

بررسی اثر موقعیت و ابعاد دال‌های محافظ تونل بر کاهش آثار ناشی از انفجار در سطح زمین

هادی حسینی نسب^{۱*}؛ سید مجتبی موحدی فر^۲

۱- کارشناس ارشد مهندسی سازه؛ باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد بیرجند، دانشگاه آزاد اسلامی، بیرجند، ایران.
 ۲- استادیار؛ گروه مهندسی عمران، واحد نیشابور، دانشگاه آزاد اسلامی، نیشابور، ایران.

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۱۱/۱۱؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۷/۱۰/۱۶
 شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2019.6711.1334

واژگان کلیدی	چکیده
تفجار تونل مدفون ایمن‌سازی تحلیل دینامیکی غیر خطی AUTODYN	مطالعه رفتار و ایمن‌سازی تونل‌های مدفون که شریان‌های حیاتی هر کشور هستند به دلیل اجرای این سازه‌ها در محیط پیچیده خاک، همواره با دشواری‌های زیادی همراه بوده است. از طرفی در سال‌های اخیر به دلیل افزایش تهدیدات امنیتی و تروریستی، نیاز به بررسی رفتار این سازه‌ها در مقابل بارهای انفجاری بیشتر از گذشته احساس شده است. در تحقیق حاضر به بررسی پدیده انفجار در سطح زمین و اثر موج ناشی از آن روی تونل مدفون پرداخته شده است و با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی در نرم‌افزار ANSYS AUTODYN، ابتدا پدیده گسترش موج انفجار در خاک در یک محیط سه‌بعدی و با هندسه کامل شبیه‌سازی شده و پس از اطمینان از صحت نتایج، اثر عمق دفن دال‌های محافظ معمولی و سپس دال‌های مرکب تقویت‌شده با لایه‌ای از ورق فولادی در زیر آن بررسی شده است. در ادامه نیز اثر ابعاد هندسه دال در کاهش آثار مخرب انفجار بر روی تونل، ارزیابی شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که هرچه دال محافظ به سازه تونل نزدیک‌تر باشد محافظت بهتری از تونل صورت خواهد گرفت. بعلاوه افزایش ضخامت دال بتنی همواره باعث کاهش آثار ناشی از انفجار بر روی مقطع تونل می‌شود اما تغییر طول دال بتنی صرفاً نمی‌تواند معیار مناسبی برای پیش‌بینی آثار بار انفجاری بر مقطع تونل باشد.

۱- پیشگفتار

شبیه‌سازی رایانه‌ای و هایدروکدهای ویژه این کار، ضمن رفع این محدودیت‌ها نتایج قابل قبولی ارائه خواهد داد. در خصوص رفتار تونل مدفون در مواجهه با بار انفجاری و محافظت از آن، لو و همکاران در سال ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵، مدل‌هایی دوبعدی و سه‌بعدی از سازه‌های مدفون را مورد ارزیابی قرار داده و اثر انفجار بر روی این سازه‌ها را بررسی کردند. آن‌ها برای مدل‌سازی در مناطقی از هندسه که دچار تغییر شکل‌های زیاد بود از مدل ذرات (SPH) و در سایر قسمت‌ها از محیط لاگرانژ کمک گرفته و نتیجه گرفتند که مدل‌های دوبعدی نیز در شرایطی همانند مدل‌های سه‌بعدی نتایج قابل قبولی برای تحلیل‌های انفجاری خواهند

تونل‌ها با توجه به نقش راهبردی که در تأسیسات هر کشور دارند، یکی از اهداف بالقوه برای سلاح‌ها و تهدیدات دشمن بشمار می‌روند. لذا مطالعه و افزایش سطح شناخت از رفتار این سازه‌ها و ایمن‌سازی آن‌ها در مقابل بارهای انفجاری امری اجتناب‌ناپذیر است. دو عامل وابستگی شدید به زمان و محدودیت در مطالعات تجربی باعث شده مطالعه پدیده انفجار نسبت پدیده‌های استاتیکی و حتی دینامیکی معمول، با چالش‌های به‌مراتب پیچیده‌تری روبرو باشد. بعلاوه تحقیقات آزمایشگاهی در خصوص تونل‌ها، بسیار پرهزینه، پرخطر و با محدودیت‌های زیادی همراه است. لذا استفاده از

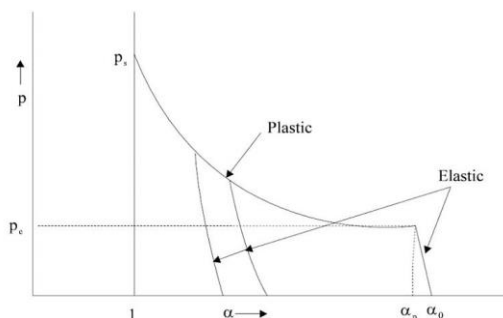
* نویسنده مسئول - خراسان جنوبی؛ بیرجند؛ انتهای بلوار آیت‌الله غفاری؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد بیرجند؛ باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان؛ کد پستی: ۹۷۱۷۸۱۳۱۱۸؛ شماره‌ی تلفن: ۰۵۶-۳۱۳۱۰؛ دورنگار: ۰۵۶-۳۲۳۴۵۵۹۱؛ رایانامه: hhnasab@iaubir.ac.ir

موقعیت دال محافظ (بین ۰٫۸ تا ۸ متری نسبت به مرکز خرج انفجاری)، عمقی بهینه برای اجرای دال‌های محافظ معمولی و مرکب تعیین خواهد شد. در ادامه نیز با تغییر طول و عرض دال، به بررسی اثر این متغیرها در محافظت بهتر از سازه تونل خواهیم پرداخت تا ابعادی بهینه برای این دال‌ها پیشنهاد شود.

۲- مدل‌سازی

۲-۱- بتن

رفتار بتن تحت بارگذاری انفجاری یک فرایند غیرخطی پیچیده و وابسته به سرعت بارگذاری است (Wang, Lu, Hao, & Chong, 2005). برای توصیف مدل‌های گسیختگی و مقاومت بتن تحت بارهای دینامیکی از مدل RHT (Reidel-Hiermaier-Thoma) استفاده شده که با مشخصه‌هایی از قبیل سختی کرنشی، سختی فشاری، شدگی نرخ کرنش، سه ثابت وابسته (محصول سه تنش اصلی، سطح شکست، حد الاستیک و مقاومت باقی‌مانده) و شاخص آسیب و نرم شدگی ترک قابل‌بیان است (Brannon & Leelavanichkul, 2009). استفاده از این معادله برای مدل‌سازی رفتار مصالحی مانند بتن بسیار موفق بوده است (Wang et al., 2005). برای بیان معادله حالت نیز از رابطه بین فشار و تخلخل مواد که به معادله $P-\alpha$ معروف است استفاده شده است. رفتار بتن به‌عنوان مصالحی تراکم‌پذیر تحت تنش‌های بالا و پایین با این معادله به‌خوبی توصیف می‌شود (Wang et al., 2005).



