

فصلنامه علمی-ترویجی پدافند غیرعامل

سال ششم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۴، (پیاپی ۲۴): صص ۳۳-۴۱

اثر برجستگی عمدی سطح نهایی پوشش تونل در برابر بارهای

انفجاری

صفا پیمان^۱، صادق نورنیا عمرانی^{۲*}، مهدی طهماسب زاده^۳

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۱/۲۴

تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۴/۰۱

چکیده

ورودی یا نقطه اتصال به سطح سازه‌های زیرزمینی تدافعی، از نقاط ضعف این سازه‌ها در برابر بارهای انفجاری می‌باشد. استفاده از برجستگی عمدی در پوشش نهایی تونل، یکی از راهکارهای مقابله با موج انفجار و کاهش اثرات ناشی از آن جهت کاهش آسیب‌پذیری می‌باشد. در این مطالعه، ابتدا در نرم‌افزار اتوداین (AUTODYN)، انفجارهایی هم‌راستا و با فاصله از دهانه تونل مستقیم شبیه‌سازی شده و سپس به بررسی اثر برجستگی عمدی در پوشش نهایی تونل، در کاهش بار انفجار (بیش‌فشار) پرداخته می‌شود و در نهایت، با توجه به ابعاد برجستگی و تعداد آنها در تونل، میزان درصد کاهش فشار، بیان می‌گردد. بررسی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از برجستگی می‌تواند بیش‌فشار وارد شده به داخل تونل را تا مقدار قابل قبولی کاهش دهد.

کلیدواژه‌ها: تونل، برجستگی، اتوداین، انفجار، بیش فشار

۱- مربی و عضو هیئت علمی دانشگاه جامع امام حسین (ع)

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه امن دانشگاه جامع امام حسین (ع) - Omrani557@Yahoo.com - نویسنده مسئول

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه امن دانشگاه جامع امام حسین (ع)

۱- مقدمه

انفجارها می‌توانند تهدیدکننده زندگی مردم، زیرساخت‌های اصلی کشور، استحکامات، تاسیسات دفاعی، نظامی و ملی باشند. به همین جهت این زیرساخت‌ها به منظور محافظت، اغلب درون سازه‌های زیرزمینی قرار می‌گیرند و از طرف دیگر چون احداث این سازه‌ها بسیار زمان‌بر و پرهزینه است، حفاظت از آنها اهمیت ویژه‌ای دارد.

تنها راه ارتباطی این فضاها با محیط خارج، ورودی و خروجی آنها می‌باشد که در صورت آسیب، ارتباط با محیط خارج قطع گردیده و افراد و تجهیزات در داخل فضای امن محبوس می‌گردند. لذا مسئله اساسی، ارائه راهکارهای مقابله با موج انفجار در ورودی فضای امن و کاهش اثرات ناشی از آن جهت کاهش آسیب‌پذیری می‌باشد.

بدین منظور از روش‌هایی همچون موجگیرها، خم‌ها، موانع هندسی، درب ضدانفجار، الگوهای مختلف ورودی، تعدد ورودی‌ها و خروجی‌ها، موانع طبیعی و ایجاد برجستگی می‌توان استفاده نمود [۱] که استفاده از موانع هندسی به مانند برجستگی یکی از روش‌های کاهش اثرات انفجار در تونل‌ها می‌باشد.

انتشار موج انفجار درون سازه‌های زیرزمینی از پیچیدگی بیشتری نسبت به انفجار در هوای آزاد برخوردار می‌باشد، لذا جهت بررسی اثر برجستگی تعمودی در پوشش نهایی تونل در کاهش اثرات انفجار، می‌بایست نحوه انتشار موج انفجار را از نقطه انفجار تا ابتدای دهانه و سپس در طول تونل مطالعه و در ادامه، نحوه انتشار موج در تونل دارای برجستگی را بررسی نمود.

نحوه انتشار موج انفجار درون سازه‌های زیرزمینی و بدست آوردن بیش‌فشار (یکی از موارد تعیین‌کننده اثرات انفجار، بیش‌فشار [Pso] می‌باشد)، در بیرون و درون تونل دغدغه اصلی بسیاری از محققین بوده است که روابط تجربی و نیمه تجربی مختلفی برای تعیین Pso، در انفجار بیرون تونل بر حسب فاصله مقیاس شده (Z) ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به روابط ارائه شده 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 TM۵-۱۳۰۰ ایالات متحده آمریکا [۵]، مرجع مناسبی برای محاسبه پارامترهای ناشی از انفجار می‌باشد. علاوه‌براین، 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].

بخشی از موج انفجار 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 [۷].

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 انجام‌شده با استفاده از بمب‌های دارای ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT که در آمریکا انجام شده بود، توسط بریت ارائه شد. این آزمایشات برای بدست آوردن رابطه‌هایی برای طراحی سازه‌های زیرزمینی در برابر انفجار انجام شدند. بیش از ۹۹ درصد این تست‌ها با استفاده از ماده انفجاری C۴ 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 صورت گرفته‌اند. علاوه بر این، آزمایش‌هایی در مقیاس بزرگتر نیز توسط ایشنر و آنت در کشور آلمان انجام گرفته است [۷].

