



شبیه سازی انفجار سازه های زیرزمینی برای کاربردهای مختلف به روش تفاضل محدود

اشکان قلی پور نوروزی^{۱*}، شایان ساکی پور^۲، معین محمدی زاده^۱

۱- دانشکده مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
۲- دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۸
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۲۸
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹

کلمات کلیدی:

تحلیل دینامیکی
پرتابه نفوذی
سازه زیرزمینی
انفجار
روش عددی

خلاصه: تحلیل سازه های زیرزمینی تحت انفجار با توجه به پیچیدگی بارگذاری دینامیکی انفجار و رفتار خاک دارای چالش هایی می باشد. با توجه به نقش سازه های زیرزمینی به عنوان پناهگاه و آسیب پذیری این سازه ها در برابر بارهای انفجاری، نیاز به بررسی و تحلیل اثر انفجار بر این سازه ها احساس می شود. هدف این مطالعه بررسی تأثیر فاصله پرتابه انفجاری از سازه زیرزمینی و قطر کره انفجاری بر سازه زیرزمینی می باشد. بدین منظور با استفاده از روش تفاضل محدود و تحلیل دینامیکی سازه زیرزمینی برای فاصله های مختلف پرتابه انفجاری و قطرهای مختلف کره انفجاری شبیه سازی گردید. در این مطالعه انتشار امواج انفجار به صورت کره ای با اعمال فشار انفجار بر دیواره کره انفجاری در نظر گرفته شد. نتایج نشان می دهند که با افزایش فاصله سازه زیرزمینی از مرکز انفجار، فشار بیشینه خاک بر روی سیستم نگهداری و همچنین گشتاور خمشی و نیروی محوری در تاج و دیواره سازه نگهداری تونل به صورت نمایی کاهش می یابند. همچنین پس از رسیدن موج انفجار به سیستم نگهداری تونل، جابجایی و سرعت عمودی ذرات سیستم نگهداری در تاج تونل (که دقیقاً زیر مرکز کره انفجاری قرار دارد) بیشترین مقدار را دارد. با افزایش قطر کره انفجاری، گشتاور خمشی در تاج و دیواره تونل تقریباً به صورت خطی افزایش می یابد که این شیب برای تاج تونل سه برابر دیواره می باشد.

۱- مقدمه

در دهه های اخیر به علت تهدیدات تروریستی در سراسر جهان و تأثیر این پدیده بر روی فضای زیرزمینی، تأثیر امواج ناشی از انفجار پرتابه های نفوذی بر روی سیستم نگهداری فضاهای زیرزمینی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است [۱]. تحلیل اثر بارگذاری انفجار بر روی سازه، از دهه ۱۹۶۰ آغاز گردید. در سال ۱۹۵۹، ارتش آمریکا، نشریه ای تحت عنوان سازه های مقاوم در برابر اثرات انفجارهای تصادفی منتشر نمود [۲]. بعد از حوادث انفجاری سال ۲۰۰۴ در مترو لندن و سال ۲۰۱۰ در مترو مسکو که منجر به کشته شدن ۴۰ نفر شد، تحلیل پایداری تونل ها تحت بار انفجار توسط محققین بیشتری مورد توجه قرار گرفت [۱].

رمینکوف در سال ۲۰۰۳، روش هایی را برای تخمین اثرات انفجار بمب بر سازه ها، مورد مطالعه قرار داد. برای حالتی که یک سازه تحت اثر بارگذاری انفجار ناشی از انفجار وسایل انفجاری با قدرت بالا قرار می گیرد، تکنیک های تحلیلی ساده شده ای برای تخمین های محافظه کارانه اثرات انفجار بر سازه ها

ارائه کرد [۳]. نگلی و همکارانش در سال ۲۰۱۰، اثر یک انفجار سطحی را بر یک سازه بتنی مدفون در توده سنگ با استفاده از نرم افزار Abaqus مورد مطالعه قرار دادند. شبیه سازی انفجار با استفاده از معادلات حالت JWL صورت گرفت و به این ترتیب پدیده انفجار را به شکل مستقیم و به صورت یک پدیده ترمودینامیکی شبیه سازی کردند [۴]. یانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۰، اثر انفجار سطحی را بر یک حفاری مترو بررسی و پدیده انفجار را به شکل مستقیم و با استفاده از معادلات حالت JWL و توسط نرم افزار ANSYS/LS-DYANA شبیه سازی نمودند. نتایج، نشان داد که اگر حفاری مترو در عمق بیشتر از ۷ متر بوده و ماده انفجاری معادل کمتر از ۵۰۰ کیلوگرم تی ان تی باشد، حفاری مذکور ایمن خواهد بود [۵]. شاه نظری و همکارانش در سال ۲۰۱۰، از یک مدل دو بعدی اجزاء مجزا برای شبیه سازی اثر انفجار سنگ شکن نفوذی بر تونل راه آهن میانه- اردبیل استفاده کردند و نتیجه گرفتند که بیشترین جابه جایی در تاج تونل رخ می دهد که با داده های تجربی نیز همخوانی دارد [۶]. میرزینلی و همکارانش در سال ۲۰۱۰، به روش ابتکاری بیشینه فشار میدان آزاد، اثر انفجار پرتابه های متعارف در توده

* نویسنده عهده دار مکاتبات: Ashkancivil70@gmail.com



به ویژه در دیواره نزدیک به ماده منفجره با افزایش چگالی خرج گذاری ماده منفجره و کاهش فاصله دیواره فضای زیرزمینی از ماده منفجره، افزایش می‌یابد [۱۳]. رحیمی دیزجی و همکارانش در سال ۱۳۹۷، اثر پرتابه‌های زمین نفوذی انفجاری بر پایداری فضا‌های زیرزمینی را به روش شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار Flac 2D مورد مطالعه قرار دادند و با توجه به تأثیر متغیرهای متعدد بر این مسأله، تحلیل حساسیت روی پارامترهایی همچون عمق روباره، عرض دهانه حفاری و نسبت تنش‌های زمین (تنش افقی به تنش قائم) صورت گرفت. اثر هر کدام از پارامترها، بر میزان گسترش ناحیه خرابی در اطراف محل انفجار و فضای زیرزمینی و میزان تغییر شکل اطراف فضای زیرزمینی بررسی شد. بدین منظور، در مجموع حدود ۴۰ مدل عددی تحلیل و نتایج مورد نیاز استخراج گردید. با توجه به نتایج به دست آمده، دیده شد که با افزایش دهانه حفاری، ناحیه خرابی گسترش پیدا کرده و با افزایش عمق حفاری و نسبت تنش افقی به قائم، ناحیه خرابی کاهش پیدا می‌کند. همچنین، دیده شد که مهم‌ترین عاملی که پایداری فضای زیرزمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، عمق این فضا می‌باشد، به گونه‌ای که با افزایش عمق حفاری، میزان خرابی اطراف آن در برابر انفجار کاهش می‌یابد [۱۴].

