

# نشریه علمی پدافند غیرعامل

سال دهم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۸، (پیاپی ۴۰): صص ۶۷-۵۷

## تحلیل و بررسی عددی انتشار موج انفجار درون تونل‌ها و محاسبه

### فشار وارد بر درب‌های ضد انفجار

صفا پیمان<sup>۱\*</sup>، علی احسان سیف<sup>۲</sup>، محمدحسین تقوی پارسا<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۱۶

#### چکیده

اغلب سازه‌های زیرزمینی تحت اثر بارهای ناشی از انفجار طراحی و بارگذاری می‌گردند. ورودی یا نقطه اتصال به سطح سازه‌های زیرزمینی از نقاط ضعف این سازه‌ها در برابر بارهای انفجاری است. بر این اساس، ورود انفجار به سازه زیرزمینی و اندازه‌گیری فشار آن در مقاطع مختلف، اهمیت کاربردی زیادی دارد. برای بررسی اثرات انفجار در داخل سازه‌های زیرزمینی، ابتدا باید پدیده انفجار در محیط باز مورد بررسی قرار گیرد و سپس درباره ورود و انتشار موج به درون سازه بحث شود. با محاسبه مقدار موج انتقالی به درون یک تونل، میزان کاهش فشار موج انفجار در طول تونل محاسبه می‌گردد. مقاله حاضر چگونگی انتشار موج در تقاطع تونل‌ها و نقاطی که راستای تونل تغییر می‌کند را مورد بررسی قرار می‌دهد. به این ترتیب، با مشخص شدن فشار موج انفجار در مقاطع مختلف تونل، فشاری که درب ضد انفجار در مکان مورد نظر باید برای آن طراحی شود، به دست می‌آید. همچنین با استفاده از روابط تحلیلی و شبیه‌سازی عددی، بیشینه فشار موج انتقالی انفجار در داخل تونل محاسبه گردیده است. در نهایت با استفاده از نتایج این تحقیق می‌توان فشار وارد به درب مقاوم در برابر انفجار داخل سازه زیرزمینی را تعیین نمود.

**کلیدواژه‌ها:** تونل زیرزمینی، پرتابه نفوذی، انتشار موج، بارگذاری انفجاری، درب مقاوم در برابر انفجار

۱- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع) (speyman@ihu.ac.ir) - نویسنده مسئول

۲- مربی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

۳- دکتری سازه، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

## ۱. مقدمه

امروزه اغلب تونل‌های زیرزمینی با اهداف دفاعی و برای محافظت از تأسیسات مهم نظامی و غیرنظامی در برابر آثار سلاح‌های نفوذکننده و دقیق دشمن احداث می‌شوند. مجموعه‌های زیرزمینی جزو 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 زیرزمینی دفاعی از نقاط ضعف این سازه‌ها در برابر بارهای انفجاری است [۱]. تعدد ورودی‌ها و خروجی‌ها، استفاده مناسب از طبیعت، استفاده از موج‌گیرها و طراحی درب‌های مقاوم در برابر انفجار راه کارهای مؤثر و مناسب برای افزایش ایمنی ورودی سازه‌های زیرزمینی دفاعی می‌باشند [۱]. محاسبه بارهای وارد بر درب‌های مقاوم در برابر انفجار، نیازمند شناخت فرایند انتشار موج در سطح آزاد، درون تونل‌های زیرزمینی، تقاطع‌های مسیرها و موجگیرها است. امواج انفجاری می‌توانند از طریق ورودی‌ها و بازشوها به درون سازه‌ها نفوذ کنند. نفوذ و انتشار امواج به درون ساختمان‌ها به‌خصوص به درون سازه‌های زیرزمینی دفاعی مانند تونل‌ها و پناهگاه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است، و می‌تواند عملکرد آنها را تحت الشعاع خود قرار دهد.

انتشار امواج انفجاری توسط پژوهشگران زیادی مورد بررسی قرار گرفته است. در رابطه با انفجار در هوای آزاد، رابطه‌هایی برای محاسبه بیشینه فشار انفجار بر مبنای فاصله و زمان، ارائه شده است. به‌عنوان نمونه می‌توان به روابط بروود [۲]، بیکر [۳] و هنریچ [۴] اشاره نمود. رابطه‌های مزبور در عین ساده بودن دارای دقت خوبی نیز می‌باشند. خاطر نشان می‌سازد، آیین‌نامه TM5-1300 ایالات متحده آمریکا، که مرجع مناسبی برای محاسبه بیشینه فشار ناشی از انفجار در سطح و بررسی آثار انفجار بر سازه‌ها است، رابطه‌های بروود و هنریچ را برای محاسبه بیشینه فشار انفجار پیشنهاد نموده است [۵]. 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 توسط چانگ و یانگ مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۶].

انتشار موج ناشی از انفجار درون سازه‌های زیرزمینی از پیچیدگی بیشتری نسبت به انفجار در هوای آزاد برخوردار است. بر مبنای کارهای پژوهشی تجربی و عددی رابطه‌هایی برای محاسبه کاهش فشار موج انفجار درون تونل‌ها ارائه شده است [۷]. در میان این روابط، رابطه‌های هنریچ [۴] و گیورک و گلوک [۸] 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 به‌دست می‌آید. خاطر نشان می‌سازد، با توجه به زاویه راستای انتشار موج انفجاری با راستای تونل، میزان فشار ورودی دهانه تونل محاسبه می‌شود [۹].

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 [۹]. 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 پیشین و انجام آزمایش‌های جدید، کریستوفرسون در سال ۱۹۴۶ گزارشی را درباره انتشار موج در تقاطع‌ها انتشار داد [۹]. این گزارش علمی هنوز هم یکی از مراجع اساسی در زمینه انتشار موج ناشی از انفجار در تقاطع‌ها و موج‌گیرها است.

علاوه بر محاسبه فشار بیشینه، لازم است ضربه ناشی از انفجار نیز برای انجام تحلیل دینامیکی محاسبه شود. بریت با انجام آزمایش‌های تجربی و مبانی نظری رابطه‌هایی را برای محاسبه ضربه ناشی از موج انفجار درون تونل‌های زیرزمینی ارائه نمود [۱۰].

برای انجام محاسبات مربوط به انتشار و اثر موج انفجار درون سازه‌های زیرزمینی لازم است، از رابطه‌ها و نمودارهای ارائه شده در کنار یکدیگر استفاده شود. بر این اساس، تدوین فرایند کامل طی این مسیر از اهمیت کاربردی زیادی برخوردار است.

در این پژوهش، ضمن بررسی رابطه‌ها و نمودارهای تجربی موجود و مقایسه پاسخ‌های به‌دست‌آمده از آنها با حل عددی نرم‌افزار AUTODYN، مقدار فشار در نقاط مختلف تونل‌های زیرزمینی دارای موج‌گیر محاسبه می‌گردد. با توجه به این فشار، ضربه و بار دینامیکی وارد بر درب مقاوم در برابر انفجار، محاسبه می‌شود. باید دانست، طراحی درب‌های مقاوم در برابر انفجار بر مبنای فشار دینامیکی محاسبه شده صورت می‌پذیرد. به این ترتیب، فرایند ساده شده و گام به گام انتشار موج انفجار درون سازه‌های زیرزمینی تدوین می‌شود.