در مورد انتشار موج در ابتدای دهانه تونل، نمودارهایی توسط آیین‌نامه طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجارات هسته‌ای آمریکا [۸] و آیین‌نامه TM ۵-۸۵۵ ایالات متحده آمریکا [۹]، ارائه شده است.

در سال ۱۹۴۴ ای.بی.فیلیپ گزارشی در مورد انتشار انفجارهای هوایی در تونل‌ها ارائه کرد. بر مبنای کارهای پژوهشی، رابطه‌هایی توسط آقای هنریچ [۳] در سال ۱۹۷۹ و آقایان گیورک و گلوک [۱۰] در سال ۱۹۸۰ برای محاسبه کاهش فشار موج انفجار درون تونل‌ها ارائه شده است [۷]. در سال‌های منتهی به ۲۰۰۰ نیز تحقیقاتی توسط هیلینگ و همکاران در زمینه تاثیر سطوح زیر و خشن در کاهش اثرات انفجار در تونل صورت گرفت [۱۱].

۲-۲- رابطه هنریچ ۱۹۷۹ [۷]

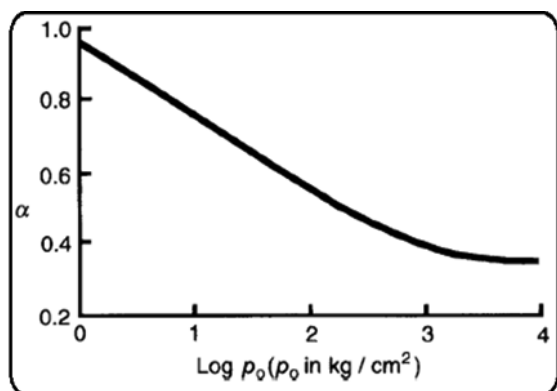
نتیجه آزمایشاتی درباره کاهش فشار منتشرشده درون لوله‌های استوانه‌ای با زبری سطح متفاوت به صورت تابع نمایی نسبت به فاصله کاهش می‌یابد.

علاوه بر این، هنریچ آزمایشاتی را درباره کاهش فشار منتشرشده درون لوله‌های استوانه‌ای با زبری سطح متفاوت انجام داد. در این آزمایشات نشان داده شد که بیش‌فشار اندازه‌گیری‌شده در دهانه تونل هنگام حرکت درون خطوط لوله، به صورت تابع نمایی نسبت به فاصله کاهش می‌یابد. او با توجه به این موضوع و نتایج ارائه‌شده در پژوهش‌های صورت‌گرفته توسط خودش و دیگران، رابطه زیر را برای محاسبه اضافه فشار در دهانه تونل ارائه نمود:

$$P_x = \frac{\alpha R}{\alpha R + X} P_s e^{-0.4 \left(\frac{X}{r} \right)^f} \quad (1)$$

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

در این رابطه، h ضریب وابسته به زبری سطح، X فاصله از دهانه یا ورودی تونل، r شعاع تونل، R فاصله مرکز انفجار از دهانه تونل و بر حسب P_s می‌باشد که با استفاده از نمودار نشان داده‌شده در شکل (۲) به دست می‌آید.



شکل ۲- ضریب α بر حسب فشار

در رابطه هنریچ علاوه بر پارمتر X (فاصله از ورودی تونل) متغیر R نیز به منظور وارد کردن اثرات فاصله محل انفجار از ورودی تونل بر افت فشار وارد معادله شده است. لذا در روابط هنریچ، مقدار بیش‌فشار خارج از دهانه P_s قرار داده می‌شود.

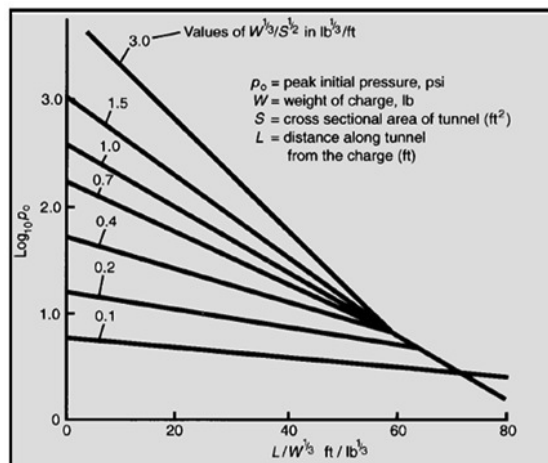
در این مقاله ابتدا به نحوه انتشار موج انفجار در طول تونل با توجه به مراجع مختلف، اشاره شده و سپس جهت صحت‌سنجی نتایج عددی، نتایج شبیه‌سازی انتشار موج انفجار در تونل مستقیم، با نتایج تجربی مقایسه می‌شود و در نهایت در نرم‌افزار اتوداین، انفجارهایی هم‌راستا و با فاصله از دهانه تونل مستقیم شبیه‌سازی شده و سپس به بررسی اثر برجستگی تعمدی در پوشش نهایی تونل، در میزان کاهش انفجار (بیش‌فشار) پرداخته شده و با توجه به ابعاد برجستگی و تعداد آنها در تونل، میزان درصد کاهش فشار بیان می‌گردد.

