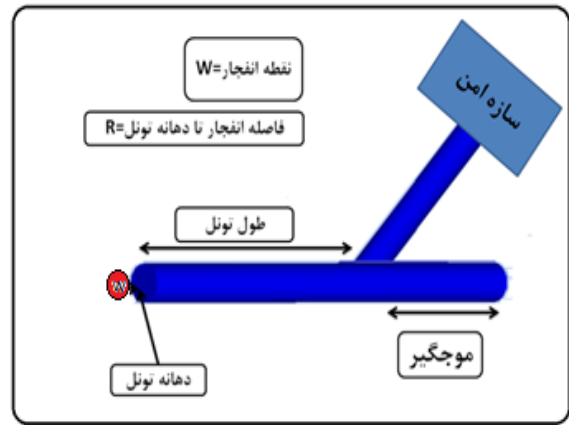
الف) با افزایش زاویه از صفر (تونل مستقیم) تا قبل از ۱۸۰ درجه، میزان فشار انتقالی به سمت سازه امن، کاهش می‌یابد.
ب) در انفجار آشفته به این نتیجه می‌رسند که برای خم با زاویه ۴۵ درجه، کاهش فشار بین ۷۶ تا ۸۶ درصد، برای خم با زاویه ۹۰، کاهش فشار بین ۸۸ تا ۹۴ درصد، (کاهش فشار بین ۸ تا ۱۲ درصد افزایش نسبت به خم ۴۵ درجه)، برای خم با زاویه ۱۳۵، کاهش فشار بین ۹۱ تا ۹۵ درصد، (کاهش فشار بین ۱ تا ۳ درصد افزایش نسبت به خم ۹۰ درجه) می‌شود. این بدان معنی است که درصد عمده کاهش مربوط به خم تا زاویه ۴۵ درجه می‌باشد.

یوزهنهان و لی زهنگ [۲]، به بررسی اثر انفجار داخل تونل بر روی لاینینگ تونل پرداختند که در این پژوهش به موضوع فشار انعکاسی هم پرداخته است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که معمولاً فشار انعکاسی چندین برابر فشار برخوردی است به خاطر همین موضوع آن‌ها فشار و ایمپالس را بر روی المان جداره تونل که نشکسته یا به عبارتی تغییر شکل زیاد نداشته است را اندازه‌گیری کردند و با آیین‌نامه یو اف سی مقایسه کردند و متوجه شدند به دلیل بازتاب‌های چندگانه موج و تغییر شکل لاینینگ فشار انعکاسی چندین برابر فشار برخوردی است.

ادوارد بنجیلی [۳]، برناردانت به دلیل اینکه انتشار موج شوک در دهانه تونل پیچیده می‌باشد آن‌ها محیط انفجار در دهانه تونل را به سه قسمت تقسیم کردند؛ برای منطقه یک که زمانی بین t_1 تا t_3 مطابق شکل (۱) نشان داده شده است، انتشار

۳-۱. محیط انتشار

محیط انتشار موج ناشی از انفجار که هوا می‌باشند، به‌عنوان گازی ایده‌آل پراکنده است. به‌منظور حذف اغتشاشات و اثر انعکاس موج در خارج و همگنی موج در ورودی تونل، مرز محیط انتشار بیرون از تونل به‌گونه‌ای فرض شده است که موج انفجار اجازه عبور از آن را نداشته در بیرون تونل موج انعکاسی وجود ندارد و برای انعکاس امواج درون هوای داخل تونل به‌صورت کاملاً مشخصی شبیه‌سازی می‌گردد. در این روش که هوا مانند یک سیال عمل می‌کند برای انعکاس موج انفجار پارامترهای درجه آزادی تونل $(V_1 = V_2 = V_3 = 0)$ را بسته شد.



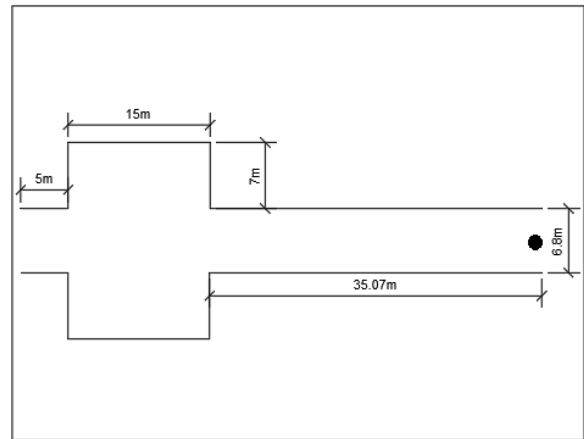
شکل (۲): نمای کلی از سازه امن و موج‌گیر [۱].