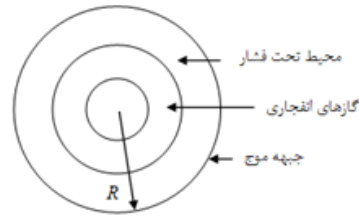
## ۲. شناخت و بررسی امواج انفجار

همان‌گونه که در شکل (۱) دیده می‌شود، در اثر انفجار ناشی از یک خرج کروی در هوای آزاد، امواجی با فشار و سرعت زیاد به شکل کروی تولید و در محیط اطراف منتشر می‌شوند. با گذشت زمان هر قدر که شعاع کره و به تبع آن حجم محیط متأثر از امواج بیشتر می‌شود، فشار و سرعت موج ناشی از انفجار به شدت کاهش می‌یابد.

در این رابطه‌ها،  $P_s$  اضافه فشار دینامیکی و  $Z$  فاصله مقیاس شده است، که از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$Z = R \cdot \left( \frac{1Kg}{W} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (۳)$$

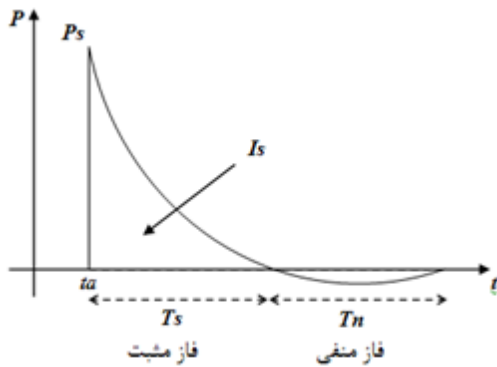
در رابطه (۳)،  $W$  وزن TNT معادل ماده انفجاری مورد نظر یا قدرت انفجار و  $R$  فاصله نقطه مورد بررسی تا مرکز انفجار است.



شکل (۱): انتشار انفجار در محیط اطراف

## ۲-۲- محاسبه ضربه موج انفجار

در شکل (۲) پروفیل فشار زمان ناشی از موج انفجار برای یک موضع خاص نشان داده شده است. دیده می‌شود، منحنی فشار زمان دارای دو فاز متفاوت مثبت و منفی است. در لحظه  $t_a$  جبهه موج به موضع مورد نظر رسیده و فشار آن را به اندازه  $P_s$  افزایش می‌دهد. با گذشت زمان و عبور جبهه موج، طی زمان  $T_s$  فشار افت کرده و به صفر می‌رسد. مدت زمان  $T_s$  را زمان تداوم فاز مثبت می‌نامند. به دلیل افزایش حجم محیط انفجار، در داخل آن فشار منفی ایجاد شده و موجب بروز فاز منفی در پروفیل فشار می‌شود.



شکل (۲): انتشار انفجار در محیط اطراف [۷]

با توجه به این که زمان انفجار بسیار کوتاه است. بار دینامیکی حاصل از انفجار ماهیت ضربه‌ی دارد. بر این اساس، مساحت زیر منحنی فشار- زمان، بیان‌کننده میزان ضربه ناشی از انفجار است. خاطر نشان می‌سازد، در محاسبه ضربه از اثر فاز منفی صرف‌نظر می‌گردد. همان‌طور که دیده می‌شود، ضربه تابعی از زمان تداوم موج و حداکثر مقدار فشار در نقطه مورد بررسی است.

در شکل (۳) مقدار ضربه برحسب فاصله از نقطه انفجار داده شده است. ضربه و فشار دو پارامتر اساسی در طراحی دینامیکی سازه‌ها تحت انفجار می‌باشند. از سوی دیگر، همان‌گونه که پیش از این گفته شد، زمان تداوم و حداکثر اضافه فشار تابعی از قدرت انفجار و فاصله از محل انفجار می‌باشند. بر این اساس، می‌توان مقدار ضربه را به‌طور مستقیم بر حسب مقدار حداکثر اضافه فشار

## ۲-۱- اضافه فشار

به فشار ناشی از موج انفجار در هر نقطه از محیط اطراف انفجار که مقدار آن با وزن ماده منفجره رابطه مستقیم و با فاصله از مرکز انفجار رابطه معکوس دارد، اضافه فشار می‌گویند. محاسبه اندازه این فشار و تغییرات آن در طی زمان از اهمیت کاربردی زیادی برخوردار است.

با توجه به پیچیده بودن پدیده انفجار، معمولاً رابطه‌های ارائه شده برای محاسبه اضافه فشار یا فشار ناشی از انفجار، ترکیبی از روابط تئوری و نتایج آزمایشگاهی است. در قرن نوزده میلادی آزمایش‌های گسترده‌ای درباره بررسی پدیده انفجار و آثار آن بر سازه‌ها و تأسیسات نزدیک به محل انفجار توسط پژوهشگران انجام شده است [۷]. بر مبنای نتایج حاصل از این آزمایش‌های نظریه‌های حاکم بر انتشار موج، روابط مختلفی برای محاسبه اندازه اضافه فشار ناشی از انفجار ارائه شده است [۱۲-۱۱]. در ادامه دو رابطه‌ای که ارزش کاربردی بیشتری دارند، و توسط آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های طراحی سازه‌ها در برابر انفجار نیز پذیرفته شده‌اند، برای محاسبه اضافه فشار آورده می‌شوند [۵ و ۱۳].

در سال ۱۹۵۵ برود، با توجه به اندازه فشار در هر نقطه، رابطه‌ای دو ضابطه‌ای را برای محاسبه اضافه فشار دینامیکی انفجار در فاصله‌های نزدیک و دور از محل انفجار ارائه نمود [۲].

$$\begin{cases} P_s = \frac{6.7}{Z^3} + 1 & P_s > 10 \text{ bar} \\ P_s = \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019 & P_s < 10 \text{ bar} \end{cases} \quad (۱)$$

هنریچ بر مبنای مطالعات نظری و آزمایشگاهی رابطه‌ای سه ضابطه‌ای را برای محاسبه اضافه فشار ناشی از انفجار ارائه نمود [۴]:

$$\begin{cases} P_s = \frac{14.072}{Z} + \frac{5.540}{Z^2} - \frac{0.357}{Z^3} + \frac{0.00625}{Z^4} \text{ bar} & 0.05 \leq z \leq 0.3 \\ P_s = \frac{6.194}{Z} + \frac{0.326}{Z^2} + \frac{2.132}{Z^3} \text{ bar} & 0.3 \leq z \leq 1 \\ P_s = \frac{0.662}{Z} + \frac{4.05}{Z^2} + \frac{3.288}{Z^3} \text{ bar} & 1 \leq z \leq 10 \end{cases} \quad (۲)$$

نمودار شکل (۴) معلوم می‌شود. اگر  $W_1$  برابر یک کیلوگرم TNT در نظر گرفته شود، رابطه (۴) را می‌توان به شکل زیر بازنویسی نمود:

$$\frac{I}{I_s} = \left( \frac{W}{1kg} \right)^{1/3} \quad (5)$$

$$I = I_s \cdot W^{1/3}$$

### ۳. بررسی انتشار و فشار موج انفجار در تونل

برای بررسی اثرات انفجار می‌باید گام به گام همراه موج حرکت کرده و اثرات آن را بررسی نمود. گام‌های بررسی اثر انفجار درون سازه‌های زیرزمینی به صورت زیر می‌باشند:

- انتشار موج از نقطه انفجار تا دهانه تونل
- انتشار موج در دهانه تونل
- انتشار موج در طول تونل
- انتشار موج در محل تقاطع

در هر یک از مراحل بالا، پارامترهای موج دستخوش تغییراتی خواهند شد، که در ادامه مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. در همه این مراحل، نخستین و در برخی تنها پارامتری که مورد بررسی قرار می‌گیرد، اضافه فشار  $P_s$  است. چراکه مطابق مطالب پیشین، سایر پارامترهای موج رابطه مشخصی با  $P_s$  دارند.