۲- انتشار موج در طول تونل

برای محاسبه بیش‌فشار درون تونل، افراد و سازمان‌های مختلفی تحقیقاتی انجام داده‌اند که بعضی از آنها بر مبنای کارهای تجربی و عددی، رابطه‌هایی برای محاسبه کاهش فشار موج انفجار درون تونل‌ها ارائه داده‌اند که عبارت‌اند از:

۱-۱- نتایج فیلیپ ۱۹۴۴ [۷]

گزیده‌ای از نتایج فیلیپ برای انفجارهای داخل یک تونل مستقیم بلند، توسط کریستوفرسون ارائه شد که برخی از آنها در شکل (۱) نشان داده شده است. این اطلاعات مربوط به تونل‌هایی است که دارای پوشش آجری بودند.



شکل ۱- بیش‌فشار ناشی از خرج انفجاری درون یک تونل

افت فشار در این تونل‌ها شاید سریع‌تر از تونل‌ها با پوشش صیقلی‌تر فولادی یا بتنی باشد. نرخ افت بیش‌فشار، به پارامتر $(W^{1/3})/(S^{1/2})$ بستگی دارد که S سطح مقطع بر حسب فوت مربع و W وزن خرج TNT بر حسب پوند است.

۳-۲- رابطه گیورک و گلوک [۷]

در سال ۱۹۸۰ گیورک و گلوک نتایج آزمایش‌های انجام‌شده در کشورهای آمریکا، آلمان و دیگران را به صورت رابطه‌ای برای محاسبه اضافه فشار در امتداد تونل ارائه نموده‌اند. این رابطه که دارای دقت و اهمیت کاربردی بالایی می‌باشد، در ادامه خواهد آمد.

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

$$\bar{E} = 0.586 \frac{W^{2/3}}{A} \left(\frac{Pa}{Pi}\right)^{0.4}$$

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

که در آن، A سطح مقطع تونل بر حسب متر مربع و W قدرت انفجار بر حسب کیلوگرم TNT معادل است. از سوی دیگر، Pa فشار Pi فشار محاسبه‌شده در داخل تونل می‌باشد.

۳- نحوه مدل سازی

مدل سازی به صورت سه بعدی است و توسط نرم افزار اتوداین تحلیل می‌گردد. جهت حذف اغتشاشات خارجی تونل و حذف اثر انعکاس و همگنی موج در ورودی تونل، مرز محیط انتشار بیرون از تونل به گونه‌ای فرض شده است که موج انفجار اجازه عبور از آن را نداشته و در بیرون تونل موج انعکاسی وجود ندارد.

۳-۱- محیط انتشار موج

محیط انتشار موج از هوا، به عنوان گازی ایده‌آل پر شده است که این محیط با تقریب خوبی تابع قوانین حاکم بر گازهای ایده‌آل در نظر گرفته شده است.

۳-۲- جنس و ابعاد و مقطع تونل

در این بررسی، از تاثیرات تغییر جنس موانع هندسی در کاهش انفجار چشم‌پوشی شده و جنس تونل به صورت صلب فرض شده است. همچنین مقطع تونل، مربع و ابعاد آن ۲×۲ می‌باشد. (فواصل به متر می‌باشد).

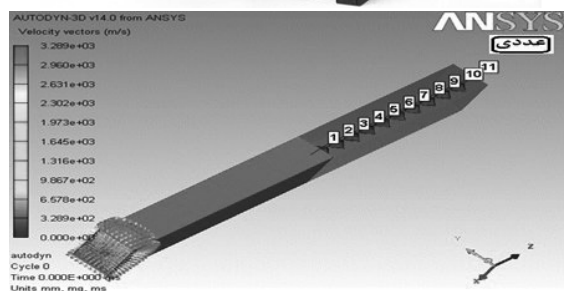
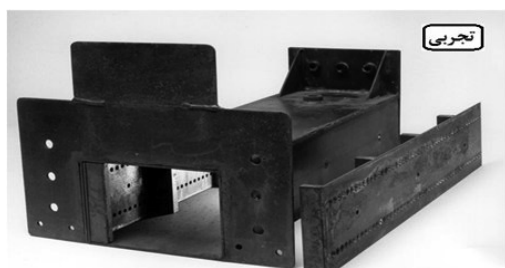
۳-۳- ماده منفجره

خرج انفجاری کروی بدون پوشش به وزن ۳۰۰ کیلوگرم از جنس TNT مدل شده است.

۴- صحت‌سنجی میزان بیش‌فشار (Pso) عددی در

طول تونل

در نرم‌افزار اتوداین، خرج PE4 به وزن ۷۲ گرم با شکل کروی، با فاصله ۶۷۰ میلی‌متر از دهانه تونل با مقطع مستطیل به عرض ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر و به طول ۵۰۰ میلی‌متر شبیه‌سازی شده و میزان فشار در انتهای تونل اندازه گرفته می‌شود (شکل ۳).