۳-۲. ماده منفجره

خرج انفجاری به شکل مکعبی، بدون پوشش و به وزن ۴۰۰ کیلوگرم از جنس TNT مدل شده است.

۳-۳. نرم‌افزار و حل گر مورد استفاده

در این پژوهش از هیدرو کد توانمند اباکوس استفاده می‌شود. با توجه به وجود تغییر شکل‌های بزرگ و مسائل درگیر با سیالات و گازها از تکنیک کوپل اویلری - لاگرانژی (CEL) استفاده شده است.



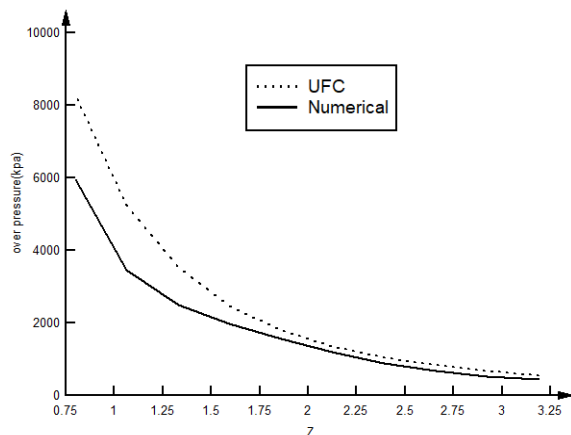
شکل (۳): تغییر مقطع عرضی تونل.

۴. صحت سنجی شبیه‌سازی

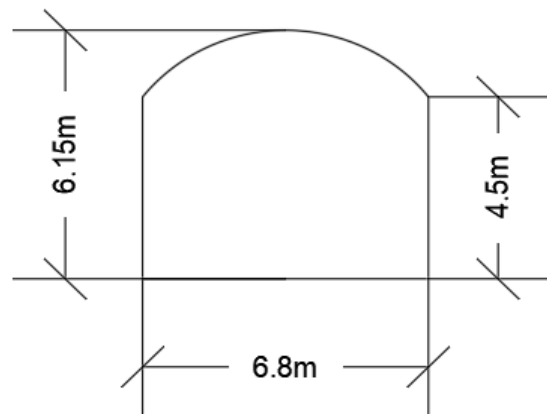
در این قسمت با حل مثال‌هایی، اعتبارسنجی نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی انجام می‌شود.

۴-۱. انتشار موج انفجار در هوای آزاد

در جدول (۱) و شکل (۵)، بیشینه فشار در فواصل مختلف از محل انفجار ۱۰۶/۶ کیلوگرم که با گراف آیین‌نامه UFC مقایسه شده است.



شکل (۵): مقایسه بیشینه فشار حاصل از روش عددی با آیین‌نامه UFC.

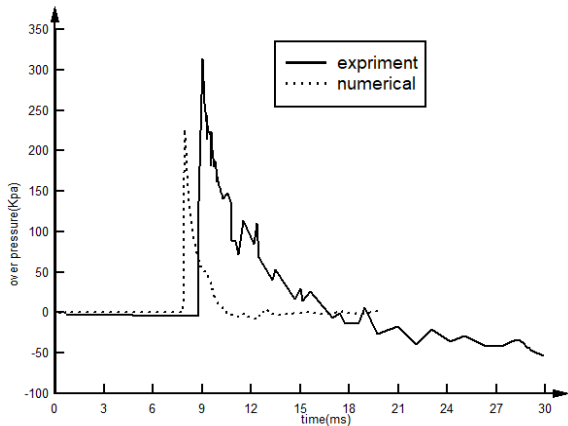


شکل (۴): سطح مقطع تونل.

۳. شبیه‌سازی عددی

شبیه‌سازی عددی انتشار موج ناشی از انفجار بمب‌های مختلف و با فاصله‌های متفاوت از دهانه تونل، به‌صورت سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار اباکوس انجام می‌شود.