گوانژان و همکاران در سال ۲۰۲۰ مطالعه‌ای جهت دستیابی به روابط توزیع بار ناشی از انفجارهای زیرزمینی بر روی پوشش‌های بتنی فضا‌های زیرزمینی با تاج منحنی انجام دادند و دریافتند موقعی که فاصله انفجار نیم و یک متر هست، همان‌طور که جرم ماده منفجره کاهش می‌یابد، شکل تابع توزیع بار از زین اسبی به مثلثی تغییر می‌یابد [۱۵]. در سال ۲۰۲۰ علیرضا رشیددل و همکاران به بررسی نیروها و ممان‌های القایی در پوشش سگمندی تونل مترو تهران تحت بارگذاری انفجار سطحی پرداختند. دو نوع روش در این مطالعه جهت تحلیل مورد استفاده قرار گرفت ۱- روش تیر-فتر^۲ (BSM) و ۲- روش جامد-فصل مشترک^۳ (SIM)). مورد بررسی قرار گرفت و انفجار ۵۰۰ کیلوگرم ماده منفجره از نوع TNT جهت مدل‌سازی عددی به روش تفاضل محدود دو بعدی جهت بارگذاری تونل در نظر گرفته شد. دو نوع درزه سگمندی شامل صفحه‌ای و انحنادار در مطالعه آن‌ها مدنظر قرار گرفت. همچنین مقایسه‌ای برای وضعیت نیروها و ممان القایی پوشش سگمندی با پوشش پیوسته انجام دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که پوشش سگمندی با درزه‌های انحنادار در خنثی‌سازی انفجار سطحی مؤثر و موفقیت‌آمیز می‌باشد. مقادیر ممان و نیروی محوری القایی در پوشش سگمندی با درزه‌های انحنادار کمتر از مقادیر پوشش سگمندی با درزه‌های صفحه‌ای و پوشش سگمندی

سنگ را جهت مدل‌سازی اثر انفجار بر سازه‌های زیرزمینی و روزمینی به کمک نرم‌افزار Flac مورد بررسی قرار دادند [۷]. محمد نژاد و همکارانش در سال ۲۰۱۰، با استفاده از نرم‌افزار UDEC، اثر انفجار یک موشک نفوذی بر یک تونل مترو را شبیه‌سازی کردند [۸]. کاسترو و همکارانش در سال ۲۰۱۱، انتشار موج حاصل از یک انفجار زیرسطحی در خاک را توسط نرم‌افزار اجزای محدود Plaxis 2D مدل کردند و تاریخچه زمانی سرعت و فشار را در نقاطی با فواصل معین از مرکز انفجار ارزیابی و با روابط تجربی مقایسه کردند. نتایج، نشان داد که نرم‌افزار مذکور قابلیت مدل‌سازی انفجار را داشته و می‌تواند جهت پیش‌بینی اثر انفجار، مورد استفاده قرار گیرد [۹].

مبارکی و واقفی در سال ۲۰۱۵، با استفاده از نرم‌افزار Ls-Dyna، به بررسی تأثیرات انفجار سطحی بر روی تونل‌های کم‌عمق (با در نظر گرفتن سطح مقاطع مختلف برای تونل) پرداختند. نتایج نشان داد که تونل‌های دایره‌ای و نعل اسبی نسبت به تونل شکل جعبه در برابر تخریب مقاومت کمتری دارند اما تونل نیمه بیضوی نسبت به تونل شکل جعبه مقاومت بیشتری دارد [۱۰]. خیراندیش و علیزاده صوری در سال ۲۰۱۶، پایداری یک تونل فرضی واقع در عمق‌های مختلف در مقابل انفجار پرتابه را با استفاده از نرم‌افزار UDEC مورد بررسی قرار دادند و در نهایت حداقل فاصله بین حفره انفجاری و تاج تونل که تونل در وضعیت تنش‌های انفجار به حالت پایدار قرار می‌گیرد، در حدود ۲۵ متر تعیین گردید. همچنین در این مطالعه دیده شد که در فواصل کمتر از ۲۵ متر، هر دو معیار جابه‌جایی تاج تونل و نقاط در آستانه شکست، نشان دهنده ناپایداری تونل تحت بار ناشی از انفجار می‌باشند [۱۱]. رضایی در سال ۲۰۱۷، با استفاده از نرم‌افزار UDEC، به مطالعه بارگذاری، انفجار و میرایی موج ناشی از انفجارهای سطحی و تأثیر این موج بر پایداری سازه‌های زیرزمینی بر روی یک تونل فرضی پرداخت [۱۲]. ژئو و همکاران^۱ در سال ۲۰۱۸ با روش عددی FEM-DEM به بررسی انتشار موج شوک ناشی از انفجار در توده سنگ درزه‌دار و خاک بالای آن پرداختند. تأثیرات پارامترهای ماده منفجره شامل چگالی خرج گذاری، نوع، موقعیت مکانی، شکل محفظه ماده منفجره و پارامترهای درزه‌داری توده سنگ شامل سختی، جهت‌یابی، فاصله‌داری، زاویه تقاطع و همچنین ضخامت پوشش خاک، مکان‌های زمین بر روی پاسخ دینامیکی، میرایی موج و لرزش زمین با روش FEM بر اساس کد نرم‌افزاری AUTODYN و روش DEM بر اساس کد نرم‌افزاری UDEC مورد تحلیل و تجزیه قرار گرفت. نتایج نشان داد سرعت بیشینه ذرات در دیواره‌های فضای زیرزمینی

2 Beam-spring method
3 Solid-interface method

1 Zhu and et al.

می‌باشد و همچنین این موضوع برای تغییر شکل افقی و عمودی پوشش تونل مشاهده شد [۱۶]. در سال ۲۰۲۰ وانگ و همکاران با استفاده از نرم‌افزار عددی سه بعدی اجزا محدود LS-DYNA3D به پاسخ دینامیکی و آسیب ناشی از برهم‌کنش انفجار چندین منبع انفجار بر روی یک مغار زیرزمینی پرداختند. قوانین انتشار امواج ناشی از انفجار، مکانیسم تشکیل شکست و خصوصیات توزیع جابجایی محیط اطراف مغار مورد بررسی قرار گرفت. تحقیقات نشان داد زمانی که موج فشاری ناشی از انفجار به سطح آزاد، سطح زمین و سطح دیواره مغار می‌رسد باعث انعکاس و ایجاد تنش کششی، و تنش کششی سبب ایجاد بالا آمدگی در سطح آزاد، محیط اطراف مغار و سطح زمین می‌شود. به دلیل برهم‌کنش موج کششی، شکل‌های مختلفی از شکست در محیط اطراف مغار ایجاد می‌شود. شدت موج تنش، بیشینه جابجایی و مقادیر سرعت بیشینه ذرات محیط اطراف مغار در نواحی برهم‌نهی موج‌های تنش از نواحی دیگر بسیار بالاتر می‌باشند. علاوه بر این، ارزیابی آسیب‌های مغار که به روش یک درجه آزادی (SDOF) تعیین شد، تطابق خوبی با مقادیر PPV که از معیار آسیب تجربی مشخص شد، دارد [۱۷].

بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد تحقیقات علمی در زمینه بارگذاری انفجاری مدفون و در داخل خاک برای سازه‌های زیرزمینی و نحوه اعمال بار انفجار بر روی این نوع از سازه‌ها و عملکرد آن‌ها کمتر مورد توجه محققین بوده است. اغلب تحقیقات انجام گرفته در حوزه بارگذاری انفجاری معطوف به انفجارهای سطحی است و با توجه به اینکه انتشار موج ناشی از انفجار باعث ایجاد تنش‌ها و نیروهای القایی بر سیستم نگهداری فضاهای زیرزمینی می‌شود، اما این موضوع کمتر در مسائل تحلیل و طراحی‌های فضاهای زیرزمینی مورد توجه قرار گرفته است و مطالعات بیشتری مورد نیاز است. در این مطالعه با استفاده از روش عددی تفاضل محدود و کد نرم‌افزاری FLAC3D به بررسی تأثیر فاصله پرتابه انفجاری از سازه زیرزمینی و قطر کره انفجاری بر روی نیروها و تنش‌های القایی ناشی از انفجار در سازه زیرزمینی و تنش‌ها و جابجایی محیط اطراف سازه پرداخته شده است.

تدریجی بوده و در اکثر مواقع از اثر آن صرف‌نظر می‌شود [۱۹].
به آثار انتشار امواج (ناشی از انفجار عمیق یا سطحی) در سطح و یا زیرزمین، تکانه زمین می‌گویند. قوی‌ترین تکانه زمین ناشی از انفجار درون زمین است که هیچ‌گونه فاصله بین ماده منفجره (بمب) و زمین موجود نباشد. مشخصه اصلی تکانه زمین شامل حداکثر فشار، حداکثر سرعت ذرات، حداکثر جابجایی ذرات، سرعت موج در زمین و تکانه ویژه انفجاری باشد. مقدار این مشخصه‌ها، با افزایش فاصله از مرکز انفجار کاهش می‌یابند و نرخ میرایی آن‌ها تابع خاک است. نرخ میرا شدن با افزایش فاصله تابع نوع خاک بوده و با ضریب کاهندگی مشخص می‌شود [۱۹].

۲-۲- روش تحلیل

روش‌های متداول جهت تحلیل مسائل مربوط به انتشار امواج شوک ناشی از انفجار شامل روش‌های تحلیلی، تجربی و عددی می‌باشد. به دلیل فرضیات زیادی که در روش‌های تحلیلی باید در نظر گرفته شود و محدودیت‌های روش‌های تجربی و به علت پیشرفت‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری در روش‌های عددی، اکثر محققین در دهه‌های اخیر از روش‌های عددی در حل مسائل استفاده نموده‌اند. محققین از روش اجزا محدود (FEM) و با استفاده از نرم‌افزارهای عددی رایج در این زمینه مانند ANSYS-AUTODYN، ABAQUS، LS-DYNA، روش تفاضل محدود (FDM) و نرم‌افزارهای مربوطه این روش شامل FLAC2D&3D در محیط‌های پیوسته، و روش اجزا مجزا (DEM) و با استفاده از نرم‌افزارهای 3DEC و UDEC در محیط‌های ناپیوسته جهت محاسبات مسائل انفجار استفاده کرده‌اند.

روش‌های مدل‌سازی عددی مرسوم مربوط به انفجار مواد منفجره شامل روش‌های مستقیم و غیرمستقیم می‌باشد. روش مستقیم شامل در نظر گرفتن ماده منفجره و معادله حالت آن در مدل‌سازی عددی می‌باشد. معادله حالت جونز-ویکنز-لی (JWL) که به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود، به

۲- مواد و روشها

۲-۱- پدیده انفجار

انفجار، واکنش شیمیایی مواد منفجره است که انرژی قابل‌ملاحظه‌ای را آزاد می‌نماید. در اثر فشار و دمای بسیار زیاد، مواد منفجره به گاز تبدیل شده و با ازدیاد بسیار سریع فشار هوا، موج انفجار به وجود می‌آید که با سرعت اولیه حدود ۲۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ متر بر ثانیه، منتشر می‌شود. امواج ناشی از انفجار

$$u = 48.8f \left(\frac{2.52 \times R}{W^{\frac{1}{3}}} \right)^{-n} \quad (۳)$$

P_0 فشار بیشینه ناشی از انفجار در زمین، u سرعت بیشینه زمین و f ضریب جفت شدگی زمین و ماده منفجره است که میزان پیوستگی ماده منفجره با زمین را نشان می‌دهد. بر اساس آئین‌نامه آمریکا مقدار آن با توجه به نوع انفجار تعیین می‌شود. که برای انفجارهای سطحی برابر 0.4 و برای انفجارهای مدفون شده تقریباً برابر یک در نظر می‌گیرند [۱۸].

W وزن ماده منفجره برحسب کیلوگرم، R فاصله از مرکز انفجار به متر، \bar{n} چگالی مواد انفجار به کیلوگرم بر متر مکعب، C سرعت انتشار موج انفجار برحسب متر بر ثانیه می‌باشد. که K مدول بالک، G مدول برشی و ρ چگالی مواد زمین می‌باشد. n ضریب سستی خاک می‌باشد که وابسته به نوع خاک است و مقدار آن با توجه به آیین‌نامه 1-855-TM5 از جدول ۱ قابل استخراج می‌باشد [۲۱].

در این مطالعه از روابط ارائه شده توسط اسمیت و هنرینگتون جهت صحت‌سنجی مدل عددی استفاده شده است. هندسه مدل عددی به طول ۱۰۰ متر در جهت محور X ، عرض ۲۰ متر در جهت محور Y و به ارتفاع ۶۵ متر در جهت محور Z و مرکز مختصات هندسه مدل در نقطه مرکزی کره انفجاری می‌باشد (شکل ۱).