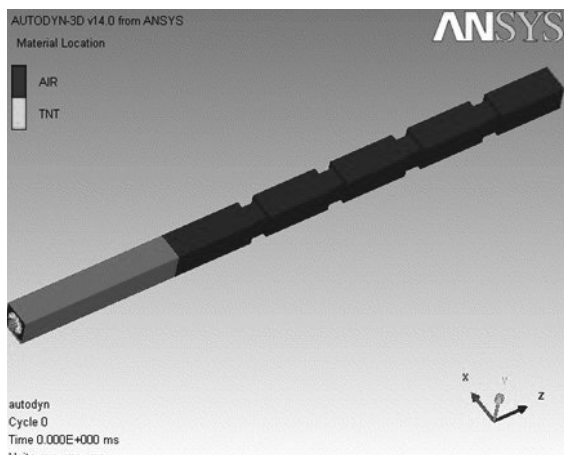
شکل ۳- نمونه تونل‌های مدل‌شده در مقاله (تجربی) و اتوداین (عددی) به ابعاد ۱۵۰×۱۰۰ میلی‌متر

میزان فشار و نمودار فشار- زمان حل عددی، با نتایج تجربی حاصل از نتایج مقاله اسمیت و همکاران [۱۱] مقایسه می‌شود (جدول و نمودار ۱).

با توجه به نتایج و نمودارهای فشار- زمان عددی و تجربی، نحوه انفجار موج در داخل تونل تطابق خوبی با هم داشته و اندازه بیش فشارها حدود هفت درصد خطا دارد.

جدول ۱- نتایج Pso حاصل از نرم افزار اتوداین و تست تجربی [۱۱] در فاصله ۶۷۰ میلی‌متر در درون تونل

فاصله سنجه تا دهانه تونل (میلی‌متر)	نتایج	بیش‌فشار (بار)
۵۰۰	عددی	۱۴/۳۰
	تجربی	۱۵/۴۰
	درصد خطا	٪۷



شکل ۵- نمونه تونل شبیه‌سازی شده دارای برجستگی در نرم‌افزار اتوداین

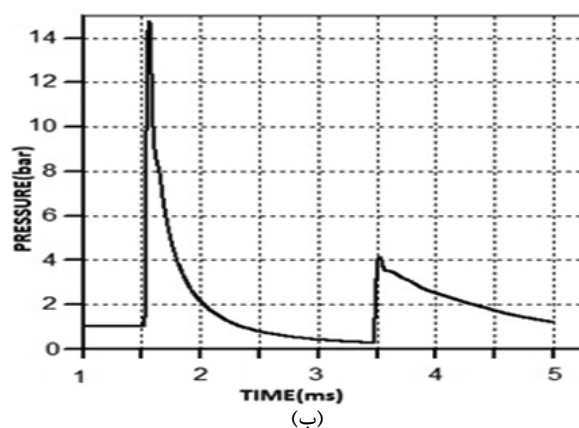
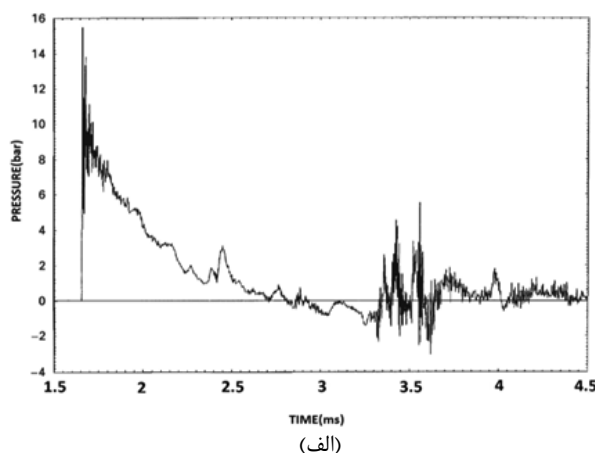
۵-۱- اثرات عرض برجستگی (B)

هر چقدر عرض برجستگی کمتر باشد از یک سو از لحاظ اقتصادی به صرفه و نیز به دلیل ملاحظات اجرایی و فنی در تونل، سهولت کار نیز بیشتر خواهد بود.

لذا برای تعیین تاثیر عرض برجستگی در کاهش فشار، ۷ نمونه شبیه‌سازی، برای مقایسه دو عرض برجستگی ۰/۱ و ۱ متر انجام می‌پذیرد که شامل یک تونل ۲×۲ با خرج ۳۰۰۰ کیلوگرم و دارای دو برجستگی با فواصل گام ثابت ۵ متر ولی با ارتفاع برجستگی‌های مختلف ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ متر می‌باشد، که نتایج در جداول (۲)، (۳) و (۴) آورده شده است.