وجود نداشته باشد، مقایسه شد. در این حالت میزان خرج ۴۰۰ کیلوگرم بوده و به صورت مکعبی در دهانه ورودی تونل روی زمین قرار داده شده و اندازه المان ۱۵ سانتی متر استفاده شده است. محل قرائت فشار در مرکز هندسی سطح مقطع خوانده شده است.



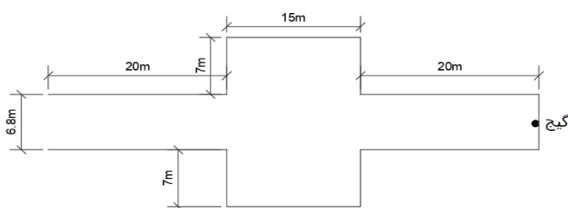
شکل (۷): نمودار اضافه فشار - زمان در فاصله ۶/۲۵ متری از خرج.

سه حالت برای تغییر مقطع عرضی در طول تونل در نظر گرفته شد:

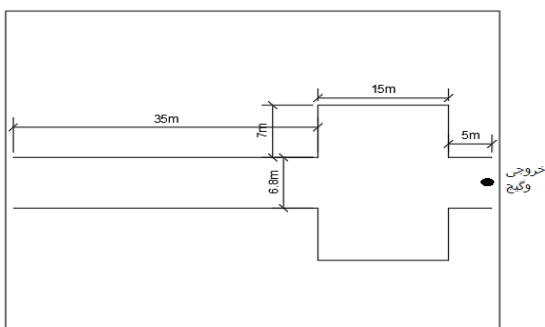
الف: در صورتی که تغییر مقطع عرضی در ابتدای تونل باشد (مطابق شکل ۳).

ب: در صورتی که تغییر مقطع عرضی میانه تونل باشد (مطابق شکل ۸).

ج: در صورتی که تغییر مقطع عرضی در انتهای تونل باشد (مطابق شکل ۹).



شکل (۸): تغییر مقطع عرضی در میانه تونل باشد



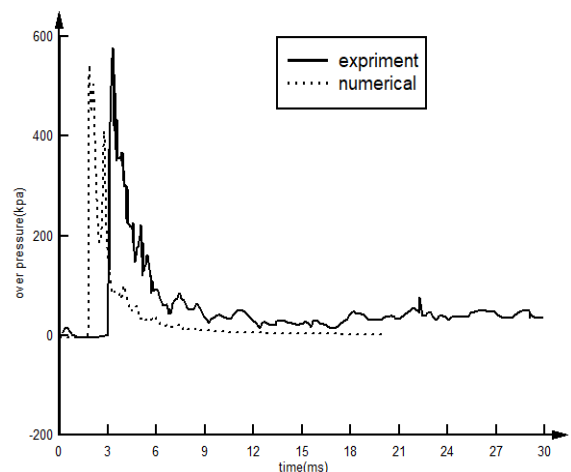
شکل (۹): تغییر مقطع عرضی در انتهای تونل باشد

جدول (۱): مقایسه نتایج عددی با آیین نامه [۵]

Z	اضافه فشار مدل سازی (kpa)	اضافه فشار آیین نامه (kpa)	درصد خطا
۳/۱۸	۴۴۲/۶۱۲	۵۵۰/۱۳۷	۱۹/۵۴
۲/۹۲	۵۲۱/۸۲۱	۶۶۷/۶۶۴	۲۱/۸۴
۲/۶۵	۶۷۲/۹۸۳	۸۳۰/۷۱۷	۱۸/۹۸
۲/۳۹	۸۸۶/۰۳	۱۰۴۵/۲۰۰	۱۵/۲۲
۲/۱۲	۱۱۹۰	۱۳۵۷/۷۹۱	۱۲/۳۵
۱/۸۶	۱۵۷۰	۱۷۹۳/۰۲۷	۱۲/۴۳
۱/۵۹	۱۹۸۰	۲۴۷۰/۱۲۵	۱۹/۸۷
۱/۳۲	۲۵۰۰	۳۵۴۲/۶۸۹	۲۹/۴۳
۱/۰۶	۳۴۶۰	۵۲۴۵/۴۱۵	۲۴/۰۳
۰/۷۹	۵۹۵۰	۸۲۷۳/۷۶۶	۲۸/۰۸

۴-۲. صحت سنجی موج انفجار در داخل تونل

در این روش به صحت سنجی مقاله لیو جانوو یان [۶] پرداخته شد. مطابق شکل (۴) ۰/۶ کیلوگرم TNT در مرکز تونل قرار داده‌اند و فشار در نقاط ۶/۲۵ و ۲/۲۵ متری از مرکز تونل به صورت تجربی اندازه‌گیری کردند و این نتایج را با نتایج مدل سازی مقایسه می‌شود. مطابق شکل (۶) و شکل (۷) می‌باشد.