شکل ۱- فشار و تخلخل مواد معروف به معادله $P-\alpha$ (Ansys Inc, 2005)

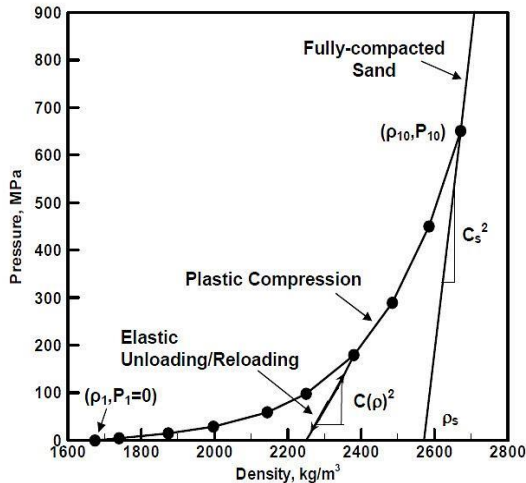
در این نمودار، α میزان تخلخل ماده را به‌صورت تابعی از حجم بیان می‌کند؛ بنابراین:

داشت (Lu & Wang, 2006; Lu, Wang, & Chong, 2005). در سال ۲۰۰۹ نقی و همکارانش حالت‌هایی از انفجارهای درون و سطح زمین و اثر تغییر عمق انفجار را بر قسمت سقف یک تونل مستطیلی بررسی و نتیجه گرفتند که افزایش خاک روی ماده منفجره باعث افزایش قدرت تخریب انفجار بر روی تونل خواهد شد (Nagy, Mohamed, & Boot, 2010). در سال ۲۰۱۵ مبارکی و همکارش مقطع جعبه‌ای شکل یک تونل واقعی را مدل کردند. آن‌ها اثر موج انفجار سطحی را بر سه نقطه از تونل بررسی کرده و نتیجه می‌گیرند که سقف تونل و نزدیک‌ترین نقطه به محل انفجار، بحرانی‌ترین قسمت تونل در مقابل بارهای انفجار سطحی خواهد بود (Mobaraki & Vaghefi, 2015). تیواری و گروهش نیز اثر ضخامت جداره تونل، زاویه گسیختگی خاک و وزن خرج انفجاری را تحت یک انفجار درونی بررسی کردند و بیان کردند که کاهش مقدار ماده منفجره، افزایش زاویه گسیختگی خاک و افزایش ضخامت جداره تونل در کاهش تغییر شکل تونل و محیط اطراف آن مؤثر است (Tiwari, Chakraborty & Matsagar, 2014).

همچنین در سال ۲۰۱۲ لئو لاین و همکارش نشان دادند که چگالی خاک در مقدار سرعت حرکت موج انفجار در خاک و اثر بار انفجاری بر مقطع تونل مؤثر است. آن‌ها در فعالیت خود از نرم‌افزار AUTODYN کمک گرفتند که به دلیل محیط گرافیکی بسیار عالی، کاربری آسان و قدرت بالا در تحلیل، یکی از بهترین نرم‌افزارها، در زمینه‌ی مسائل مرتبط با انفجار است (Laine & Larsen, 2012). صفا و همکارش هم در سال ۱۳۹۴ با استفاده از همین نرم‌افزار، اثر مسیرهای انحرافی در تونل را در مقابل انفجارهای خارج از تونل بررسی کردند و با تغییر مقدار و فاصله خرج انفجاری از دهانه تونل، به یک فاصله بهینه برای اجرای موج گیر از دهانه تونل دست یافتند (Peyman & Tahmasbzadeh, 2015).

لذا با توجه به این مقدمه، این مقاله قصد دارد تا با مدل‌سازی ماده منفجره، دال محافظ، تونل و محیط پیرامونی آن شامل هوا و خاک، در هایدروکد AUTODYN که جزو قوی‌ترین نرم‌افزارها در این زمینه است، شرایطی از یک انفجار واقعی در سطح زمین و اثر موج ناشی از آن بر سازه تونل را بررسی کند. برای این منظور ابتدا با تغییر

محاسبه و مبتنی بر معادله‌ای است که فرایند شوک را با استفاده از خواص ترمودینامیکی نشان می‌دهد (Gholizad, Rajabi, & Tech, 2013).



شکل ۲- رابطه بین چگالی و فشار در خاک معروف به نمودار ده تکه‌ای مورد استفاده در نرم افزار (Laine & Sandvik, 2001)

۲-۳- هوا

رابطه (۳) که برای تعریف گازهای ایده‌آل کاربرد دارد، اصلی‌ترین رابطه در مدل‌سازی هوا در این مقاله است (Yusof et al., 2014).

$$P = (\gamma - 1)\rho e \quad (3)$$

در این رابطه، γ نسبت ضرایب گرمای ویژه در حالت فشار ثابت به حجم ثابت است که از طریق رابطه (۴) قابل محاسبه است:

$$\gamma = CP / CV \quad (4)$$

در اینجا مقدار γ در فشارهای کم برابر با ۱٫۴ است و در فشارها و دماهای بالا نیز به واسطه یونیزه شدن و تجزیه گاز، مقدار آن به بیشتر از این مقدار نخواهد رسید (Zakrisson, 2010). مقدار چگالی برحسب kg/m^3 و P فشار برحسب پاسکال است. e نیز انرژی درونی اولیه برحسب kg/k است که حاصل ضرب گرمای ویژه در حجم ثابت C_V ، در دمای گاز T (برحسب کلونین) است (Zhang, Cheng, & Liu, 2014). چگالی اولیه هوا بر اساس مرجع نام‌برده در کتابخانه نرم‌افزار، $1,225 kg/m^3$ ، دمای مرجع $288,2 K$ ، دمای ویژه در حجم ثابت $717,6 J/kg$ و دمای

$$\alpha = V/V_S \quad (1)$$

در رابطه (۱)، V ، حجم مشخصی از ماده متخلخل و V_S حجم مشخص بخش جامد ماده (بدون فضای خالی) است. لازم به ذکر است که در شرایط فشردگی کامل $\alpha = 1$ خواهد بود (Ansys Inc, 2005). سایر مشخصات برای بتن در جدول ۱، آمده است.