جدول ۲- نتایج شبیه‌سازی تونل صاف و با برجستگی و دارای عرض برجستگی ۰/۱، ۱ متر و (S=5m), (H=0.2m), (N=2)

فاصله سنجه تا دهانه تونل (متر)	3000kgTNT, (S=5m), (H=0.2m), (N=2)		
	بیش فشار (bar)		
	Smooth	B=1m	B=0.1m
۲۶	۷/۳	۵/۷۴	۶/۱۸
۲۷	۷/۰۵	۵/۶۵	۵/۹
۲۸	۶/۹	۵/۲۷	۵/۵۲
۲۹	۶/۷۶	۴/۸۶	۵/۱۵
۳۰	۵/۹۸	۴/۴۳	۴/۶۷



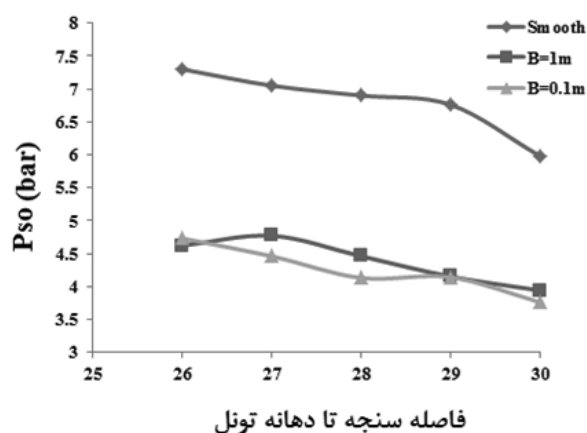
نمودار ۱- الف) نمودار فشار-زمان حل تجربی (ب) نمودار فشار-زمان حل عددی در فاصله ۵۰۰ میلی‌متر در درون تونل

۵- شبیه‌سازی و نتایج عددی

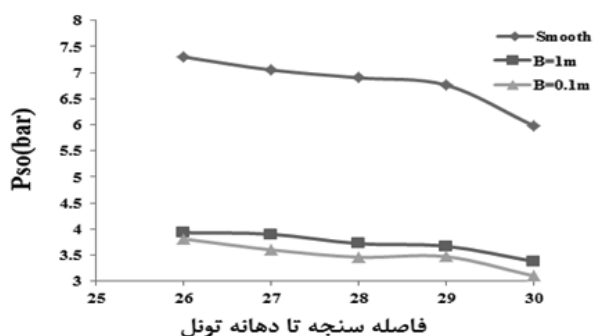
جهت بررسی اثر برجستگی تعمدی در پوشش نهایی تونل، در کاهش انفجار (بیش فشار)، می‌بایست بیش فشار ناشی از انفجار را در تونل مستقیم در حالت‌های صاف و با برجستگی با هم مقایسه نمود. بدین منظور ابتدا در نرم‌افزار اتوداین خرج ۳۰۰۰ Kg TNT کروی شکل، با فاصله ۱۲ متر از دهانه تونل با مقطع مربع با ابعاد ۲×۲ به طول ۳۰ متر شبیه‌سازی می‌شود (شکل ۴) و جهت ثبت بیش فشار سنج‌های به تعداد پنج عدد و با فاصله یک متر از هم جهت نشان دادن نحوه کاهش فشار در انتهای تونل و بعد از آخرین برجستگی قرار می‌گیرد. در این مدل (H) ارتفاع، (B) عرض و (S) فاصله گام برجستگی می‌باشد. شکل (۵) یک نمونه شبیه‌سازی از مدل تونل دارای برجستگی در نرم‌افزار اتوداین را نشان می‌دهد.



شکل ۴- مدل تونل دارای برجستگی



نمودار ۳- نمودار شبیه‌سازی تونل صاف و با برجستگی و دارای عرض برجستگی ۱، ۰/۱ متر و (S=5m),(H=0.3m),(N=2)



نمودار ۴- نمودار شبیه‌سازی تونل صاف و با برجستگی و دارای عرض برجستگی ۱، ۰/۱ متر و (S=5m),(H=0.4m),(N=2)

نتایج جدول (۲) حاکی از آن است که درصد اختلاف کاهش فشار تونل دارای برجستگی با عرض‌های ۱، ۰/۱ متر و ارتفاع برجستگی ثابت ۰/۲ متر، نسبت به هم، کمتر از ۵٪ می‌باشد که می‌توان از آن صرف‌نظر کرد و عرض برجستگی ۰/۱ را جایگزین عرض ۱ متر نمود که البته در این حالت کاهش فشار نسبت به حالت صاف، ۲۰ درصد خواهد بود.

نتایج جدول (۳) حاکی از آن است که درصد اختلاف کاهش فشار تونل دارای برجستگی با عرض‌های ۱، ۰/۱ متر و ارتفاع برجستگی ثابت ۰/۳ متر کمتر از ۴٪ خواهد بود که در این حالت کاهش فشار با توجه به عرض ۰/۱ متر نسبت به حالت صاف، ۳۷ درصد خواهد بود.