جهت زون‌بندی هندسه مدل عددی از زون‌های شش وجهی مکعبی شکل استفاده شد. جهت انتشار صحیح موج در مدل عددی ابعاد زون‌ها اهمیت دارد. اعوجاج دینامیکی که در انتشار موج در تحلیل‌های دینامیکی می‌تواند اتفاق افتد تابعی از شرایط مدل می‌باشد. مقدار فرکانس و سرعت موج بر دقت انتشار موج تأثیر می‌گذارد. لایسمر در سال ۱۹۷۳ نشان داد که برای انتشار صحیح موج در مدل عددی اندازه کوچک‌ترین المان تقریباً باید کمتر از یک‌دهم تا یک‌هشتم طول موج ورودی با مؤلفه بزرگ‌ترین بسامد ($\Delta t \leq \frac{1}{10} \text{ to } \frac{1}{8} \lambda$) باشد [۲۰].

بار دینامیکی در نرم‌افزار FLAC3D را می‌توان با استفاده از تاریخچه شتاب، سرعت، تنش یا فشار و نیرو اعمال کرد. در این تحقیق انتشار امواج انفجار به صورت کره‌ای با اعمال فشار انفجار بر دیواره کره انفجاری با تاریخچه زمانی شکل ۲ در نظر گرفته شد.

انعکاس موج به داخل مرزهای مدل را می‌توان با اعمال شرایط مرزی ویسکوز یا سکون و یا شرایط مرزی میدان آزاد کاهش داد. شرایط مرزی

صورت گسترده برای محاسبه فشار ناشی از انفجار کامل در هیدرو کدها و مدل‌سازی‌ها به کار برده می‌شود.

$$P = A \left(1 - \frac{\omega \rho}{R_1 \rho_0} \right) \times e^{\left(-R_1 \frac{\rho_0}{\rho} \right)} + B \left(1 - \frac{\omega \rho}{R_2 \rho_0} \right) \times e^{\left(-R_2 \frac{\rho_0}{\rho} \right)} + \left(\frac{\omega \rho^2}{\rho_0} \right) E_{m_0} \quad (۱)$$

ρ ، R_1 ، R_2 ، A و B ثابت مصالح؛ ρ_0 چگالی اولیه ماده منفجره؛ E_{m_0} انرژی اولیه ماده منفجره.

روش غیرمستقیم شامل استفاده از تاریخچه زمانی فشار یا سرعت ذرات خاک، ناشی از مواد منفجره در مدل‌سازی عددی می‌باشد [۱۸].

روش تفاضل محدود یکی از قدیمی‌ترین روش‌های عددی برای حل دستگاه‌های معادلات دیفرانسیلی است که فضای مسئله را به صورت پیوسته با المان‌هایی که در گره‌ها به هم متصل هستند، مدل می‌کند. نرم‌افزار سه بعدی FLAC3D یک برنامه تفاضل محدود است که توسط شرکت آیتسکا ارائه شده و بر اساس محاسبات لاگرانژی توسعه یافته است. در این نرم‌افزار برای تحلیل تنش و تغییر مکان، مواد به صورت شبکه‌های سه‌بعدی که از المان‌های چند وجهی تشکیل شده‌اند، تعریف می‌شوند. در این مطالعه از روش عددی تفاضل محدود و با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D، با اعمال تاریخچه زمانی فشار انفجار جهت مطالعه استفاده شده است [۲۰].

۲-۳- صحت‌سنجی مدل عددی

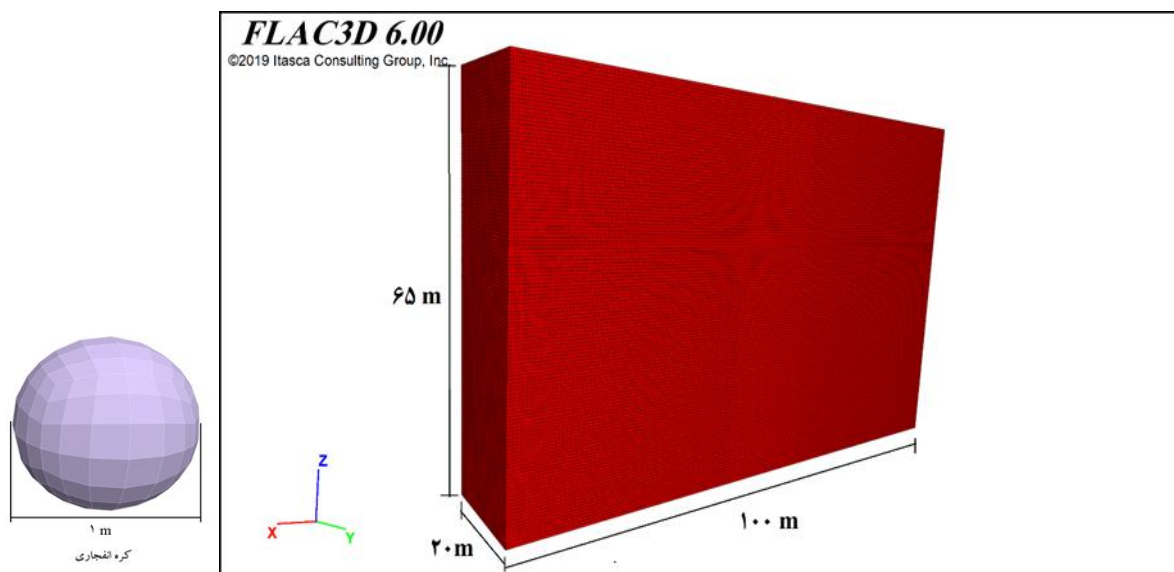
محققین متعددی روابط نیمه‌تحلیلی و تجربی جهت محاسبه این مشخصه‌ها ارائه داده‌اند. اکثر محققینی که از روش‌های عددی جهت حل مسائل انفجار استفاده نموده‌اند، از روابط تحلیلی، نیمه‌تحلیلی و تجربی ارائه شده توسط محققین پیشین جهت صحت‌سنجی مدل عددی بهره جسته‌اند. اسمیت و هنرینگتون روش تجربی جهت تعیین سرعت و فشار بیشینه ذرات محیط اطراف نقطه انفجار زیرزمینی ارائه نمودند. پارامترهای شوک زمینی مانند فشار بیشینه و سرعت ذرات خاک با توجه به نتایج مطالعات اسمیت و هنرینگتون به ترتیب با روابط (۲) و (۳) به دست می‌آیند [۱۸].