#### ۳-۱. انتشار موج از نقطه انفجار تا دهانه تونل

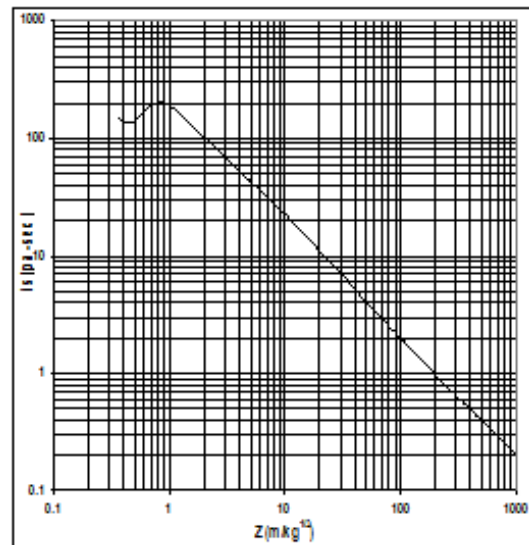
همچنان که موج در هوا منتشر می‌شود، به دلیل افزایش حجم، فشار آن به شدت کاهش می‌یابد. با کمک روابط (۱) و (۲) می‌توان مقدار اضافه فشار  $P_s$  را در فواصل دلخواه از محل انفجار و به طور خاص در محل دهانه تونل به دست آورد.

#### ۳-۲. انتشار موج در دهانه تونل

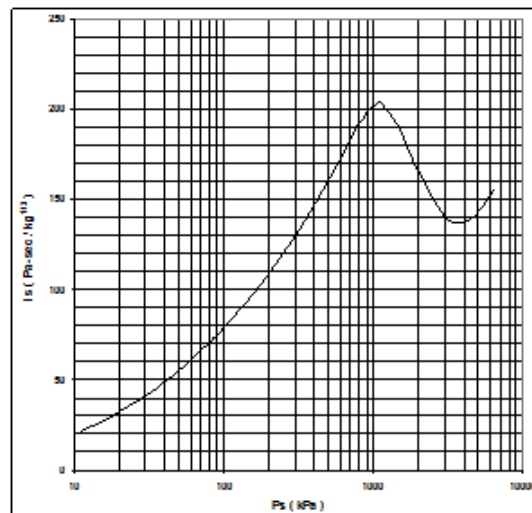
هنگامی که امواج ناشی از انفجار به دهانه تونل می‌رسند، بسته به زاویه انتشار با امتداد ورودی تونل، بخشی از آن وارد تونل می‌شود. اضافه فشار وارد شده همواره ضریبی از اضافه فشار در دهانه تونل است. در مورد موقعیت نقطه انفجار نسبت به دهانه تونل دو فرض مختلف را می‌توان در نظر گرفت [۱۳]. فرض اول حالتی است که مانند شکل (۵) انفجار با فاصله مشخصی از دهانه تونل و روبروی آن اتفاق بیافتد. به عبارت دیگر، راستای انتشار موج انفجار و راستای ورودی تونل در یک امتداد قرار دارند. در این حالت مقدار فشار اعمالی به دهانه تونل بزرگتر از فشار جبهه موج در محل دهانه تونل خواهد بود. فرض صورت گرفته نسبت به حالتی که راستای انفجار و ورودی تونل در یک امتداد نباشند،

به دست آورد. برای ساده نمودن فرایند محاسبه مقدار ضربه شکل (۴) رسم شده است، که در آن می‌توان برای یک کیلوگرم TNT به ازای هر مقدار اضافه فشار، ضربه متناظر با آن را به دست آورد. خاطر نشان می‌سازد، همان گونه که در محاسبه اضافه فشار از فاصله مقیاس شده استفاده می‌شود، می‌توان قانون مقیاس را به صورت زیر برای ضربه نیز تعریف نمود:

$$\frac{I_2}{I_1} = \left( \frac{W_2}{W_1} \right)^{1/3} \quad (4)$$



شکل (۳): مقدار ضربه بر حسب فاصله مقیاس شده [۱] (ترسیم مجدد)



شکل (۴): ضربه بر حسب مقدار اضافه فشار برای یک کیلوگرم TNT

این رابطه نشان می‌دهد، که اگر ضربه ناشی از ماده منفجره با قدرت انفجاری  $W_1$  مشخص باشد، می‌توان ضربه متناظر با قدرت انفجاری  $W_2$  را به دست آورد. به این ترتیب، ارزش کاربردی

### ۳-۳. انتشار موج در طول تونل

بخشی از موج که وارد تونل می‌شود، در طول تونل حرکت کرده و فشار آن رفته‌رفته کم می‌شود. مقدار و نحوه محاسبه فشار موج انتشاری در طول تونل با حالت انتشار در هوای باز کاملاً متفاوت است. به دلیل محصور شدن موج در داخل تونل، انتشار و انبساط آن تنها می‌تواند در یک راستا صورت گیرد. از سوی دیگر، به دلیل انعکاس‌های متوالی موج با جداره تونل، انتشار آن در داخل تونل به شکل حلقوی خواهد بود. لذا افت فشار در داخل تونل نسبت به هوای آزاد کمتر بوده و موج انفجار می‌تواند، مسیر بیشتری را با افت فشار کمتر طی نماید.

بر مبنای کارهای تجربی و عددی رابطه‌هایی برای محاسبه کاهش فشار موج انفجار درون تونل‌ها ارائه شده است. بیشتر آزمایش‌هایی که درباره انتشار موج انفجار در امتداد تونل‌های مستقیم تا سال ۱۹۶۰ انجام شده است، در مرکز تحقیقات بالستیک ایالات متحده آمریکا صورت گرفته است. در سال ۱۹۸۵ نتایج آزمایش‌های انجام شده با استفاده از بمب‌های دارای ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT که در آمریکا انجام شده بود، توسط بریت ارائه شد [۱۰]. این آزمایش‌های برای به‌دست آوردن رابطه‌هایی برای طراحی سازه‌های زیرزمینی در برابر انفجار انجام شدند. بیش از ۹۹ درصد این آزمون‌ها با استفاده از ماده انفجاری C-4 استوانه‌ای شکل، در ورودی و درون تونل‌های دایره‌ای و مربعی انجام شده‌اند. انفجارها به دو صورت انفجار در دهانه تونل و در کنار دهانه تونل انجام شده‌اند. علاوه‌بر این، آزمایش‌های در مقیاس بزرگتری نیز توسط ایزنر و آنت در کشور آلمان انجام گرفته است [۱۴]. در سال ۱۹۸۰ گیورک و گلوک نتایج آزمایش‌های انجام شده در کشورهای آمریکا، آلمان و دیگران را به‌صورت رابطه‌ای برای محاسبه اضافه فشار در امتداد تونل ارائه نمودند [۸]. این رابطه که دارای دقت و اهمیت کاربردی بالایی است، در ادامه می‌آید [۷-۸].