شکل (۶): نمودار اضافه فشار - زمان در فاصله ۲/۲۵ متری از خرج.

۵. نتایج و بحث

۵-۱. بررسی تغییر مقطع عرضی تونل

برای بررسی موضوع تعریض در بخشی از طول آن یک اتاقک به ابعاد (۱۵×۲۰/۸×۸) طراحی و در سه موقعیت متفاوت در طول محور تونل قرار داده شده و باحالتی که در مسیر تونل هیچ اتاقکی

جدول (۲): مقایسه اضافه فشار موقعیت‌های مختلف تغییر مقطع عرضی باحالتی که تغییر مقطع وجود نداشته باشد

موقعیت تغییر مقطع	اضافه فشار (kpa)	درصد کاهش
ابتدا	۷۵	۶۲
میانه	۶۹/۸۱	۶۵
انتهای	۶۲/۷۱	۶۸/۵
ساده	۱۹۹/۹۹	۰

جدول (۳): مقایسه میزان حفاری

حالت مختلف	میزان حفاری (m ³)
تغییر مقطع عرضی	۲۱۱۲/۸
بدون تغییر مقطع عرضی	۴۰۳۲

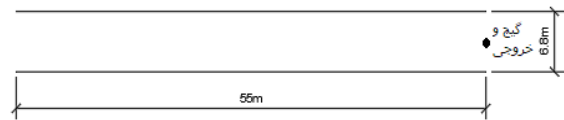
۲-۵. بررسی اثر خم بر روی موج انفجار

برای این حالت که میزان خرج ۴۰۰ کیلوگرم که به صورت مکعبی در دهانه ورودی تونل، روی زمین قرار داده شده و ایجاد یک بن‌بست در راستای مستقیم تونل (موج‌گیر) به همراه یک انشعاب با زاویه‌های خم مشخص شده نسبت به محور اصلی طولی تونل است.

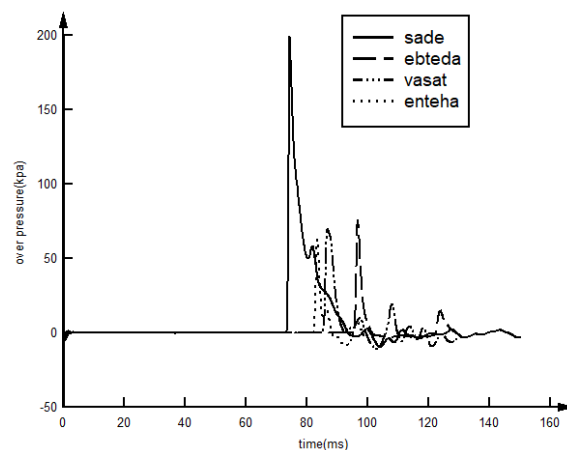
در این بخش به منظور ارزیابی تعیین میزان کاهندگی موج انفجار با چهار نوع زاویه انشعاب ۹۰، ۱۰۵، ۱۳۵ و ۱۱۲/۵ درجه با راستای محور اصلی تونل مدل‌سازی و هم‌چنین موقعیت اندازه‌گیری فشار در سه موقعیت A، B و C شرح شد.

تمامی درجات آزادی المان‌های لاینینگ تونل بسته شده است ($V_1 = V_2 = V_3 = 0$) تا بتواند انعکاس امواج درون هوای داخل تونل به صورت کاملاً مشخصی شبیه‌سازی می‌گردد بنابراین همان‌طور که قبلاً توضیح داده شده است؛ اما به طبع این شرایط با شرایط واقعی محیط انطباقی نخواهد داشت و صرفاً جهت برداشت کامل انعکاس‌ها و بازگشت امواج و ... این شرایط مرزی در این مدل در نظر گرفته شده است. نتایج توزیع امواج فشاری سیال در درون هوای تونل به واسطه انفجار در دهانه ورودی تونل در شکل (۱۷) نشان داده شده است. مقادیر فشار با گذر زمان همانند مدل‌های قبل با کاهش موج می‌شود. امواج با رسیدن به انحراف نیز دچار افت فشار شده و بنابراین موج وارد شده به بخش خروجی دچار افت در فشار می‌شود از سوی دیگر موج وارده به بخش بن‌بست با فشار به دیواره بن‌بست برخورد کرده و دوباره با فشاری مضاعف وارد محدوده انحراف می‌شود و بنابراین بخشی از موج بازگشتی نیز وارد بخش خروجی اصلی می‌شود.