جدول ۱- مهم‌ترین مشخصات بتن استفاده شده

مقدار	واحد- نوع	شرح
---	P -alpha	معادله حالت
۲٫۷۵	g/Cm^3	چگالی مرجع
۲٫۱۴	g/Cm^3	چگالی متخلخل
۳۵٫۲۷	GPa	مدول بالک
---	RHT Concrete	مدول گسیختگی
---	RHT Concrete	مدل مقاومت
۱۶٫۷	GPa	مدول برشی
۰٫۰۳۵	GPa	مقاومت فشاری
۰٫۰۱	---	مقاومت کششی

۲-۲- خاک

در سال ۲۰۰۱ معادله حالت تراکمی توسط Laine و Sandvik ارائه شد. این معادله متکی بر آزمایش آزمون سه محوره است که با منحنی تراکم پلاستیک که در شکل ۲ آمده است، توصیف می‌شود. از آنجایی که نتایج حاصل از این معادله تطابق خوبی با واقعیت رفتار خاک دارد لذا در این مقاله از آن استفاده شده است. ضمن آنکه این معادله به‌عنوان معادله اصلی برای مدل کردن خاک در کتابخانه نرم‌افزار ذکر شده و کاربرد گسترده‌ای در توصیف رفتار خاک دارد (Ansys Inc, 2005; Laine & Sandvik, 2001).

این تابع چندجمله‌ای فشار- چگالی که برای مواد متخلخل پیچیده مانند خاک کاربرد دارد شکل خاصی از معادله حالت مای-گرانیشن در رابطه (۲) است.

$$P = PH + \Gamma \rho (e + eH) \quad (2)$$

در اینجا، P فشار (مجموع فشار منفذی و مؤثر) در ساختار خاک برحسب پاسکال، ρ چگالی فعلی خاک برحسب kg/m^3 ، پارامتر گاما گرانیشن برحسب Nm/J ، e چگالی انرژی داخلی برحسب J/kg و زیرنویس H به معنای مرجع شوک هوگونویوت سطح است که یک کمیت قابل

ازای واحد حجم برحسب مگا بار و V حجم محصولات حاصل از فرآیند انفجار به حجم اولیه ماده منفجره و یا چگالی آن‌ها است (Lee, Finger, & Collins, 1973). مشخصات مربوط به ماده منفجره استاندارد TNT مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۳ موجود است.

$$p = A \times \left(1 - \frac{w}{R_1 V}\right) \times e^{(-R_1 V)} + B \left(1 - \frac{w}{R_2 V}\right) \times e^{(-R_2 V)} + \frac{w}{V} E \quad (5)$$

جدول ۳- مهم‌ترین مشخصات ماده منفجره استفاده شده

شرح	واحد	نماد	مقدار
معادله حالت	---	JWL	---
چگالی مرجع	g/Cm^3	ρ_R	۱٫۶۳
پارامتر A	GPa	A	۳۷۳٫۷۷
پارامتر B	GPa	B	۳٫۷۴۷۱
پارامتر R_1	---	R_1	۴٫۱۵
پارامتر R_2	---	R_2	۰٫۹
پارامتر W	---	W	۰٫۳۵
انرژی حجم	GJ/m^3	E	۶

۳- توزیع موج انفجار در خاک

در انفجار مواد منفجره، در ابتدا چاشنی فعال می‌شود و با تحریک خرج‌های انفجاری، آن را به سرعت به توده گازی بسیار داغ، پرفشار و متراکمی تبدیل می‌کند که منشأ امواج پرقدرتی در محیط خواهند شد (Castellano et al., 1982). چنانچه بنا باشد این امواج پرقدرت در محیط خاک اعمال شوند، از نظر شدت و دوام، نسبت به انتشار آن‌ها در محیط هوا مخرب‌تر خواهند بود (TM5-855-1., 1986). برای محاسبه شدت موج انفجار در نقاط مختلف خاک می‌توان از فرمول نیمه تجربی زیر که در آیین‌نامه محافظت در برابر انفجار آمریکا TM5-855-1 آمده است، استفاده کرد.

$$V_0 = 48.768 f \left(\frac{2.52R}{W^{1/3}} \right)^{-n} \quad (6)$$

$$P_0 = 22620.59 \rho_c V_0 \quad (7)$$

در روابط (۶) و (۷)، P_0 حداکثر اضافه فشار انفجار در میدان آزاد برحسب پاسکال، R فاصله هدف (فاصله

ویژه در فشار ثابت $100464 J/kg \cdot K$ در نظر گرفته شده است (Rogers & Mayhew, 2003)، در نتیجه مقدار γ برابر ۱٫۴ و مقدار e هم $206812 kJ/kg$ محاسبه خواهد شد. بعلاوه نیاز به تعریف روابط مقاومت یا شکست برای هوا نیست زیرا هوا نوعی گاز است و مقاومتی در برابر تنش‌های برشی یا فشارهای منفی ندارد (Pandurangan, 2009).

۲-۴- فولاد

برای توصیف رفتار مسلح کننده‌های فولادی در سازه بتنی از معادله حالت خطی استفاده شده است. این معادله رفتار خطی بین کرنش حجمی و فشار در فولاد را بیان می‌کند که به وسیله مدول بالک K به یکدیگر مرتبط می‌شوند. رفتار مقاومتی فولاد نیز با مدل جانسون- کوک تعریف شده است که با لحاظ کردن اثرات سختی، نرخ کرنش و درجه حرارت، کاربرد فراوانی در شبیه‌سازی مسائل مربوط به انفجار برای مصالح فولادی دارد و در کتابخانه نرم‌افزار یکی از معادلات اصلی برای توصیف مصالح فولادی است. شبیه‌سازی شکست نیز با مدل شکست ناشی از کرنش پلاستیک مقدور است. در جدول ۲، کلیه پارامترهای گفته شده برای فولاد مصرفی آمده است (Gholizad et al., 2013).