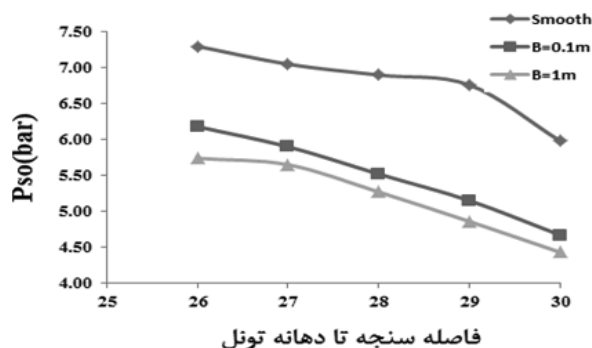
نتایج جدول (۴) حاکی از آن است که درصد اختلاف کاهش فشار تونل دارای برجستگی با عرض‌های ۱ متر و ۰/۱ متر و ارتفاع برجستگی ثابت ۰/۴ متر نسبت به هم، کمتر از ۷٪ می‌باشد که

جدول ۳- نتایج شبیه‌سازی تونل صاف و با برجستگی و دارای عرض برجستگی ۱، ۰/۱ متر و (S=5m),(H=0.3m),(N=2)

فاصله سنجه تا دهانه تونل (متر)	3000kgTNT,(S=5m),(H=0.3m),(N=2)		
	بیش فشار (bar)		
	Smooth	B=1m	B=0.1m
۲۶	۷/۳	۴/۶۲	۴/۷۳
۲۷	۷/۰۵	۴/۷۷	۴/۴۶
۲۸	۶/۹	۴/۴۶	۴/۱۳
۲۹	۶/۷۶	۴/۱۵	۴/۱۴
۳۰	۵/۹۸	۳/۹۴	۳/۷۶

جدول ۴- نتایج شبیه‌سازی تونل صاف و با برجستگی و دارای عرض برجستگی ۱، ۰/۱ متر و (S=5m),(H=0.4m),(N=2)

فاصله سنجه تا دهانه تونل (متر)	3000kgTNT,(S=5m),(H=0.4m),(N=2)		
	بیش فشار (bar)		
	Smooth	B=1m	B=0.1m
۲۶	۷/۳	۳/۹۳	۳/۸۱
۲۷	۷/۰۵	۳/۹۰	۳/۶۰
۲۸	۶/۹	۳/۷۲	۳/۴۶
۲۹	۶/۷۶	۳/۶۷	۳/۴۷
۳۰	۵/۹۸	۳/۳۸	۳/۱۰



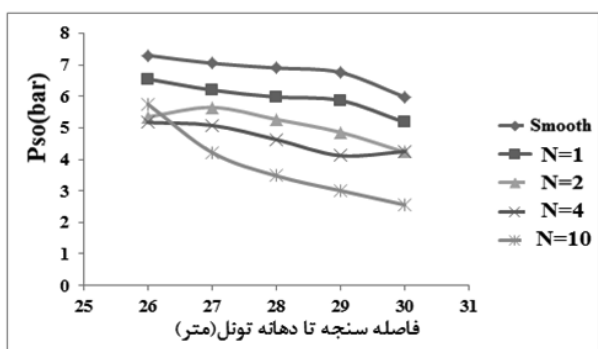
نمودار ۲- نمودار شبیه‌سازی تونل صاف و با برجستگی و دارای عرض برجستگی ۱، ۰/۱ متر و (S=5m),(H=0.2m),(N=2)

در انتهای تونل به فواصل یک متر می‌باشد و مشخص گردید که چقدر ارتفاع برجستگی بیشتر شود، کاهش فشار نسبت به هم، حدود ۲۴٪ و نسبت به حالت تونل ۲×۲ بدون برجستگی، ۴۳٪ می‌باشد که نتایج آن در جدول و نمودار (۵) آمده است.

۵-۳- اثرات تعداد برجستگی (N)

جدول ۶- نتایج شبیه‌سازی تونل صاف و با برجستگی و دارای تعداد برجستگی ۱، ۲، ۴ و ۱۰ عدد و (S=5m),(B=0.1m) (H=0.2m)

فاصله سنج تا دهانه تونل (متر)	3000kg TNT, (S=5m), (B=0.1m), (H=0.2m)				
	بیش فشار (bar)				
	Smooth	N=1	N=2	N=4	N=10
۲۶	۷/۳	۶/۵۵	۵/۳۵	۵/۱۷	۵/۷۵
۲۷	۷/۰۵	۶/۲۰	۵/۶۵	۵/۰۸	۴/۲۲
۲۸	۶/۹	۵/۹۸	۵/۲۷	۴/۶۳	۳/۴۸
۲۹	۶/۷۶	۵/۸۷	۴/۸۶	۴/۱۲	۳/۰۱
۳۰	۵/۹۸	۵/۱۸	۴/۲۳	۳/۲۵	۲/۵۶



نمودار ۶- نمودار شبیه‌سازی تونل صاف و با برجستگی و دارای تعداد برجستگی ۱، ۲، ۴ و ۱۰ عدد و (S=5m),(B=0.1m) (H=0.2m)

در این قسمت، جهت تعیین اثرات تعداد برجستگی در کاهش فشار تونل، ۵ نمونه مدل‌سازی انجام گرفته که شامل یک تونل با ابعاد ۲×۲ متر و ارتفاع برجستگی ثابت ۰/۲ متر و عرض برجستگی ثابت ۰/۱ متر و خرج ۳۰۰۰ کیلوگرم و با تعداد برجستگی‌های مختلف و ۵ عدد سنج به فاصله یک متر در انتهای تونل می‌باشد که نتایج این مدل‌سازی‌ها در جدول (۶) آورده شده است.