$$P_0 = \rho \times c \times u \quad (۲)$$

جدول ۱. مقادیر ضریب سستی برای انواع خاک [۲۱]

Table 1. Looseness coefficient values for various types of soil [21]

اندریس	نوع خاک	متوسط چگالی (kg/m ³)	سرعت لرزه‌ای (m/s)	ضریب سستی
۱	خاک رس به شدت اشباع / خاک رس نرم	۲۰۲۸-۱۹۲۲	<۱۵۲۴	۱/۵
-	خاک رس شنی اشباع شده (درجه اشباع >۱٪)	۱۹۸۴-۱۷۶۰	۱۵۲۴	۲/۵ - ۲/۲۵
۲	خاک رس شنی بسیار مرطوب (<۴٪ درجه اشباع < ۱٪)	۱۷۶۴	۵۴۸/۶۴	۲/۵
۳	شن و ماسه متراکم / شن و ماسه رسی مرطوب (درجه اشباع < ۴٪)	۲۰۰۲-۱۹۲۲	۴۸۷/۶۸	۲/۵
۴	خاک شنی / شن و ماسه خشک با تراکم متوسط	۱۹۸۶	۳۰۴/۸	۲/۷۵
۵	شن و ماسه خشک با تراکم پایین	۱۶۰۱-۱۴۹۸	۱۸۲/۸۸	۳/۲۵ - ۳



شکل ۱. هندسه و ابعاد مدل عددی در نرم‌افزار FLAC3D جهت صحت‌سنجی مدل عددی

Fig. 1. Geometry and dimension of numerical model in FLAC3D software for numerical model validation

که K مدول بالک، G مدول برشی و ρ چگالی خاک می‌باشد. در این مطالعه مرزهای مدل عددی به غیر از مرز بالایی به صورت جاذب انرژی یا سکون و مرز بالایی آزاد در نظر گرفته شد [۲۰].

در تحلیل دینامیکی، میرایی در مدل عددی، در شکل و مقدار، بایستی اتلاف انرژی در ذات سیستم زمانی که تحت بارگذاری دینامیکی قرار می‌گیرد، ایجاد کند. در محیط‌های خاکی، میرایی طبیعی عمدتاً هیسترتیک (مستقل از بسامد) می‌باشند. اما به علت مشکلاتی که در ایجاد عددی این نوع میرایی وجود دارد از میرایی رایلی در اکثر تحلیل‌های عددی استفاده می‌شود.

میرایی رایلی اصولاً در تحلیل سازه‌ها و محیط الاستیک جهت میرا کردن حالت‌های نوسان طبیعی سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد و از رابطه (۸) محاسبه می‌شود [۲۰].

$$C = \alpha M + \beta K \quad (۸)$$

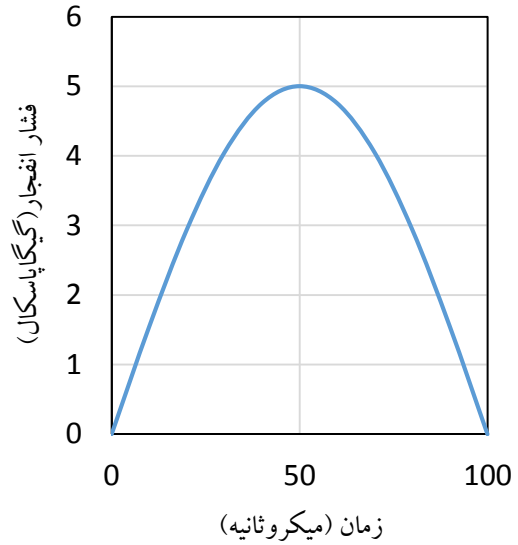
که C ماتریس میرایی، M ماتریس مؤلفه‌های متناسب جرم، K ماتریس مؤلفه‌های متناسب سختی، α ثابت میرایی متناسب جرم و β ثابت میرایی متناسب سختی می‌باشد. در این مطالعه از میرایی رایلی جهت شبیه‌سازی میرایی انتشار موج در خاک استفاده شد.

پارامترهای مقاومتی خاک مورد مطالعه با رفتار الاستیک ایزوتروپیک در جدول ۲ آورده شده است.

مقادیر سرعت بیشینه و فشار بیشینه القایی به محیط اطراف کره انفجاری در اثر انفجار ۵۰۰ کیلوگرم TNT هم به روش عددی و هم به روش تحلیلی در فاصله‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ متر محاسبه و نتایج آن در جدول ۳ آورده شده است. نمودارهای سرعت و فشار بیشینه محیط اطراف انفجار نسبت به فاصله از مرکز انفجار رسم و به ترتیب در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان داد مدل عددی تطابق خوبی با مقادیر نتایج تحلیلی دارد.

۳- نتایج و بحث

در این تحقیق تأثیر دو پارامتر فاصله سازه زیرزمینی از محل انفجار و قطر کره انفجاری از سطح زمین بر روی تنش‌ها، نیروها و جابجایی سیستم نگهداری تونلی به ارتفاع ۸ متر، عرض ۱۶ متر و طول ۲۰ متر با سیستم نگهداری بتن مسلح با مشخصات جدول ۴ مورد مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل



شکل ۲. تاریخچه زمانی فشار انفجار

Fig. 2. Timeline of exploitation pressure

ویسکوز که توسط لایسمر در سال ۱۹۶۹ معرفی شد شامل المان‌های میراگرایی است که در جهت‌های عمودی و برشی مرزهای مدل به طور مستقل اعمال می‌شود. المان‌های میراگر، نیروهای ویسکوز برشی و نرمال را به صورت روابط (۴) و (۵) اعمال می‌کنند [۲۰].

$$t_n = \rho \times C_n \times V_n \quad (۴)$$

$$t_s = \rho \times C_s \times V_s \quad (۵)$$

t_n و t_s به ترتیب تنش‌های عمودی و برشی، C_n و C_s به ترتیب سرعت موج فشاری و برشی که از روابط (۶) و (۷) محاسبه می‌شود، V_n و V_s به ترتیب سرعت نوسان افقی و عمودی ذرات مرزهای مدل می‌باشد.

$$C_n = \sqrt{\frac{K + 4G/3}{\rho}} \quad (۶)$$

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (۷)$$

جدول ۲. خصوصیات خاک مورد مطالعه [۱۹]