جدول ۲- مهم‌ترین مشخصات فولاد استفاده شده

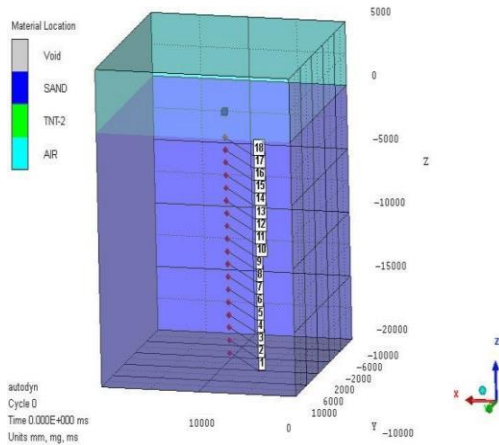
شرح	واحد	نماد	مقدار
معادله حالت	---	Shock	---
چگالی مرجع	g/Cm^3	ρ_R	---
مدل مقاومت	---	Johnson cook	---
مدول برشی	GPa	E_T	۸۱٫۸
تنش تسلیم	GPa	F_y	۰٫۳۵
دمای ذوب	K	T	۱۸۱۱

۲-۵- ماده منفجره

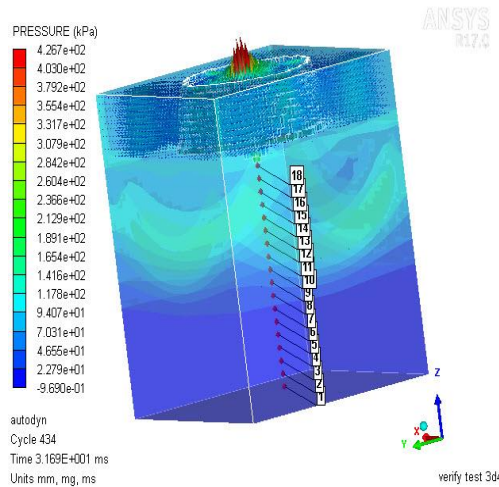
در این مقاله برای معرفی مواد منفجره TNT به نرم‌افزار از معادله JWL که به کمک قانون ترمودینامیک، مواد منفجره شیمیایی را مدل می‌کند استفاده شده است (Vannucci, Masi, & Stefanou, 2017).

در رابطه (۵) که همان رابطه‌ی JWL است، A و B و R_1 و R_2 و w ثابت‌های مربوط به ماده منفجره بوده که از طریق آزمایش‌های تجربی قابل استخراج هستند، E انرژی به

جریان مواد فراهم شده است. این شرایط اجازه حرکت مواد و جابجایی انرژی را بدون ایجاد آثار منفی بر سایر موارد فراهم می‌سازند. به خاطر تمرکز بیشتر موج انفجار بر روی محیط خاک چاشنی انفجار در بالاترین قسمت خرج قرار داده شده است.



شکل ۳- هندسه مدل و موقعیت سنج‌ها



شکل ۴- توزیع تنش در میانه تحلیل در هندسه مدل گسترش موج انفجار در خاک

پس از اتمام تحلیل و بهینه‌سازی نتایج، حداکثر اضافه فشارهای ثبت‌شده توسط حس‌گرها در عمق‌های مختلف، با نتایج حاصل از رابطه (۷) که در آیین‌نامه *TM5-855-1* آمده است مقایسه شد که همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود از انطباق خوبی برخوردار است (کمتر از ۵ درصد).

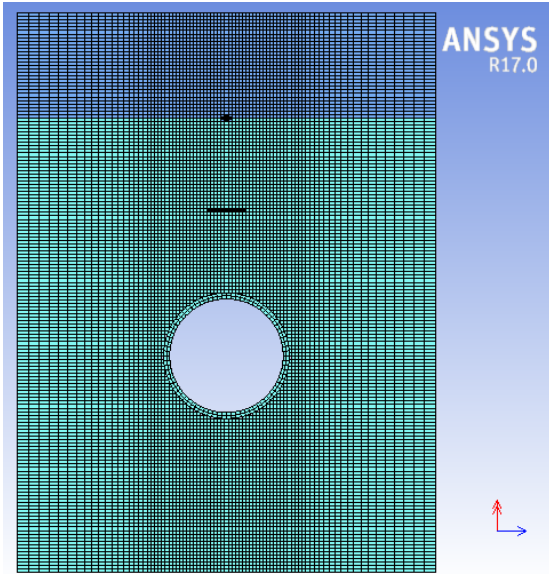
مرکزجرمی خرج تا هدف) برحسب متر، V_0 حداکثر سرعت انتشار موج انفجار در خاک برحسب متر بر ثانیه و f ضریب اتصال محیط واسط با خرج انفجاری است که با استفاده از عمق مقیاس شده از مرجع (*TM5-855-1*, 1986) قابل استخراج است و مقدار آن در اینجا با توجه به نوع انفجار که در سطح زمین است، $0/4$ خواهد بود. ρ_c مقاومت صوتی برحسب پاسکال بر متر بر ثانیه، W وزن خرج انفجاری برحسب کیلوگرم، n ضریب کاهش (ضریب میرایی خاک) است که همه این مقادیر در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴- مقادیر استفاده‌شده در مدل توزیع موج انفجار

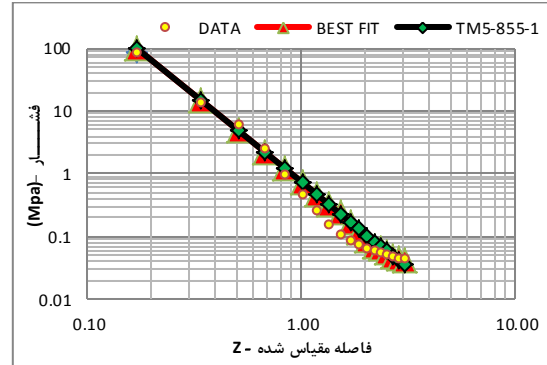
مقدار	نماد	واحد	شرح
۱ تا ۱۸	R	m	فاصله خرج تا هدف
۰/۴	f	---	ضریب اتصال
۴/۹۷۷	ρ_c	$Pa.s/m$	مقاومت صوتی
۲۰۳/۸	W	kg	وزن خرج انفجاری
۲/۷۵	n	---	ضریب کاهش