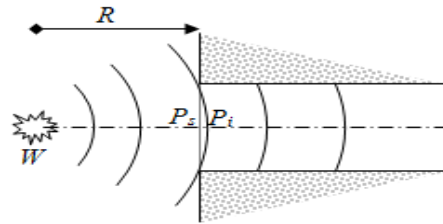
$$P_x = \frac{P_i}{1 + \tan \left[ \left( \frac{\bar{X}}{\bar{X} + E} \right) \left( \frac{\pi}{2} \right) \right]} \quad (6)$$

در این رابطه  $E$  و  $X$  به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$E = 0.586 \left( \frac{W^{2/3}}{A} \right) \left( \frac{P_a}{P_i} \right)^{0.4} \quad (7)$$

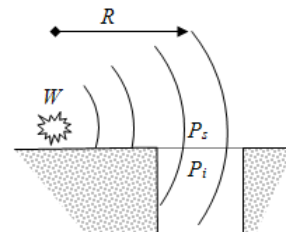
$$\bar{X} = \frac{x}{A^{1/2}}$$

بحرانی‌تر بوده و از اهمیت بیشتری برخوردار است.



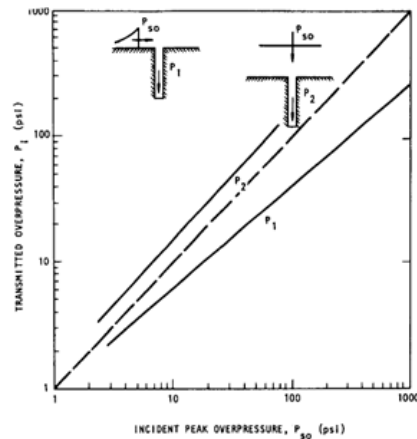
شکل (۵): انفجار در نزدیکی دهانه و در راستای امتداد تونل

فرض دیگر آن است که راستای انتشار موج انفجار مانند آنچه در شکل (۶) نشان داده شده است، عمود بر امتداد تونل باشد. در این حالت دهانه تونل امواج را به‌طور جانبی دریافت می‌کند و مقدار فشار اعمالی به دهانه تونل کمتر از فشار جبهه موج در محل دهانه تونل است. به عنوان نمونه، چنین شرایطی در مورد شفت‌های قائم، وقتی که انفجار در سطح زمین با فاصله‌ای از دهانه شفت، رخ دهد، برقرار است.

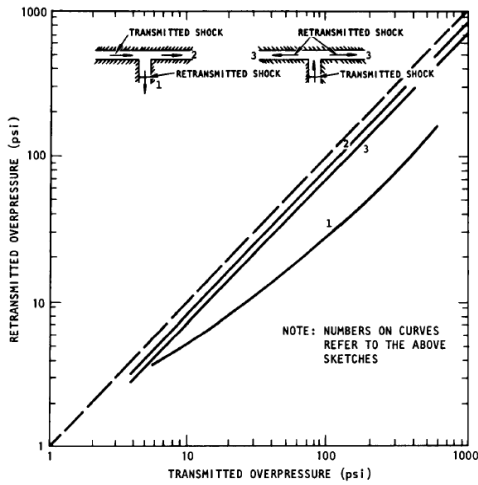


شکل (۶): انفجار در نزدیکی دهانه و در راستای عمود بر امتداد تونل

نمودارهای ارائه شده در شکل (۷) که توسط آیین‌نامه طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار هسته‌ای آمریکا ASCE ارائه شده است [۱۳]. در این دستورالعمل مقدار فشار وارد بر دهانه تونل بر اساس هریک از فرض‌های بالا، برحسب اضافه فشار جبهه موج در محل دهانه تونل به‌دست می‌آید.

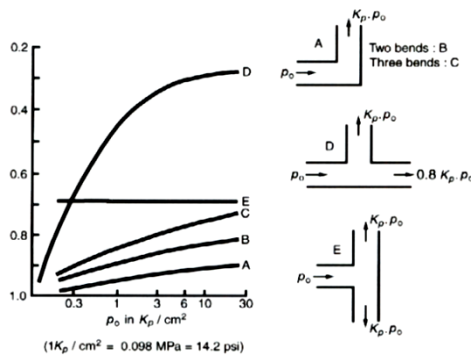


شکل (۷): فشار ورودی به دهانه تونل بر حسب فشار دهانه تونل [۱۳]



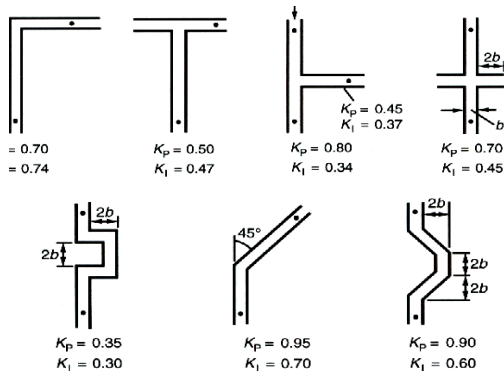
شکل (۹): مقدار فشار انتقالی در تقاطع T شکل [۱۳]

در شکل‌های (۱۱-۱۰)، مقادیر موج انتشاری به هر قسمت بر اساس موج ورودی به تقاطع برای چند حالت مختلف ارائه شده است.



شکل (۱۰): مقدار فشار انتقالی در تقاطع T شکل [۹]

مطابق شکل (۱۰)، اگر فشار ورودی به تقاطع  $P_0$  باشد، فشار انتقالی به هر شاخه از ضرب  $K_p$  در  $P_0$  به دست می‌آید.  $K_p$  ضریب انتقال فشار در تقاطع است. از سوی دیگر، مطابق شکل (۱۱) اگر  $I_0$  ضربه ورودی به تقاطع تونل باشد، با ضرب  $K_I$  در  $I_0$  ضربه انتقالی به هر شاخه به دست می‌آید. در اینجا نیز  $K_I$  ضریب انتقال ضربه در تقاطع است.