د: مقایسه اضافه فشار در حالت‌های مختلف با حالتی که هیچ تغییر مقطع عرضی وجود نداشته باشد.



شکل (۱۰): پلان در صورتی که در طول مسیر هیچ اتاقکی وجود نداشته باشد



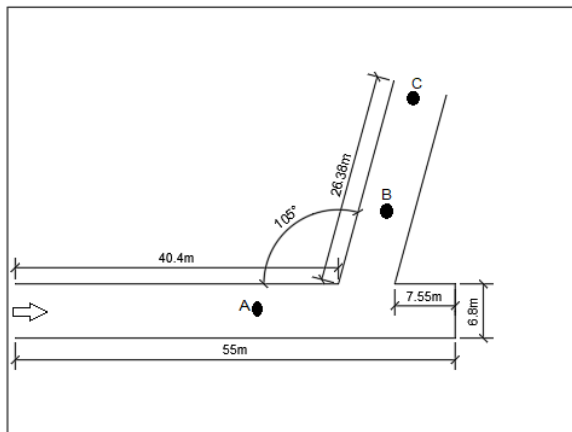
شکل (۱۱): نمودار فشار - زمان حالت‌های مختلف اتاق در مسیر تونل

همان‌طور که مشاهده می‌شود هر مقدار که اتاقک از دهانه ورودی تونل فاصله می‌گیرد مقدار اضافه فشار اندازه‌گیری شده در انتهای تونل روند کاهشی خواهد داشت و اما نکته قابل توجه در این نمودار مقدار کاهش شدید اضافه فشار حالتی که اتاقک در مسیر وجود داشته باشد نسبت به حالتی است که اتاقک در مسیر وجود نداشته باشد و هم‌چنین زمان رسیدن موج که با فاصله گرفتن اتاقک از دهانه ورودی تونل کاهش می‌یابد.

در مورد کاهش اضافه فشار در طول تونل که در شکل (۱۱) مشخص است کمترین اضافه فشار و کمترین زمان رسیدن موج مربوط به حالتی است که اتاقک در انتهای تونل قرار دارد زیرا در ابتدا امواج به سرعت مسیر مستقیم را طی می‌کنند و زودتر به اتاقک رسیده اما برای حالتی که اتاقک در ابتدا قرار گرفته باشد موج در همان ابتدا مستهلک شده و بعد داخل تونل می‌شود و این استهلاک باعث می‌شود زمان رسیدن موج به موقعیت انتهای تونل افزایش پیدا کند.

نکته‌ای که در اینجا قابل ذکر است میزان حفاری در صورتی که اتاق در مسیر تونل قرار گرفته باشد تقریباً دو برابر میزان حفاری بدون هیچ‌گونه اتاقی در مسیر تونل است اما اگر بخواهید به صورت کمیته بیان کنید به صورت جدول (۲) است.

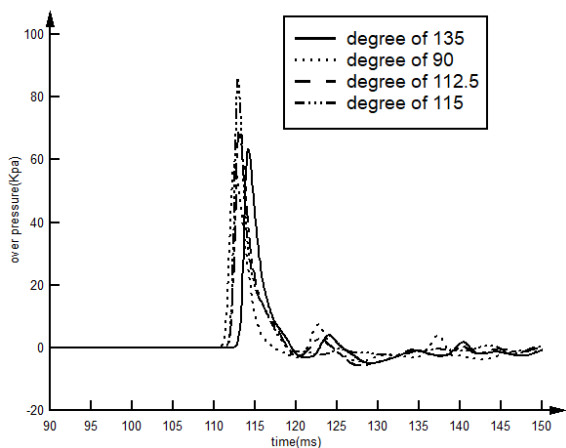
کرده و دوباره با فشاری مضاعف (بیک دوم نمودار) وارد شاخه انحرافی می‌شوند. همان‌طور که در شکل (۱۷) و جدول (۴) مشاهده می‌شود بیشترین کاهش فشار مربوط به خم ۹۰ درجه است و هر چه از زاویه انشعاب از محور اصلی ۹۰ درجه به سمت ۱۳۵ درجه افزایش پیدا می‌کند حداکثر اضافه فشار اندازه‌گیری شده در نقاط B و C افزایش می‌یابد.