طبق این نتایج، مشاهده گردیده است که هرچه تعداد

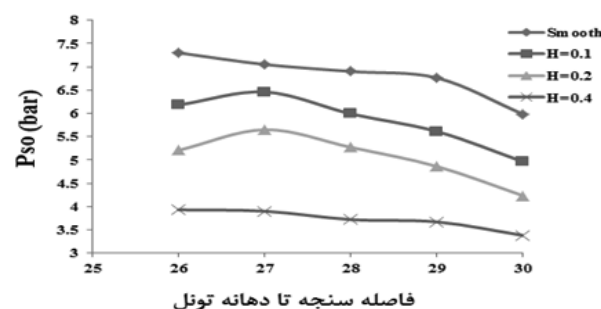
قابل صرف‌نظر خواهد بود. این حالت، کاهش فشار با توجه به عرض ۰/۱ متر نسبت به تونل صاف، ۴۸ درصد است که البته میزان زیاد کاهش فشار، بیشتر به دلیل افزایش ارتفاع برجستگی می‌باشد که در بخش بعدی به آن اشاره خواهد شد.

طبق این جداول مشخص گردید که کاهش عرض برجستگی از یک متر به ۰/۱ متر دارای نتایج نزدیک به هم بوده و می‌توان به جای عرض یک متر از عرض ۰/۱ متر استفاده نمود که هم از لحاظ اقتصادی و هم به لحاظ فنی و اجرایی مقرون به صرفه باشد.

۵-۲- ارتفاع برجستگی (H)

جدول ۵- نتایج شبیه‌سازی تونل صاف و با برجستگی و دارای ارتفاع‌های ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۴ متر و (S=5m),(H=0.1m) (N=2)

فاصله سنج تا دهانه تونل (متر)	3000kg TNT, (S=5m), (H=0.1m), (N=2)			
	بیش فشار (bar)			
	Smooth	H=0.1m	H=0.2m	H=0.4m
۲۶	۷/۳	۶/۱۸	۵/۲۱	۳/۹۳
۲۷	۷/۰۵	۶/۴۶	۵/۶۵	۳/۹۰
۲۸	۶/۹	۵/۹۹	۵/۲۷	۳/۷۲
۲۹	۶/۷۶	۵/۶۱	۴/۸۶	۳/۶۷
۳۰	۵/۹۸	۴/۹۶	۴/۲۳	۳/۳۸



نمودار ۵- نمودار شبیه‌سازی تونل صاف و با برجستگی و دارای ارتفاع‌های ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۴ متر و (S=5m),(H=0.1m) (N=2)

در این بخش، جهت تعیین اثرات ارتفاع برجستگی در کاهش انفجار، ۴ نمونه مدل‌سازی انجام گرفته که شامل یک تونل با ابعاد ۲×۲ با دو برجستگی و خرج ۳۰۰۰ کیلوگرم و با ارتفاع برجستگی‌های مختلف شامل ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۴ متر و ۵ عدد سنج

اختلاف کاهش فشار نسبت به هم کمتر از ۴٪ خواهد بود، لذا تغییر فواصل گام‌ها در کاهش بار انفجار تاثیر چندانی نخواهد داشت.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

بررسی نتایج به دست آمده نشان دادند که استفاده از برجستگی می‌تواند بیش‌فشار واردشده به داخل تونل را تا مقدار قابل قبولی کاهش دهد. به عبارت دیگر، استفاده از برجستگی عمدی در سطح نهایی پوشش تونل، یکی از راه‌های 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 مهم این پژوهش در ادامه آورده می‌شوند.

الف- بررسی‌های انجام‌شده در تونل دارای برجستگی نشان می‌دهد که بیشترین عوامل تاثیرگذار از بین عامل‌های ۴ گانه (ارتفاع، عرض، تعداد و فاصله گام)، ابتدا تعداد و سپس ارتفاع برجستگی می‌باشد و هرچه این دو کمیت افزایش یابد کاهش فشار بیشتری خواهیم داشت.

ب- کم یا زیاد کردن عرض برجستگی تاثیر چندانی در کاهش بار انفجار ندارد و می‌توان از یک عامل برجستگی با عرض کمتر استفاده نمود تا هم حجم مصالح به‌کاربرده شده کاهش یابد و از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه باشد.

ج- بر اساس صحت‌سنجی انجام‌گرفته در این مقاله، میزان P_{so} به‌دست آمده از آزمایش عددی (اتوداین) با آزمایش تجربی انجام‌گرفته توسط مقاله اسمیت و همکاران، تطابق خوبی با هم داشته و حداکثر ۷ درصد خطا دارد.