۳-۱- مدل هندسی

در این قسمت به بررسی توزیع موج انفجار در محیط خاک پرداخته شده و برای این کار از یک هندسه سه‌بعدی کامل مانند آنچه در شکل ۳ و ۴ دیده می‌شود، استفاده شده است. خاک، ماده منفجره و هوا در محیط اویلری شبیه‌سازی شده است. یکپارچه‌سازی محیط اویلری باعث می‌شود تا ارتباط بین محیط‌های سیال و نیمه سیال برای نرم‌افزار نیاز به تعریف خاصی نداشته باشد و درعین حال دقت تحلیل افزایش یابد. حس‌گرهایی جهت ثبت داده‌ها در فواصل ۱ تا ۱۸ متر (هر یک متر) زیر خرج انفجاری و در محیط خاک قرار داده‌شده‌اند. محیط خاک $20 \times 20 \times 20$ متر از مصالح ماسه با مدل حالت تراکمی، شبیه‌سازی شده است و ابعاد محیط هوا نیز که گاز ایدال در نظر گرفته شده $20 \times 20 \times 5$ متر است و در نهایت خرج انفجاری از نوع *TNT* با وزن $203/75$ کیلوگرم انتخاب شده است که داده‌های کامل این مصالح و معادلات آن قبلاً تشریح شده‌اند. برای مرزهای محیط خاک با فضای خارج از هندسه از شرط مرزی انتقال انرژی و برای مرزهای محیط هوا با خارج مدل، شرایط



شکل ۷- هندسه مدل و مش بندی مقطع و دال محافظ



شکل ۵- مقایسه نتایج با آیین‌نامه آمریکا TM5-855-1

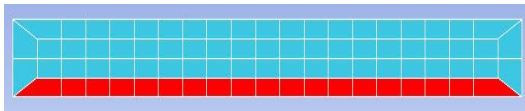
۴- بررسی موقعیت و ابعاد دال‌های محافظ

در ادامه این پژوهش مقطع یک تونل دایره‌ای با ضخامت دیواره ۳۵ سانتی‌متر (که امروزه بیشتر مرسوم است) و دال محافظ بالای آن به هندسه قبلی افزوده می‌شود. همان‌طور که در مقدمه بیان شد در چنین فعالیت‌هایی نتایج تحلیل با مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی بسیار به هم نزدیک است. لذا جهت صرفه‌جویی در وقت و افزایش سرعت تحلیل، در باقی مدل‌ها از مقاطع دوبعدی استفاده شده است. در ابتدا عمق قرارگیری دال محافظ (چه به صورت بتن مسلح با آرماتورهای داخلی و چه به صورت کامپوزیت با ورق فولاد در زیر آن) و در ادامه ابعاد هندسی آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سایر مراحل و تنظیمات مانند مرحله گسترش موج انفجار در خاک خواهد بود. شکل ۶، مقطع تونل دایره‌ای و شکل ۷، هندسه کل مدل و مش‌بندی گردید شده (فشرده‌گی شبکه در نواحی حساس) را نشان می‌دهد.

۴-۱- ارزیابی عمق قرارگیری دال محافظ تونل

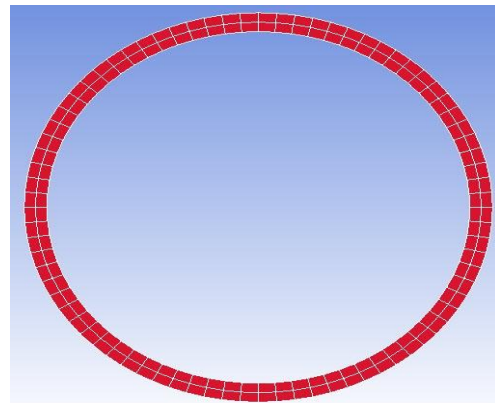
(معمولی و کامپوزیتی با صفحه فولادی)

دال‌های محافظ، سازه‌هایی عموماً بتنی هستند که برای محافظت از تونل‌ها در برابر بارهای محیطی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این بخش از پژوهش تغییر عمق دفن دال محافظ (بین ۰٫۸، ۱٫۶، ۳، ۵ و ۸ متری نسبت به مرکز خرج انفجاری) بررسی شد. در ادامه نیز، رفتار یک دال محافظ کامپوزیتی فولادی-بتنی با یک لایه ورق فولادی در پایین آن ارزیابی شده است. در شکل ۸، نوع هندسه و مش بندی دال محافظ کامپوزیتی را مشاهده می‌کنید.

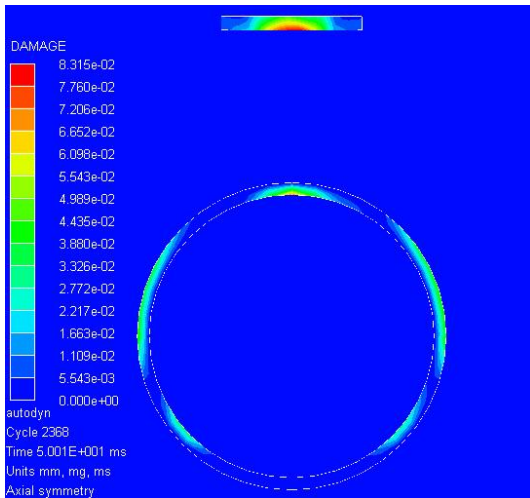


شکل ۸- هندسه و مش بندی دال محافظ کامپوزیت

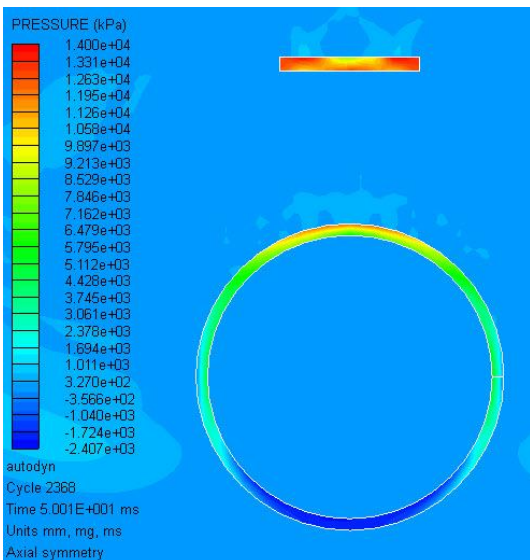
مش‌بندی دال به گونه‌ای انتخاب شده است تا گره‌های آن دقیقاً بر گره‌های محیط خاک منطبق باشند تا دقت و سرعت تحلیل افزایش یابد. شکل ۹ و جدول ۵ کرنش مؤثر، فشار حداکثر و مقدار جابجایی ثبت‌شده توسط حسگرها در نزدیک‌ترین نقطه تونل به مرکز انفجار در هنگام حضور یک دال بتنی معمولی را نشان می‌دهد.