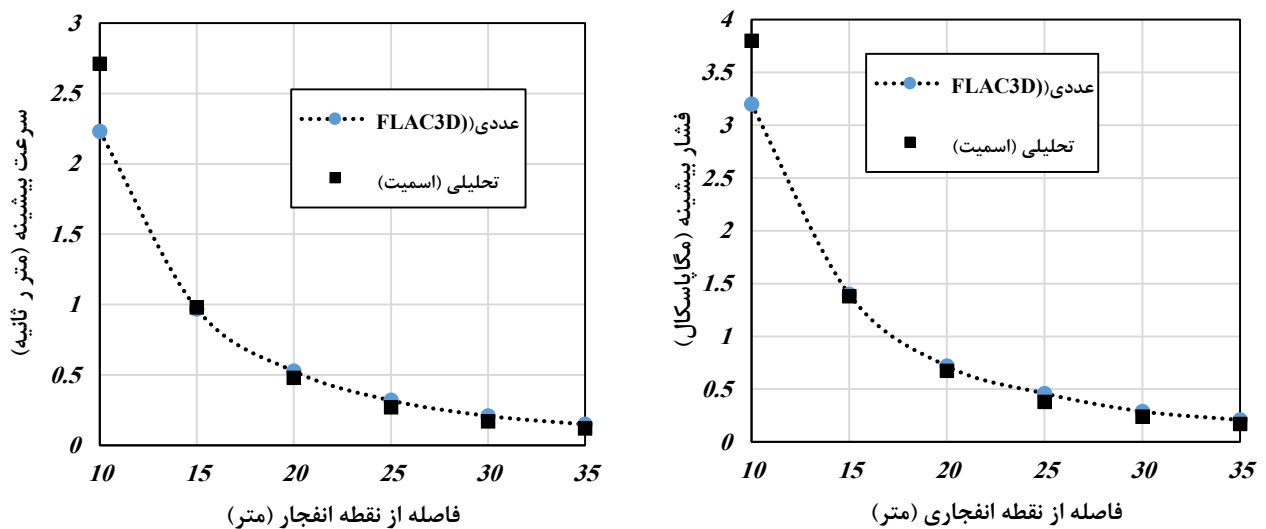
Table 2. Studied soil properties [19]

مدول الاستیسیته (MPa)	دانسیتته (kg/m ³)	سرعت لرزه‌ای (m/s)	ضریب پواسون	ضریب تضعیف (n)	نوع
۶۲۵	۲۶۴۱	۵۳۳	۰/۲۵	۲/۵	ماسه متراکم

جدول ۳. نتایج مدل عددی و روش تحلیلی اسمیت

Table 3. Results of numerical model and Smith analysis method

فاصله از مرکز کره انفجاری (متر)	عددی (FLAC3D)		تحلیلی (اسمیت)	
	سرعت ذرات خاک (متر بر ثانیه)	فشار وارده بر خاک ناشی از انفجار (مگاپاسکال)	سرعت ذرات خاک (متر بر ثانیه)	فشار وارده بر خاک ناشی از انفجار (مگاپاسکال)
۱۰	۲/۲۳	۳/۲	۲/۷۱	۳/۸
۱۵	۰/۹۷	۱/۴	۰/۹۸	۱/۳۸
۲۰	۰/۵۲۷	۰/۷۱۹	۰/۴۸	۰/۶۷۵
۲۵	۰/۳۲	۰/۴۶	۰/۲۷	۰/۳۸
۳۰	۰/۲۱	۰/۲۹	۰/۱۷	۰/۲۴
۳۵	۰/۱۵	۰/۲۱	۰/۱۲	۰/۱۷



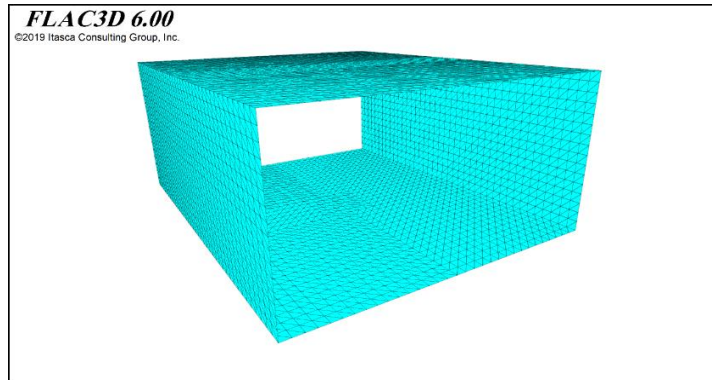
شکل ۳. نمودار سرعت بیشینه و فشار بیشینه نسبت به فاصله از نقطه انفجار

Fig. 3. Plot of maximum velocity and maximum pressure relative to distance from the point of explosion

جدول ۴. مقادیر پارامترهای مکانیکی سیستم نگهداری فضای زیرزمینی

Table 4. The values of mechanical parameters in maintenance system in the basement space

رفتار مواد	مدول الاستیک (گیگاپاسکال)	ضریب پواسون	ضخامت (سانتی‌متر)	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	سیستم نگهداری
الاستیک خطی	۳۵	۰/۲۵	۳۰	۲۵۰۰	بتن مسلح



شکل ۴. هندسه و مش‌بندی فضای زیرزمینی در نرم‌افزار FLAC3D

Fig. 4. Geometry and meshing of basement space in FLAC3D software

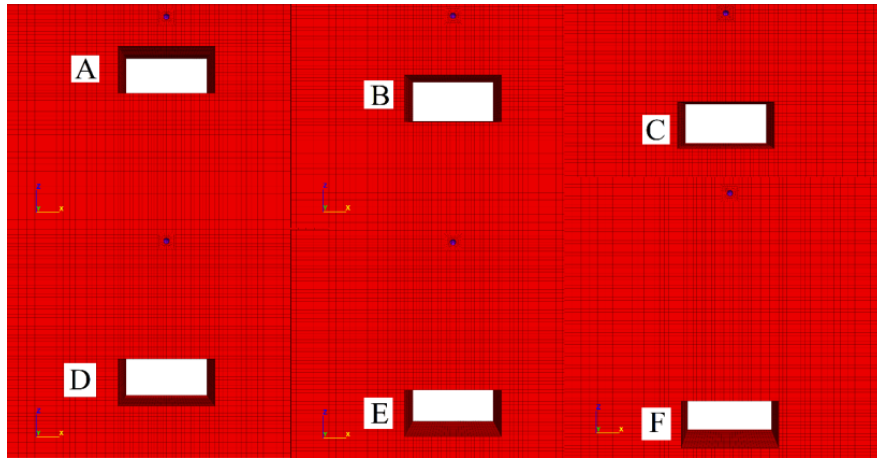
زیرزمینی باعث ایجاد تنش کششی در سطوح آزاد می‌شود که در این شکل آورده شده است. جابجایی و سرعت عمودی ذرات سیستم نگهداری در تاج تونل دقیقاً زیر مرکز کره انفجاری بیشترین مقدار را بعد از رسیدن موج انفجار به سیستم نگهداری تونل دارد (شکل ۸). فضای زیرزمینی، نسبت به زمان انفجار برای فاصله ۱۵ متری مرکز انفجار از تاج سازه مقادیر جابجایی و سرعت افقی و عمودی به ترتیب در دیواره و تاج تونل نسبت به فاصله سازه زیرزمینی از مرکز انفجار به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. در این نمودارها کاهش نمایی جابجایی و سرعت نسبت به این فاصله مشاهده می‌شود. جابجایی و سرعت افقی دیواره در مقابل جابجایی و سرعت عمودی تاج تونل قابل نظر کردن است.