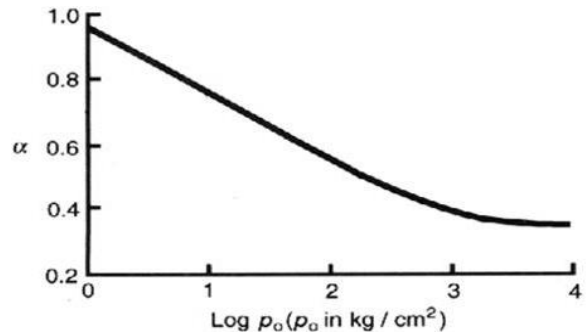
شکل (۱۱): فشار و ضربه انتقالی در اشکال مختلف تقاطع و زانو [۹]

که در آن،  $A$  سطح مقطع تونل برحسب مترمربع،  $X$  فاصله از دهانه تونل و  $W$  قدرت انفجار بر حسب کیلوگرم TNT معادل است. از سوی دیگر،  $P_a$  فشار اتمسفر و  $P_i$  فشار محاسبه شده در داخل دهانه تونل است. علاوه بر این، هنریچ آزمایش‌هایی را درباره کاهش فشار منتشر شده در داخل لوله‌های استوانه‌ای با زبری سطح متفاوت انجام داد. در این آزمایش‌ها نشان داده شده که اضافه فشار اندازه‌گیری شده در دهانه تونل هنگام حرکت درون خطوط لوله، به صورت تابعی نمایی نسبت به فاصله کاهش می‌یابد. او با توجه به این موضوع، و نتایج ارائه شده در پژوهش‌های صورت گرفته توسط خودش و دیگران رابطه زیر را برای محاسبه اضافه فشار در دهانه تونل ارائه نمود [۴].

$$P_x = \left( \frac{\alpha R}{\alpha R + X} \right) P_s e^{-0.4 \left( \frac{X}{r} \right) f} \quad (۸)$$

$$f = \left[ 2 \log \frac{r}{2h} + 1.74 \right]^{-2}$$

در این رابطه،  $h$  ضریب وابسته به زبری سطح،  $X$  فاصله از دهانه تونل،  $r$  شعاع تونل،  $R$  فاصله مرکز انفجار از دهانه تونل (شکل ۵) و  $\alpha$  بر حسب  $P_s$  است، که با استفاده از نمودار نشان داده شده در شکل (۸) به دست می‌آید.



شکل (۸): پارامتر  $\alpha$  بر حسب فشار [۳]

در رابطه هنریچ علاوه بر پارامتر  $X$  (فاصله از ورودی تونل)، متغیر  $R$  نیز به منظور وارد کردن اثرات فاصله محل انفجار از ورودی تونل بر افت فشار وارد کردن اثرات فاصله محل انفجار از ورودی تونل بر افت فشار وارد معادله شده است. لذا در رابطه هنریچ، مقدار اضافه فشار خارج از دهانه  $P_s$  قرار داده می‌شود. در حالی که رابطه گیورک و گلوک برحسب اضافه فشار داخل دهانه تونل  $P_i$  است.

### ۳-۴. انتشار موج در محل تقاطع

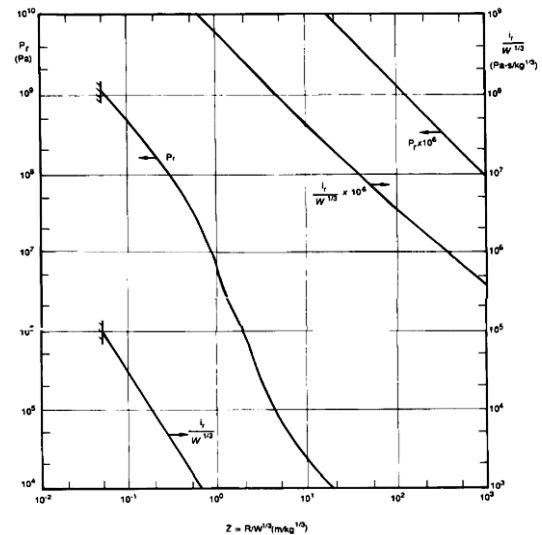
در این بخش انتشار موج انفجار هنگامی که به دوراهی یا چند راهی می‌رسد بررسی می‌شود. در شکل (۹) مقادیر موج انتشاری به هر قسمت بر اساس موج ورودی به تقاطع ۹۰ درجه ارائه شده است.

#### ۴. محاسبه فشار اعمالی به درب ضد انفجار

با برخورد امواج به جسمی که بر سر راه آن قرار دارد، موج انفجار منعکس می‌شود. به علت برگشت موج از سطح جسم و در نتیجه تغییرات مومنتوم، فشاری به سطح وارد می‌شود که بیشتر از فشار قبل از برخورد است. فشار انعکاسی  $P_r$  از رابطه زیر برحسب فشار قبل از برخورد به دست می‌آید [۹]:

$$P_r = 2P_s \left[ \frac{7P_a + 4P_s}{7P_a + P_s} \right] \quad (9)$$

که در آن،  $P_s$  فشار قبل از برخورد و  $P_a$  فشار اتمسفر و برابر ۱ بار است. طبق رابطه بالا بسته به مقدار  $P_s$ ، فشار انعکاسی می‌تواند بین ۲ تا ۸ برابر  $P_s$  باشد. در مورد امواجی که به داخل تونل راه می‌یابند نیز، فشار اعمالی به درپوش از رابطه (۹) به دست می‌آید. در شکل (۱۲) فشار و ضربه انعکاسی بر حسب فاصله مقیاس شده داده شده است.



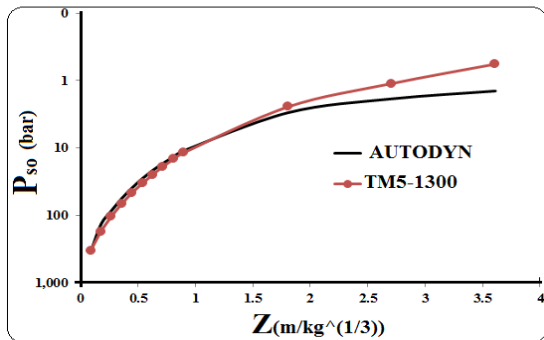
شکل (۱۲): فشار و ضربه انعکاسی بر حسب فاصله مقیاس شده [۴]

حل عددی با نتایج گراف‌های آیین‌نامه [۵] TM 5-1300 مقایسه شده است.  $P_{so}$  بیشینه فشار و  $Z$  فاصله مقیاس شده است که از رابطه (۱۰)،  $[۵]$  به دست می‌آید.

$$Z = R \cdot \left( \frac{1Kg}{W} \right)^{1/3} \quad (10)$$

جدول (۱): مقایسه بیشینه فشار روش عددی با آیین‌نامه 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



شکل (۱۳): مقایسه بیشینه فشار حاصل از روش عددی با آیین‌نامه TM5-1300

با توجه به نتایج شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، بیشینه فشار عددی به دست آمده در هوای آزاد هر چه به محل انفجار نزدیک‌تر باشد، تطابق خوبی با نتایج آیین‌نامه TM 5-1300 دارد.