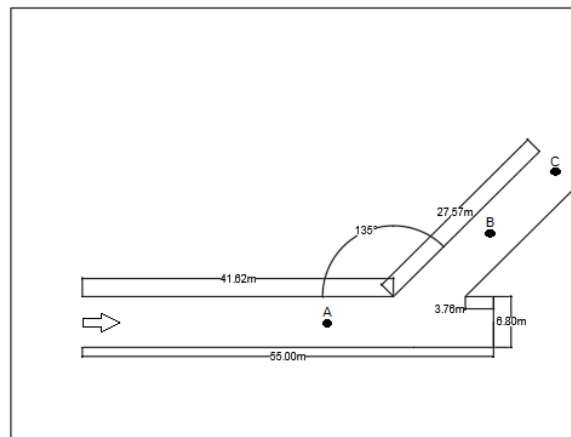
شکل (۱۵): زاویه انشعاب ۱۰۵ درجه از مسیر اصلی تونل و موقعیت گنج گذاری برای سه نقطه A، B و C

جدول (۴): مقایسه فشار برخوردی در نقاط A، B و C

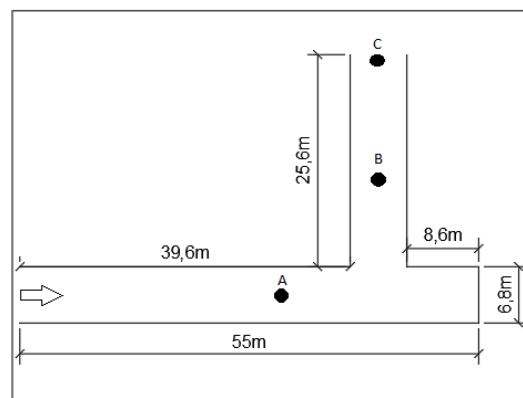
زاویه خم	Pc/Pa	Pb/Pa
۱۳۵	۰/۳	۰/۴۳
۱۱۲/۵	۰/۲۴	۰/۳۱
۱۰۵	۰/۲۲	۰/۲۷
۹۰	۰/۲	۰/۲۳



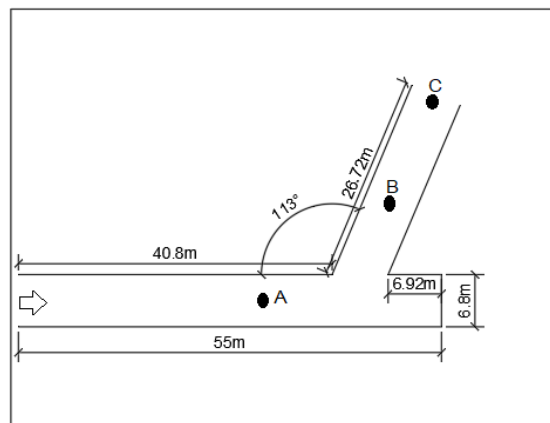
شکل (۱۶): مقایسه اضافه فشار و ایمپالس با زاویه خم مختلف در نقطه C



شکل (۱۲): زاویه انشعاب ۱۳۵ درجه از مسیر اصلی تونل گنج گذاری برای سه نقطه A، B و C



شکل (۱۳): زاویه انشعاب ۹۰ درجه از مسیر اصلی تونل گنج گذاری برای سه نقطه A، B و C



شکل (۱۴): زاویه انشعاب ۱۱۲/۵ درجه از مسیر اصلی تونل و موقعیت گنج گذاری برای سه نقطه A، B و C