شکل ۱۰ نشان می‌دهد گشتاور خمشی تاج و دیواره تونل تا فاصله ده متری با شیب بسیار بالایی کاهش می‌یابد و از فاصله ده متری به بالا این شیب به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد که برای تاج تونل این روند محسوس‌تر است. مقادیر گشتاور خمشی در دیواره تونل بیشتر از تاج تونل

قرار گرفت.

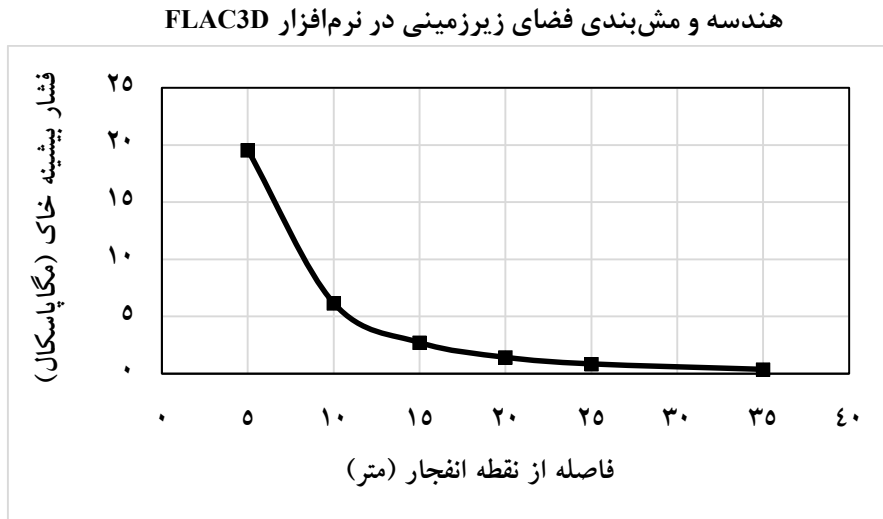
جهت مدل‌سازی عددی سیستم نگهداری از المان‌های پوسته‌ای مثلثی سه گره‌ای که دارای شش درجه آزادی برای هر گره (جابجایی محوری و چرخشی در سه جهت دستگاه مختصات کارتزین) می‌باشد، استفاده شد. که در شکل ۴ مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل شماره شکل ۵ نشان داده شده، فاصله تاج سازه زیرزمینی از مرکز کره انفجاری برای مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۵ متر در نظر گرفته شد. قطر کره انفجاری به مقدار یک متر و فاصله مرکز کره انفجاری از سطح زمین پانزده متر برای تمام مقادیر ذکر شده ثابت فرض شد.

شکل ۶ نشان می‌دهد که فشار بیشینه خاک بر روی سیستم نگهداری با افزایش فاصله سازه زیرزمینی از مرکز انفجار به صورت نمایی کاهش می‌یابد و در فاصله تا ۱۰ متر، کاهش فشار بیشینه با شیب بالایی اتفاق می‌افتد. وضعیت انتشار موج انفجاری در محیط اطراف فضای زیرزمینی را می‌توان در شکل ۷ مشاهده کرد. انعکاس موج انفجاری در سطح زمین و سطح فضای



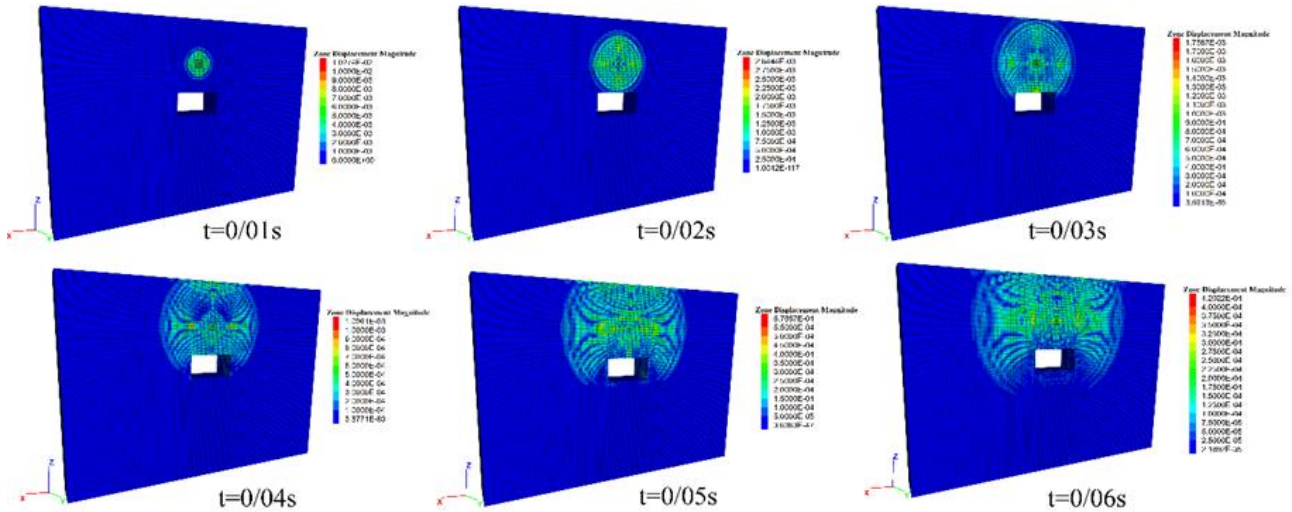
شکل ۵. هندسه ایجاد شده در مدل عددی برای فاصله تاج سازه از مرکز انفجار (A) ۵، (B) ۱۰، (C) ۱۵، (D) ۲۰، (E) ۲۵، (F) ۳۵ متر

Fig. 5. The created geometry in the numerical model for the distance of the structural crown from the center of the explosion A)5, B)10, C)15, D)20, E)25, F)35 meters