#### ۳-۵. مدل‌سازی عددی

در این قسمت، برای بررسی نحوه استفاده از رابطه‌ها و شکل‌های

#### ۵. مدل‌سازی عددی انتشار موج انفجار درون تونل

##### ۱-۵. صحت‌سنجی شبیه‌سازی

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

##### ۲-۵. انتشار موج انفجار در هوای آزاد

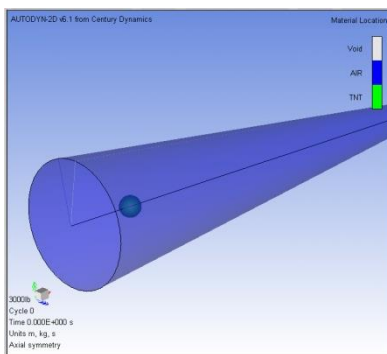
در جدول (۱) و شکل (۲)، بیشینه فشار در فواصل مختلف از محل انفجار ۱۳۶۰ کیلوگرم TNT در هوای آزاد به دست آمده از

**جدول (۳):** بیشینه فشار ناشی از انفجار در فاصله ۱۰ متری دهانه تونل در فواصل مختلف از ورودی تونل (bar)

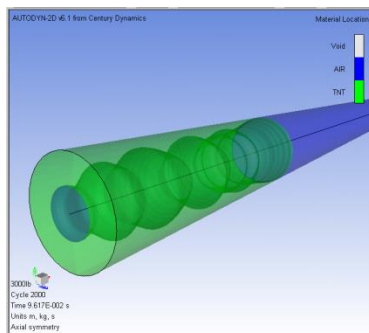
فاصله (متر)	بیشینه فشار رابطه ۶	بیشینه فشار رابطه ۸
۲۵	۲/۷۸	۳/۱۸۱
۵۰	۱/۶۴	۱/۶۹
۷۵	۱/۱۷	۱/۱۱
۱۰۰	۰/۹۱	۱/۸۰
۱۲۵	۰/۷۴۵	۰/۶
۱۴۵	۰/۶۵۱	۰/۵

مشاهده می‌شود. پاسخ‌های به‌دست‌آمده با رابطه‌های مزبور برای این حالت از تطابق مناسب‌تری برخوردار می‌باشند.

در ادامه شبیه‌سازی انفجاری که در فاصله یک متری از دهانه تونل رخ می‌دهد، با استفاده از نرم‌افزار غیرخطی و توانمند AUTODYN [۱۵] انجام می‌شود و پاسخ‌های به‌دست‌آمده با روابط تجربی مقایسه می‌شوند. همان‌گونه که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود، در این مدل‌سازی تونل به شکل استوانه و ماده منفجره به شکل کره می‌شود. برای اعمال شرایط مرزی حاکم بر مسئله سطوح باز با شرایط مرزی جریان آزاد مشخص و سطح داخل تونل به‌صورت سطوح صلب در نظر گرفته می‌شوند. با انفجار ماده منفجره، جریانی پرفشار وارد تونل شده طول آن را طی می‌نماید. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهند، که به دلیل برخورد و انعکاس‌های متوالی موج از جداره تونل، انتشار آن در داخل تونل به شکل حلقوی خواهد بود (شکل ۱۵).



شکل (۱۴): مدل‌سازی تونل و ماده منفجره



شکل (۱۵): انتشار حلقوی موج انفجار داخل تونل

مربوط به محاسبه اضافه فشار درون تونل‌ها یک مطالعه عددی انجام شده است.

فرض بر این است که؛ انفجاری ناشی از یک بمب ۳۰۰۰ پوندی (معادل ۱۳۶۰ کیلوگرم) با ماده منفجره از نوع TNT در فاصله ۱ متر از دهانه تونلی با سطح مقطع ۳۰ متر مربع (دایره با شعاع ۳/۰۹ متر) رخ می‌دهد. در ادامه بیشینه فشار ناشی از انفجار در فواصل مختلف مسیر مستقیم داخل تونل با استفاده‌های رابطه‌های تجربی ۶ و ۸ محاسبه می‌شود. تونل از جنس بتن با مدل رفتاری خطی و از نوع CON350 است.

برای محاسبه فشار در داخل تونل، ابتدا با استفاده از رابطه‌های ۳ و ۵ فشار در دهانه تونل محاسبه می‌شود. برای این منظور، مقدار فاصله مقیاس شده  $(m/kg^{1/3})$  به‌دست می‌آید. با داشتن فاصله مقیاس شده، اندازه فشار در دهانه ورودی تونل  $۴۴۵/۸۵$  بار محاسبه می‌شود. اکنون با استفاده از نمودار شکل (۷) مقدار فشار انتقالی به داخل تونل  $P_i$  تقریباً ۱/۵ برابر فشار دهانه و مساوی ۶۶۷ بار به‌دست می‌آید (فرض شده است که منحنی با شیب موجود امتداد یابد).

اکنون می‌توان در فاصله‌های متفاوت از دهانه تونل فشار انتقالی به مقطع را با استفاده از رابطه‌های تجربی به‌دست آورد. برای استفاده از رابطه هنریچ، ابتدا با استفاده از شکل (۸) مقدار  $\alpha$  برابر ۰/۴ به‌دست می‌آید. مقادیر به‌دست‌آمده از این رابطه‌ها در جدول (۲) آورده می‌شود.

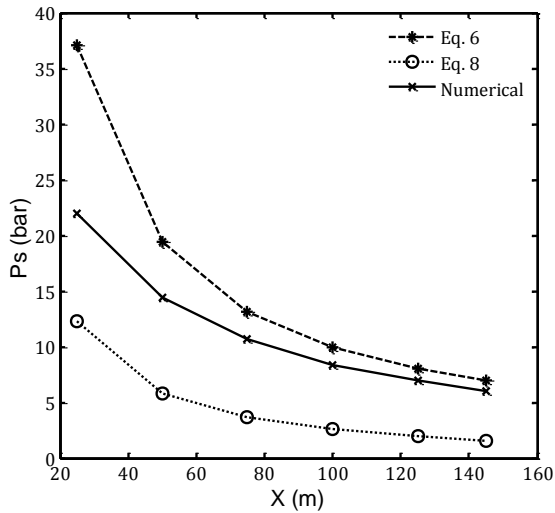
**جدول (۲):** بیشینه فشار ناشی از انفجار در دهانه تونل در فواصل مختلف از ورودی تونل (bar)

فاصله (متر)	بیشینه فشار رابطه ۶	بیشینه فشار رابطه ۸
۲۵	۳۷/۲۱	۱۲/۲۶
۵۰	۱۹/۴۵	۵/۸
۷۵	۱۳/۱۸	۳/۶۴
۱۰۰	۹/۹۶	۲/۵۶
۱۲۵	۸/۰۱	۱/۹۲
۱۴۵	۶/۹۳	۱/۵۷

مشاهده می‌شود، پاسخ‌های هردو رابطه با یکدیگر همخوانی خوبی را دارا نمی‌باشند. بررسی‌ها نشان می‌دهد، اگر فاصله از ورودی تونل بیشتر شود، همخوانی این دو رابطه مناسب‌تر خواهد شد. برای این منظور انفجار مورد نظر در فاصله ده متری دهانه تونل در نظر گرفته می‌شود. در ادامه محاسبات مربوط به این انفجار ارائه می‌گردد. در این حالت فاصله مقیاس شده برابر ۰/۹ و اندازه فشار در دهانه ورودی تونل ۹/۴ بار و همچنین با استفاده از نمودار شکل (۷) مقدار فشار انتقالی به داخل تونل  $P_i$  تقریباً ۱۴ بار به‌دست می‌آید. بیشینه فشار در فاصله‌های مختلف از دهانه تونل در جدول (۳) آمده است.