شکل ۶- هندسه مدل و مش بندی مقطع دایره‌ای تونل



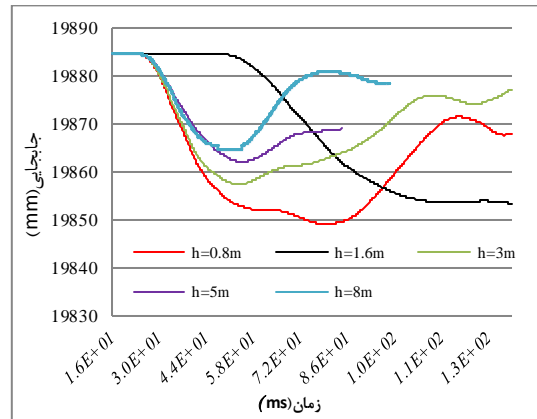
شکل ۱۰- توزیع خسارت در زمان ۵۰ میلی ثانیه در مقطع تونل و دال در فاصله ۵ متری از مرکز انفجار



شکل ۱۱- توزیع فشار در زمان ۵۰ میلی ثانیه در مقطع تونل و دال در فاصله ۵ متری از مرکز انفجار

اما در ادامه با مدل شدن یک دال مرکب با ورقه‌های از فولاد در زیر آن، بررسی‌های این قسمت تکمیل تر شده است. جدول ۶، نتایج اجرای این نوع دال بین مرکز انفجار و تونل را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در نتایج جدول مشاهده می‌شود، در اینجا نیز هرچه سازه دال در عمق کمتری از سطح زمین و دورتر از تونل اجرا شود تأثیر کمتری در محافظت از آن در



شکل ۹- زمان - جابجایی ثبت شده برای بحرانی ترین نقطه مقطع در عمق‌های مختلف

همان‌طور که مشاهده می‌کنید با دور شدن دال از سازه تونل و نزدیک شدن آن به مرکز انفجار، مقدار تغییر شکل تونل و جابجایی مقطع آن در این نوع بارگذاری افزایش می‌یابد و هرچه دال در فاصله کمتری از سازه تونل اجرا گردد، محافظت بیشتری از آن صورت خواهد گرفت. در توجیه این امر می‌توان گفت که نزدیک بودن دال به سازه تونل (و البته در مسیر محور حرکتی موج) باعث پوشش کامل تر آن در مقابل امواج مستقیم و بازتابی انفجار می‌گردد

جدول ۵- نتایج حاصل از بررسی عمق دفن دال محافظ تونل برای بحرانی ترین نقطه مقطع

عمق دفن دال	حد اکثر فشار (MPa)	حد اکثر کرنش مؤثر	حد اکثر جابجایی (mm)
۰٫۸	۱۶٫۶	۰٫۰۰۱۵۶	۳۶
۱٫۶	۱۶٫۱۷	۰٫۰۰۱۴۴	۳۳
۳	۱۴٫۹۴	۰٫۰۰۱۱۴۶	۲۷
۵	۱۳٫۸۴	۰٫۰۰۰۹۲۴	۲۳
۸	۱۱٫۷۷	۰٫۰۰۰۸۳	۲۰

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ توزیع خسارت و فشار را در مقطع تونل و دال محافظ آن که در فاصله ۵ متری از مرکز انفجار و ۵ متری از تونل قرار دارد را در زمان ۵۰ میلی‌ثانیه مشاهده می‌کنید.

بین سازه تونل و مرکز خرج انفجاری شبیه‌سازی شده و اثر دو کمیت l و b که طول و ضخامت دال محافظ می‌باشند، بررسی شده است. نتایج ثبت‌شده توسط حسگرهای تعبیه‌شده در پوسته تونل در جدول ۷ و شکل ۱۳ آمده است.

جدول ۷- نتایج بررسی تأثیر ابعاد دال محافظ بر کاهش آثار ناشی از انفجار بر مقطع تونل در بحرانی‌ترین نقطه مقطع

ابعاد دال (mm)	حداکثر فشار (MPa)	جابجایی (mm)	کرنش مؤثر
۱۱۰۰×۲۰۰	۱۵٫۶۲۶	۲۴	۰٫۰۰۱۱۹
۱۱۰۰×۳۰۰	۱۵٫۶۳۸	۲۳	۰٫۰۰۱۱۸
۱۱۰۰×۴۰۰	۱۵٫۳۷	۲۲	۰٫۰۰۱۱۷
۱۱۰۰×۵۰۰	۱۴٫۹۷	۲۱	۰٫۰۰۱۱۲۵
۲۱۰۰×۲۰۰	۱۴٫۳۱	۲۰	۰٫۰۰۱۰۸
۲۱۰۰×۳۰۰	۱۴٫۲۶	۲۰	۰٫۰۰۱۰۶
۲۱۰۰×۴۰۰	۱۴٫۱۳	۱۹	۰٫۰۰۱۰۳
۲۱۰۰×۵۰۰	۱۳٫۶	۱۸	۰٫۰۰۰۹۸
۴۱۰۰×۲۰۰	۱۶٫۰۶	۲۳	۰٫۰۰۱۲۲۹
۴۱۰۰×۳۰۰	۱۵٫۰۹	۲۱	۰٫۰۰۱۱۳
۴۱۰۰×۴۰۰	۱۵٫۰۱	۲۰	۰٫۰۰۱۰۷
۴۱۰۰×۵۰۰	۱۴٫۷۶	۱۹	۰٫۰۰۱۰۶

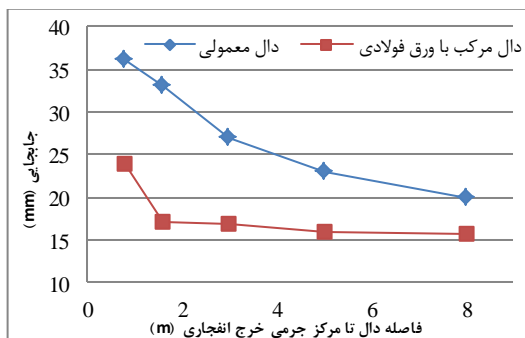
در تحلیل نتایج جدول ۷ می‌توان گفت که تغییر عرض (ضخامت) دال بتنی همواره اثر معکوس بر آثار مخرب انفجار بر تونل خواهد داشت یعنی افزایش ضخامت باعث کاهش و کاهش ضخامت باعث افزایش آثار مخرب انفجار بر سازه تونل خواهد شد. در واقع با افزایش ضخامت دال بتنی بار بیشتری از موج انفجاری توسط سازه دال جذب خواهد شد؛ و مقدار کمتری از این بار (حداقل به صورت مستقیم) از آن عبور خواهد کرد؛ اما از طرفی نتایج نشان می‌دهند که تغییرات طول دال بتنی اثر قابل پیش‌بینی در محافظت از تونل ندارد. گرچه تا یک مقدار مشخص این روند قابل پیش‌بینی است. به‌طور کلی با افزایش طول دال بتنی، سطح بزرگ‌تری از امواج انفجار با مانع مواجه می‌شود اما این روند کلی نیست و با ادامه روند افزایشی طول، سطح بارگیر دال افزایش یافته و در نتیجه دال در ناحیه مرکزی خود دچار

مقابل بارها انفجاری خواهد داشت. در شکل ۱۲ اثر عمق دفن دال‌های معمولی و مرکب را در یک نمودار باهم مقایسه شده است.