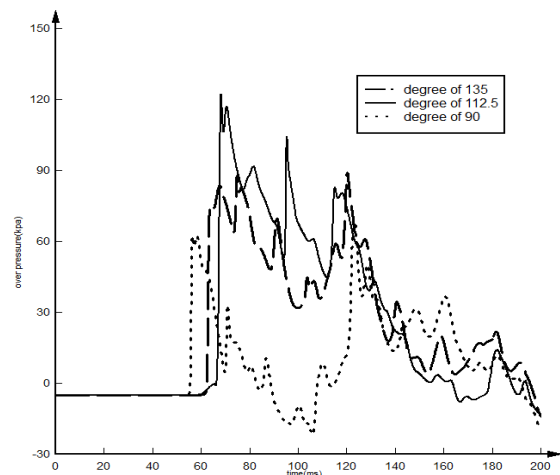
امواج ناشی از انفجار در ورودی تونل با رسیدن به انحراف دچار افت فشار شده زیرا مقداری موج منحرف شده و وارد انشعاب می‌شود. بقیه امواج نیز مسیر مستقیم را ادامه می‌دهند و وارد موج‌گیر می‌شوند که با فشار به دیواره انتهای بن‌بست برخورد

فاصله از دهانه تونل است به هر میزان این مقدار فاصله بیشتر شود اثر کاهندگی بر روی اضافه فشار نیز بیشتر می‌شود.

با کاهش زاویه ۱۳۵ درجه خم با راستای مستقیم تونل به زاویه ۹۰ درجه میزان کاهندگی اضافه فشار در داخل تونل بیشتر شده است و برای خم ۹۰ درجه بیشترین کاهش اضافه فشار مشاهده شد.

۷. منابع

۱. پیمان، صفا، طهماسب‌زاده، مهدی، بررسی تأثیر موج‌گیر در تونل با خم ۹۰ درجه بر کاهش فشار ناشی از انفجار خارج از تونل، نشریه علمی- پژوهشی علوم و فناوری های پدافند نوین، دوره ۶، شماره ۳، صص. ۲۰۱-۲۱۰، پاییز ۱۳۹۴.
2. L. Zhang and X. Yang, "Soil-tunnel Interaction under Medium Internal Blast Loading," *Procedia Engineering*, vol. 143, pp. 403-410, 2016.
3. E. A. Edvard Benggeli, "Blast Wave Propagation Inside Tunnel," 1986.
4. M. A. Price, "An Approach to Modeling Blast and Fragment Risks from Improvised Explosive Devices," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 50, pp. 715-731, 2017.
5. U. DoD, "Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects," UFC 3-340-01, US DoD, Washington, DC, USA, 2002.
6. J. Liu, Q. Yan, and J. Wu "Analysis of Blast Wave Propagation Inside Tunnel," *Transactions of Tianjin University*, vol. 14, no. 5, pp. 358-362, 2008.



شکل (۱۷): نمودار فشار - زمان در نقطه B

۶. نتیجه‌گیری

تغییر مقطع عرضی تونل در طول مستقیم تونل اثر کاهندگی قابل توجهی بر روی اضافه فشار در داخل تونل دارد طبق محاسبات و نمودارهای یاد شده بهترین مکان برای تغییر مقطع عرضی در انتهای تونل مستقیم است به طوری که برای اتاقک یاد شده در فصل قبل میزان اضافه فشار به ۶۹ درصد کاهش یافته است البته به دنبال آن میزان حفاری نیز دو برابر افزایش یافته است بنابراین بهترین مکان برای تغییر مقطع عرضی بیشترین

Investigation of the effects of two parameters of longitudinal axis rotation angle (bend) and local variation of tunnel cross section on reduction of pressure due to explosion at the tunnel opening

M. Amini*, M. R. Khorsandi, S. Peyman

Abstract

Explosions at the entrance of tunnels and underground spaces can lead to losses. To decrease side effects of such explosions, some approaches like dead_end, bends, geometric barriers and anti-explosion doors are available. Using geometric barriers, especially the waveguides, is the most commonly used and economical way. The purpose of this paper is to investigate the effect of the angle of rotation of the longitudinal axis (bend) and the local variation of the tunnel area on reducing the impact of explosions. Appropriate angle of rotation of the longitudinal axis and suitable location for local variation of the tunnel cross section in line with the tunnel are calculated, by numerical analysis, using Abaqus software. Finally, proper characteristics are used to propose a method, requiring the least drilling in construction (the most economical method), and generating the highest reduction in the effects of the explosion (the highest vulnerability reduction) in explosions near and away from the span. The results show that the localized change in the tunnel cross-section at the end of the direct path and the change in the angle of rotation of the long axis from 135 ° to 90 ° (90 °) will lead to the greatest reduction in pressure.

Key Words: *Over Pressure, Abaqus, Tunnel, Dead_End, Explosion*

* Imam Hossein Comprehensive University (amini.maz.59@gmail.com)- Writer-in-Charge