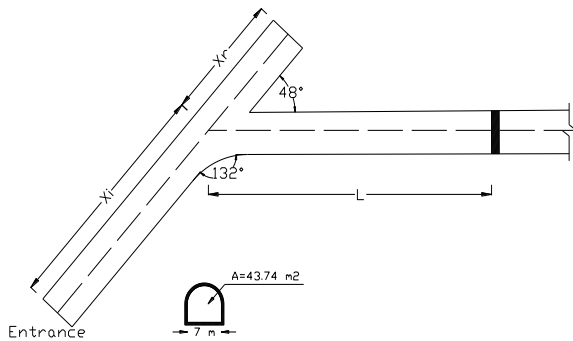
در شکل (۱۸) نتایج حل عددی با نتایج روش‌های تجربی مقایسه شده است. در این شکل محور افقی بیانگر فاصله از دهانه تونل و محور قائم بیانگر بیشینه فشار است. مشاهده می‌شود، پاسخ‌های روش عددی و روش گیورک و گلوک [۸] در فاصله‌های دورتر از ۵۰ متر از دهانه تونل به هم نزدیک می‌باشند. با توجه به دقت خوب مدلسازی‌های عددی بارگذاری انفجاری با استفاده از نرم‌افزار AUTODYN [۱۵]، می‌توان نتیجه گرفت، روش تجربی مزبور دارای دقت مناسبی است.



شکل (۱۸): مقایسه بیشینه فشار رابطه‌های تجربی با حل عددی

#### ۵-۴. بارگذاری درب مقاوم در برابر انفجار

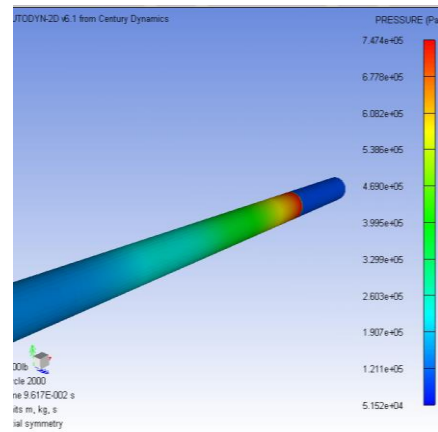
شمای کلی ورودی یک تونل مطابق شکل (۱۹) است. هدف، تعیین طول موجگیر  $X_r$  و محاسبه فشار اعمالی به درب ضد انفجار در فاصله  $L$  از تقاطع ورودی با توجه به طول  $X_i$  است. قدرت انفجار طرح، معادل ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT است، که در فاصله ۱ متری دهانه تونل رخ می‌دهد. دهانه تونل به عرض ۷ متر و مساحت مقطع آن  $43/74$  مترمربع است. تغییر راستای ورودی تونل در تقاطع با موجگیر برابر  $48$  درجه است.



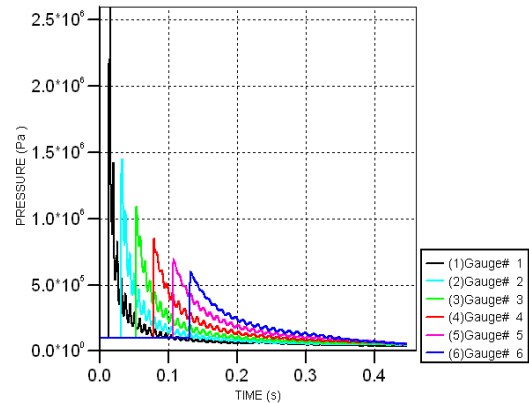
شکل (۱۹): ورودی دارای موجگیر یک تونل دفاعی

موج انفجار با ورود به داخل تونل، هوای داخل تونل را با فشار زیاد مانند پیستون به جلو می‌راند. به همین دلیل بیشترین فشار در جبهه موج ایجاد خواهد شد (شکل ۱۶).

با قرار دادن گیج‌های اندازه‌گیری در فاصله‌های مختلف از ورودی تونل می‌توان فشار اعمالی در طول آن را بررسی نمود. در مدل حاضر گیج‌هایی با فواصل ۲۵ متر در طول تونل قرار گرفته است. نتایج ثبت شده توسط این گیج‌ها در شکل (۱۷) ارائه شده است.



شکل (۱۶): فشار بیشینه در جبهه موج



شکل (۱۷): فشار اندازه‌گیری شده توسط گیج‌های طول تونل

بیشینه فشار اندازه‌گیری شده منحنی‌های شکل (۱۶) به‌طور خلاصه در جدول (۴) آورده شده است.

جدول (۴): بیشینه مقدار فشار اندازه‌گیری شده در فاصله‌های مختلف از ورودی تونل با استفاده حل عددی

شماره گیج	فاصله از دهانه (متر)	بیشینه فشار
۱	۲۵	۲۲
۲	۵۰	۱۴/۴
۳	۷۵	۱۰/۷
۴	۱۰۰	۸/۴
۵	۱۲۵	۷
۶	۱۴۵	۶

ضد انفجار در نظر گرفته شود. چنانچه درب مورد نظر در شاخه اصلی و با فاصله از تقاطع ایجاد شود، موج ورودی به شاخه اصلی پس از طی این فاصله با درب برخورد کرده و اعمال فشار می‌کند. اگر درب ضد انفجار در فاصله ۱۰۰ متری از تقاطع نصب شود، فشار وارد بر آن از رابطه ۶ حدود،  $\frac{3}{41}$  بار به دست می‌آید.

به این ترتیب فرایند، محاسبه اضافه فشار در امتداد تونل، در تقاطع‌ها، موج‌گیرها و درب ضد انفجار تکمیل می‌شود. با استفاده از اضافه فشار مزبور می‌توان ضربه دینامیکی وارد بر سطوح در معرض آن را محاسبه نمود.

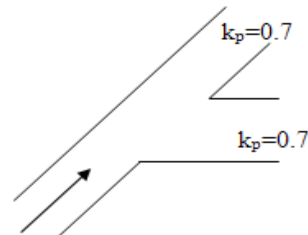
### ۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ضمن بررسی رابطه‌ها و نمودارهای تجربی موجود و مقایسه پاسخ‌های به دست آمده از آنها با حل عددی نرم افزار AUTODYN، مقدار فشار در نقاط مختلف تونل‌های زیرزمینی دارای موج گیر محاسبه گردید. با توجه به اینکه طراحی درب‌های مقاوم در برابر انفجار بر مبنای فشار دینامیکی محاسبه شده صورت می‌پذیرد. به این ترتیب، فرایند ساده شده و گام به گام انتشار موج انفجار درون سازه‌های زیرزمینی به همراه محاسبات عددی آن انجام گرفت. در نهایت می‌توان نتایج تحقیق حاضر را در بندهای ذیل خلاصه نمود:

- در تحقیق حاضر بیان شد که، ورودی یا نقطه اتصال به سطح سازه‌های زیرزمینی از نقاط ضعف این سازه‌ها در برابر بارهای ناشی از انفجار سلاح‌ها است. بر این اساس، ورود انفجار به سازه زیرزمینی و اندازه گیری فشار آن در مقاطع مختلف، دارای اهمیت زیادی است.
- رابطه هنریچ تطابق خوبی با حل عددی دارد و می‌تواند برای محاسبه اضافه فشار ناشی از انتشار موج انفجار درون تونل مورد استفاده قرار بگیرد.
- با استفاده از اضافه فشار مورد اشاره در بند قبلی، می‌توان ضربه دینامیکی وارد بر سطوح در معرض آن را محاسبه نمود.
- با توجه به نتایج تحلیل عددی، مشاهده گردید که به دلیل برخورد و انعکاس‌های متوالی موج از جداره تونل، انتشار آن در داخل تونل به شکل حلقوی خواهد بود.
- با توجه به نتایج می‌توان بیان نمود که در فاصله یکسان، تونل دارای تقاطع فشار کمتری از موج انفجار نسبت به تونل بدون تقاطع تحمل می‌نماید.
- با استفاده از روش ارائه شده در این تحقیق می‌توان فشار وارد به درب مقاوم در برابر انفجار داخل سازه زیرزمینی را تعیین نمود.