جدول ۶- نتایج حاصل از بررسی اثر عمق قرارگیری دال کامپوزیت فولادی برای بحرانی‌ترین نقطه مقطع

عمق دفن دال	حداکثر فشار (MPa)	کرنش مؤثر	جابجایی (mm)
۰٫۸	۱۶٫۸۲	۰٫۰۰۱۳	۲۴
۱٫۶	۱۳٫۰۵	۰٫۰۰۰۹۸	۱۷
۳	۱۲٫۴۸	۰٫۰۰۰۹۰	۱۷
۵	۱۲٫۳۹	۰٫۰۰۰۹۰	۱۶
۸	۱۱٫۶۴	۰٫۰۰۰۸۴	۱۶

همان‌طور که در نمودار شکل ۱۲، مشهود است، دال محافظ مرکب در مقایسه با دال ساده باعث کاهش بیشتر آثار مخرب بار انفجار شده و ضمناً اگر بنا باشد سازه محافظ در فاصله دورتری از سازه تونل اجرا شود، استفاده از دال مرکب بیشتر توصیه می‌شود؛ اما هرچه دال به سازه تونل نزدیک‌تر شود، میزان محافظت این دال‌ها نیز بیشتر به هم نزدیک می‌شود.



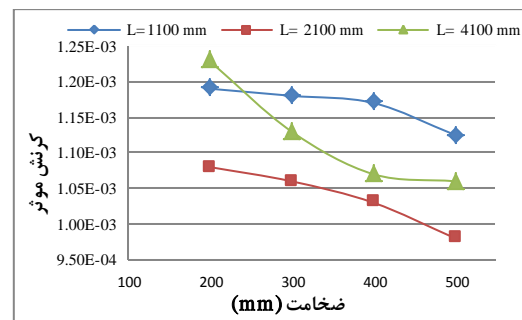
شکل ۱۲- مقایسه اثر عمق دفن دال محافظ در دو حالت دال معمولی و مرکب با ورق فولادی

۴-۲- بررسی ابعاد (طول و ضخامت) دال محافظ در کاهش آثار مخرب انفجار بر تونل

در ادامه این پژوهش اثر تغییر ابعاد دال بر میزان محافظت از تونل در مقابل بارهای انفجاری بررسی شده است. همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، دال‌هایی با ابعاد مختلف

- گردد.
- با دور شدن از سازه تونل و نزدیک شدن به مرکز انفجار، برای محافظت از تونل بهتر است از سازه دال مرکب استفاده شود و چنانچه محافظت در نزدیکی سازه تونل مدنظر باشد تفاوت زیادی بین دو نوع دال ساده و مرکب وجود ندارد هرچند باز هم دال مرکب بهتر عمل می‌کند.
- با افزایش طول دال محافظ نمی‌توان آثار انفجار بر سازه تونل را پیش‌بینی کرد هرچند تا یک مقدار مشخص این افزایش قابل پیش‌بینی است.
- افزایش ضخامت دال محافظ همواره آثار مثبت و قابل پیش‌بینی بر کاهش آثار مخرب انفجار بر سازه تونل خواهد داشت و افزایش آن باعث کاهش این آثار خواهد شد.

تغییر شکل و خمش بیشتری خواهد شد که همین موضوع تنش و کرنش وارده به تونل را افزایش خواهد داد. (مانند تیرها با تکیه‌گاه‌های ساده، هنگامی‌که باری بیش از ظرفیت به آن اعمال شود، دچار خمش و افتادگی بیش‌ازحد می‌شوند و بعضاً نیز ظرفیت باربری خود را به‌طور کامل از دست می‌دهند. بعلاوه هرچه مقدار این افتادگی بیشتر باشد، زاویه برخورد موج انفجار با دال به نود درجه نزدیک‌تر شده و کمتر بازتاب می‌کند).



شکل ۱۳- نمودار ابعاد دال - کرنش مؤثر ثبت شده در بحرانی‌ترین نقطه مقطع

۶- فهرست نمادها

در جدول ۸ نمادهای استفاده شده در متن خلاصه شده است.

جدول ۸- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح
R	M	فاصله
f	---	ضریب اتصال
ρ_c	$Pa.s/m$	مقاومت صوتی
W	Kg	وزن
P	Pa	فشار
V	m/s	سرعت
P	g/Cm^3	چگالی
t	S	زمان
E	J	انرژی
T	K	دما
e	---	کرنش
n	---	ضریب کاهش
γ	---	نسبت ضرایب ویژه

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله با شبیه‌سازی ابعاد و شرایط واقعی از یک انفجار سطحی، آثار این نوع انفجار بر روی تونل در شرایطی که یک دال محافظ بین آن و انفجار قرار می‌گیرد با نرم‌افزار *ANSYS-AUTODYN* بررسی و اثر تغییر عمق دفن دال محافظ و ابعاد آن ارزیابی شد؛ که نتایج مربوطه به این شرح است:

- هرچه دال محافظ بتنی در فاصله نزدیک‌تری به سازه تونل اجرا گردد در کاهش آثار مخرب انفجار بر سازه تونل مؤثرتر خواهد بود.
- چنانچه برای محافظت از تونل از دال مرکب با صفحه فولادی در زیر آن استفاده شود، همانند دال بتنی معمولی بهتر است که در فاصله نزدیک‌تری از سازه تونل اجرا