۷- مراجع

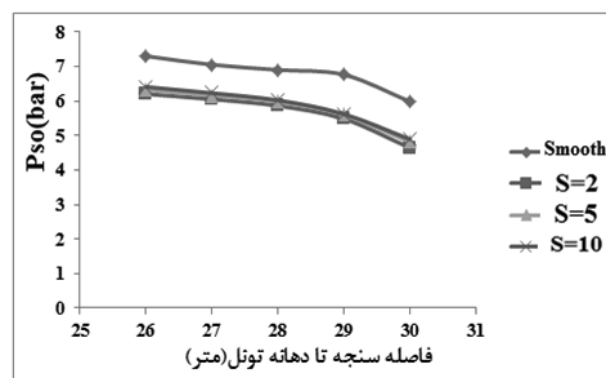
1. S. Peyman and S. Ghazanfarinia, "Defence and Security Structures," MAUT Press, 2007 (In Persian).
2. H. L. Brode, "Numerical Solution of Spherical Blast Waves," J. Applied Physics, vol. 6, pp. 766-775, 1995.
3. J. Henrych, "The Dynamics of Explosion and Its Use," Elsevier, Amsterdam, 1979.
4. G. F. Kinney and K. J. Graham, "Explosive Shocks in ir," Springer Verlag, Berlin, 1985.

برجستگی افزایش یابد، کاهش فشار نسبت به هم، حدود ۲۳٪ و نسبت به حالت تونل ۲×۲ بدون برجستگی، حدود ۵۷٪ می‌باشد.

۴-۵- اثرات گام‌های برجستگی (S)

جدول ۷- نتایج شبیه‌سازی تونل صاف و با برجستگی و دارای گام برجستگی ۱۰، ۲ متر و (B=0.1m),(H=0.2m) (N=2)

فاصله سنجه تا دهانه تونل (متر)	3000kg TNT, (B=0.1m), (H=0.2m), (N=2)			
	بیش فشار (bar)			
	Smooth	S=2m	S=5m	S=10m
۲۶	۷/۳	۶/۲۰	۶/۳۲	۶/۴۱
۲۷	۷/۰۵	۶/۰۵	۶/۱۵	۶/۲۳
۲۸	۶/۱۹	۵/۸۶	۵/۹۷	۶/۰۲
۲۹	۶/۷۶	۵/۴۸	۴/۵۹	۵/۶۲
۳۰	۵/۹۸	۴/۶۴	۴/۸۱	۴/۸۹



نمودار ۷- نمودار شبیه‌سازی تونل صاف و با برجستگی و دارای گام برجستگی ۱۰، ۲ متر و (B=0.1m),(H=0.2m) (N=2)

در این بخش، جهت تعیین میزان تاثیر فواصل گام‌های برجستگی در کاهش بار انفجار، ۳ نمونه مدل‌سازی انجام گرفته که شامل تونل ۲×۲ با خرج ۳۰۰۰ کیلوگرم و دو برجستگی و ارتفاع برجستگی ثابت ۰/۲ متر و نیز عرض برجستگی ثابت ۰/۱ متر، یک بار با فواصل گام‌های ۲ متر و بار دیگر فاصله گام‌ها ۵ و ۱۰ متر می‌باشد، نتایج حاصله در جدول و نمودار (۷) آورده شده است.

نتایج جدول حاکی از آن است که با توجه به تغییر فواصل گام‌ها (۲، ۵، ۱۰ متر) و با ارتفاع برجستگی ثابت ۰/۲ متر،

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. "Design of Structures to Resist Nuclear Weapons Effects," ASCE Manuals and Reports of Engineering Practice, no. 42.
9. TM5-855-1, "Fundamental of Protective Design for Conventional Weapons," US Army Eng. Waterways Experiment Station, 1984.
10. G. Gurke and G. Scheklinski-Gluck, "An Investigation of Blast Wave Penetration into a Tunnel Entrance," Report E7/80, Ernst-Mach-Institut der Fraunhofer-Gesellschaft, Freiburg, Germany, 1980.
11. P. D. Smith, P. L. Vismeg, C. Teo, and L. Tingey, "Blast Wave Transmission Along Rough-Walled Tunnels," J. Impact Engng., vol. 21, no. G, PP. 419-432, 1998.

The Final Surface Imperfections that Apply to the Tunnel Lining Loads Due to Explosion

S. Peyman

S. Nourniya Omrani*

M. Tahmasebzadeh

Abstract

The entrance of defensive underground structures is vulnerable to blast loading. Deliberate use of prominence in the final lining of the tunnel, one of the ways of dealing with the effects of the blast wave and reduce the vulnerability to degradation. In this study, the software (AUTODYN) the explosions in the line with the distance from the mouth of the tunnel simulated and then the effects of deliberate prominence at the end of the tunnel cover Performed directly. The amount of airflow (overpressure) discussed and finally considering the size prominence of the tunnel and reducing the amount of pressure are expressed. The results show that using prominence can Reduce overpressure inside the tunnel For acceptable.

Key Words: *Tunnel, prominence, AUTODYN, explosion, overpressure.*