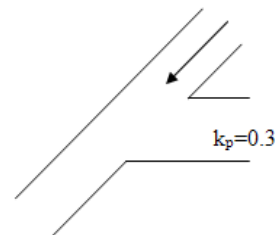
با استفاده از رابطه (۲)، فشار اعمالی به دهانه تونل  $P_s$ ،  $\frac{400}{22}$  بار به دست می‌آید.

با استفاده از نمودار شکل (۴)، فشار ورودی به تونل  $P_i$ ، تقریباً  $\frac{1}{5}$  برابر فشار دهانه و مساوی ۶۰۰ بار است. اگر طول  $X_i$  برابر ۴۵ متر باشد، فشار اعمالی به تقاطع ورودی، پس از طی فاصله  $X_i$ ، از رابطه ۶ برابر  $\frac{14}{27}$  بار به دست می‌آید. با مقایسه حالت‌های مختلف نشان داده شده در شکل‌های (۱۱-۱۰)، می‌توان ضریب فشار انتقالی به هر شاخه را به طور محافظه کارانه مطابق شکل (۲۰) در نظر گرفت:



شکل (۲۰): ضریب فشار انتقالی در محل تقاطع

بنابراین، فشار انتقالی به هر شاخه  $\frac{9}{989}$  بار محاسبه می‌شود. بخشی از موج وارد موجگیر شده و پس از انعکاس از انتهای آن به محل تقاطع باز می‌گردد. با توجه به طول موجگیر اضافه فشار ناشی از انعکاس در انتهای موجگیر محاسبه می‌شود. اگر بنا به توصیه آیین‌نامه TM5-1300 ایالات متحده آمریکا طول موجگیر حدود دو برابر عرض تونل یعنی ۱۵ متر در نظر گرفته شود، موج بازگشتی از زمان حرکت از محل تقاطع تا بازگشت مجدد به این نقطه فاصله طولی ۳۰ متری را باید طی نماید. با توجه به زیاد بودن این فاصله و نمودارهای نشان داده شده در شکل (۱۶) به سادگی مشخص می‌شود، که موج بازگشتی با اضافه فشار کاهش یافته برخورد می‌نماید. بنابراین، این موج با بیشینه فشاری که وارد شاخه اصلی شده است جمع نمی‌شود. از سوی دیگر، با توجه به شکل‌های (۱۱-۱۰)، می‌توان ضریب فشار انتقالی به هر شاخه را به طور محافظه کارانه مطابق شکل (۲۱) در نظر گرفت:



شکل (۲۱): ضریب فشار انتقالی موج بازگشتی از موجگیر در محل تقاطع

به این ترتیب فشار کل ورودی به شاخه اصلی همان  $\frac{9}{989}$  بار خواهد بود، که برای تحمل آن باید تمهیداتی از قبیل درب

Investigation of Blast Wave Penetration into a Tunnel Entrance,” Report E7/80, Ernst-Mach-Institut der Fraunhofer-Gesellschaft, Freiburg, Germany, 1980.

9. D. G. Christopherson, “Structural Defence,” UK Ministry of Home Security, Civil Defence Research Committee paper RC 450.
10. R. Britt, “Attenuation of short duration blast in entrance ways and tunnels,” Proc. 2nd Symp. On the Interaction of non-nuclear munitions with structures, Panama City Beach, Florida, 1985.
11. P. D. Smith and J. G. Hetherington, “Blast and Ballistic Loading of Structures,” Butterworth-Heinemann Ltd., Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, 1994.
12. M. Y. H. Bangash, “Impact and Explosive Analysis and Design,” C.R.C. Press, 1993.
13. “Design of Structures to Resist Nuclear Weapons Effects,” ASCE Manuals and Reports of Engineering Practice, no .42.
14. D. Itschner and B. Anet, “Entry and attenuation of shock waves in tunnels,” Proc. 2nd Symp. On the Interaction of Non-nuclear.
15. “Autodyn User Manual and Theory Manual,” SAS IP Inc., 2010.

## ۷. مراجع

1. S. Peyman and S. Ghazanfarinia, “Defence and Security Structures,” MAUT Press, 2007. (In Persian)
2. H. L. Brode, “Numerical Solution of Spherical Blast Waves,” J. Applied Physics, vol. 6, pp. 766-775, 1995.
3. W. E. Baker, P. A. Cox, P. S. Westine, J. J. Kulesz, and R. A. Strchlow, “Explosion Hazards and Evaluation,” Elsevier, Amsterdam, 1983.
4. J. Henrych, “The Dynamics of Explosion and Its Use,” Elsevier, Amsterdam, 1979.
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. D. B. Chang and C. S. Young, “Probabilistic Estimates of vulnerability to explosive overpressures and impulses,” Journal of physical security, vol. 4, pp. 10-29, 2010.
7. P. S. Bulson, “Explosive Loading of Engineering Structures,” E & FN SPON, 1997.
8. G. Gurke and G. Scheklinski-Gluck, “An

---

# Numerical Investigation and Analysis of Blast Wave Propagation Inside Tunnels and Consequent Pressure Calculation on Explosion-Proof Door

S. peyman<sup>\*</sup>, A. A. Saif, M. H. Tagavi Parsa

## Abstract

Recently, most underground structures are designed and loaded under the effect of blast loads. The entrance of defensive underground structures is vulnerable to blast loading. Hence, the entrance of blast wave into the underground structures and measurement of its pressure at different sections along the structures like tunnels are very important. To study the effects of blast waves on the tunnels, first, the blast wave propagation is evaluated in open space and then the wave entrance and propagation inside the tunnel are considered. Subsequently, pressure reduction through the tunnel and at branches is investigated. The blast design load acting on the explosion-proof door is found based on calculated blast waves and blast pressure at different positions along the tunnel. Finally, application of the presented method is demonstrated using some practical examples. The results of analytical method and results from numerical simulation performed by Autodyn software are compared to assess the capability of proposed analysis regarding the estimation of pressure caused by blast wave propagation. Finally, using the results of this study, it is possible to determine the pressure applied to the blast-resistant door inside the underground structure.

**Key Words:** *Underground Tunnel, Penetrating Projectile, Wave Propagation, Explosive Plunger, Explosion-Proof Door*

---

<sup>\*</sup> Imam Hossein University (speyman@ihu.ac.ir)- Writer-in-Charge