۷- مراجع

- Ansys Inc. (2005). *Autodyn theory manual revision 4.3*. In.
- Brannon, R. M., & Leelavanichkul, S. (2009). *Survey of four damage models for concrete*. Sandia National Laboratories, 32(1), 1-80.
- Castellano, A. J., Caltagirone, J. P., Sock, F. E., Dobbs, N., RESEARCH, A. A., & MO., D. C. S. L. (1982). *Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions (TM 5-1300, NAVFAC P-397, AFM 88-22)*. Revision of Tri-Service Regulatory Design Manual: Defense Technical Information Center.
- Gholizad, A., Rajabi, M. J. J. P. D. S., & Tech. (2013). *Securing the Buried Concrete Structure against Blast Loading*. 3, 167-179.
- Laine, L., & Larsen, O. P. (2012). *Implementation of equation of state for dry sand in Autodyn*. Paper presented at the 83th proceedings of shock and vibration symposium, shock and vibration exchange. New Orleans, Louisiana: Shock and Vibration Exchange.
- Laine, L., & Sandvik, A. (2001). *Derivation of mechanical properties for sand*. Paper presented at the Proceedings of the 4th Asia-Pacific Conference on Shock and impact loads on structures, CI-Premier PTE LTD, Singapore.
- Lee, E., Finger, M., & Collins, W. (1973). *JWL equation of state coefficients for high explosives (UCID-16189 United States 10.2172/4479737 Dep. NTIS LLNL English)*. Retrieved from <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/4479737>
- Lu, Y., & Wang, Z. (2006). *Characterization of structural effects from above-ground explosion using coupled numerical simulation*. Computers & Structures, 84(28), 1729-1742. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2006.05.002>
- Lu, Y., Wang, Z., & Chong, K. (2005). *A comparative study of buried structure in soil subjected to blast load using 2D and 3D numerical simulations*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 25(4), 275-288. doi:<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2005.02.007>
- Mobaraki, B., & Vaghefi, M. (2015). *Numerical study of the depth and cross-sectional shape of tunnel under surface explosion*. Tunnelling and Underground Space Technology, 47, 114-122. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.01.003>
- Nagy, N., Mohamed, M., & Boot, J. C. (2010). *Nonlinear numerical modeling for the effects of surface explosions on buried reinforced concrete structures*. Geomechanics and Engineering, 2, 1-18. doi:10.12989/gae.2010.2.1.001
- Pandurangan, B. (2009). *Development, parameterization and validation of dynamic material models for soil and transparent armor glass*: Clemson University.
- Peyman, S., & Tahmasbzadeh, M. (2015). *Effect of Blast Wave Trap in Tunnels With 90 Degrees Bend on Reduction of Pressure Produced by a Explosion Outside the Tunnel*.
- Rogers, G. F. C., & Mayhew, Y. R. (2003). *Thermodynamic and transport properties of fluids: SI units*. Oxford: Blackwell.
- TM5-855-1., U. S. D. o. t. A. (1986). *Fundamentals of protective design for conventional weapons*. [Washington, DC]: Headquarters, Dept. of the Army.
- Tiwari, R., Chakraborty, T., & Matsagar, V. (2014). *Dynamic analysis of underground tunnels subjected to internal blast loading*. Paper presented at the World Congress of Computational Mechanics (WCCM XI), Barcelona.

Vannucci, P., Masi, F., & Stefanou, I. (2017). A study on the simulation of blast actions on a monument structure.

Wang, Z., Lu, Y., Hao, H., & Chong, K. (2005). A full coupled numerical analysis approach for buried structures subjected to subsurface blast. *Computers & Structures*, 83(4), 339-356. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2004.08.014>

Yusof, M. A., Rosdi, R. N., Nor, N. M., Ismail, A., Yahya, M. A., & Peng, N. C. (2014). Simulation of reinforced concrete blast wall subjected to air blast loading. *Journal of Asian scientific research*, 4(9), 522-533.

Zakrisson, B. (2010). *Numerical and experimental studies of blast loading*. Luleå tekniska universitet,

Zhang, P., Cheng, Y., & Liu, J. (2014). Numerical analysis of dynamic response of corrugated core sandwich panels subjected to near-field air blast loading. *Shock and Vibration*, 2014.

Effect of Position and Dimensions of Tunnel Guard Slabs on the Reduction of Ground-Level Explosion Loads

H. Hosseini Nassab¹; S. M. Movahedifar²

1. M.Sc. Student in Structural Engineering; Young Researchers and Elites Club, Birjand Branch, Islamic Azad University, Birjand, Iran.

2. Assistant Professor; Department of civil Engineering, Neyshabur Branch, Islamic Azad University, Neyshabur, Iran

Received: 31 Jan 2018; Accepted: 6 Jan 2019

DOI:10.22044/TUSE.2019.6711.1334

Keywords

**Buried Tunnel
Surface Explosion
Dynamic Nonlinear Analysis
AUTODYN**

Extended Abstract

Summary

Study on buried tunnels that are vital arteries in each country, has always been faced with many difficulties due to the implementation of these structures in the complex soil environment. On the other hand, due to increasing security threats in recent years, evaluating the behavior of these structures against blast loads has been felt more than ever. Therefore, in this study, effects of surface explosion on a buried tunnel has been investigated using nonlinear dynamic analysis in ANSYS-AUTODYN software. The effect of the blast wave propagation in soil is simulated with a full geometry in a Three-dimensional (3D) environment and after ensuring the accuracy of the results, the effects of the burial depth of tunnel protective slab and its dimensions in reducing the destructive effects of the explosion is evaluated in a Two-dimensional (2D) environment. The results indicate that better protection of the tunnel will be achieved if the slab is closer to the tunnel structure. Increasing the thickness of the slab always reduces the effects of the explosion on the tunnel but the change in the length of slabs cannot be a good indicator for prediction of the blast loads effects on the buried tunnel.

Introduction

As enemy weapons are in progress in kind and power, our purpose in this research is to find some methods for making tunnels more safe facing blast loads. Security slabs are the tools that we use to guard the structures of tunnels facing blast loads. Here, we study physics of this security slabs as well as their geometries and distances from the tunnels. Evaluation of other effective parameters of a slab such as the kind of materials and its cross-section seems to be acceptable for future studies of guard slabs of tunnels.

Methodology and Approaches

In this study, we simulate a complete condition of a surface blast, tunnel and its security slab, soil and air environment. An Eulerian algorithm and dynamic nonlinear analysis are used in the ANSYS-AUTODYN software to simulate the effects of blast loads on tunnel section. In this study, a 3D model is used for blast load propagation in soil while a 2D model is used when we have axial symmetry.

Results and Conclusions

The results of this study show that pressures and effective strain on tunnels will increase by increasing the distances of slabs from tunnel structures, and when a security slab is placed closer to a tunnel liner, it will be more effective than when it is closer to the ground surface. The results also indicate that increment of the length of the slab is not necessary to be more than a specified length. In addition, increment of the thickness of the slab is always effective in reduction of destructive blast loads on the tunnel sections.