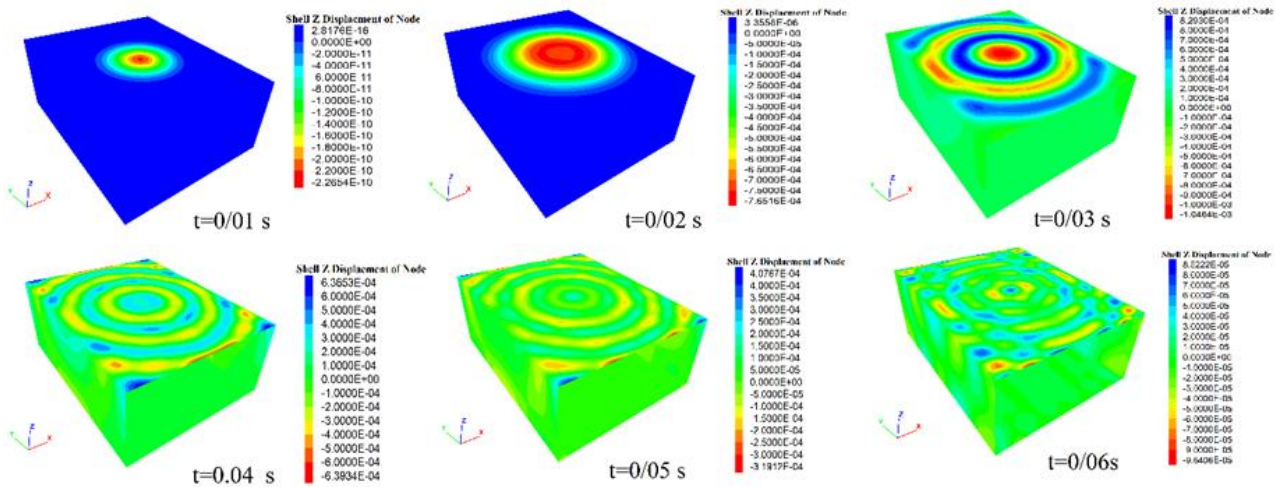


شکل ۶. نمودار تغییرات فشار بیشینه خاک بر روی سیستم نگهداری تونل نسبت به فاصله سیستم نگهداری از مرکز انفجار

Fig. 6. Plot of the changes in maximum soil pressure on the tunnel maintenance system relative to the distance of the maintenance system from the combustion center



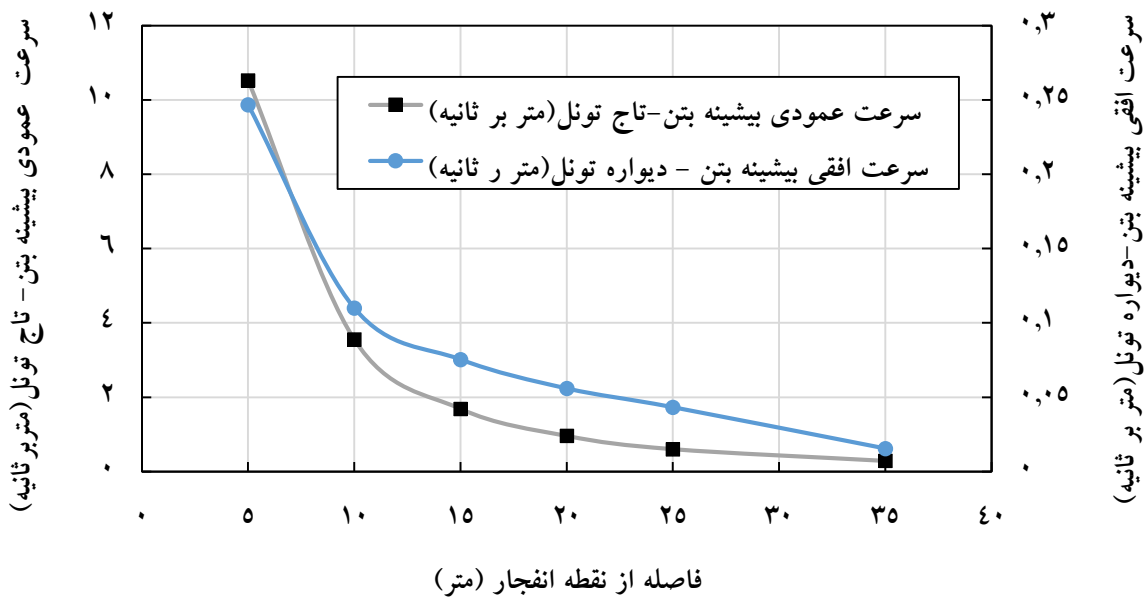
(الف)



(ب)

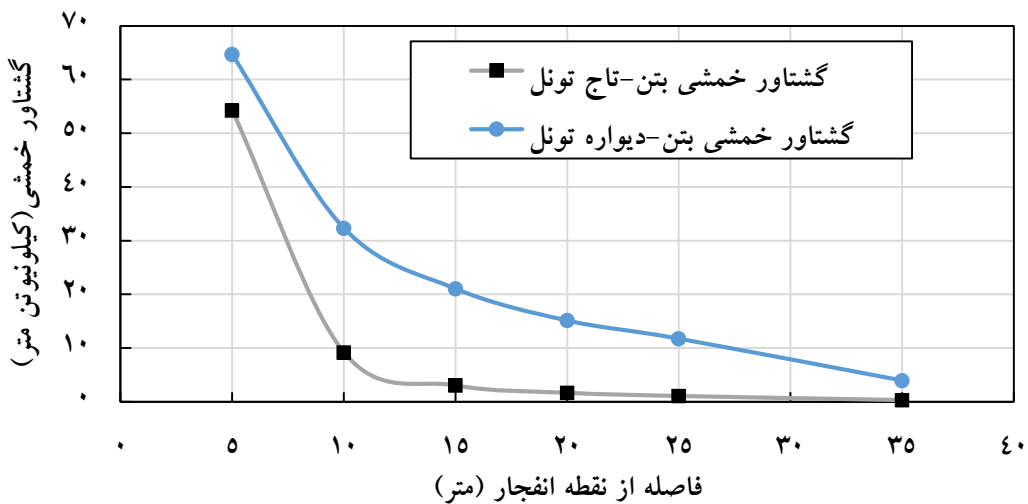
شکل ۷. الف) کانتور جابجایی‌های محیط اطراف انفجار (ب) کانتور جابجایی عمودی سازه نگهداری

Fig. 7. A) Cantour for explosion-displacement around the explosion B) Cantour for vertical displacement of the maintenance structure



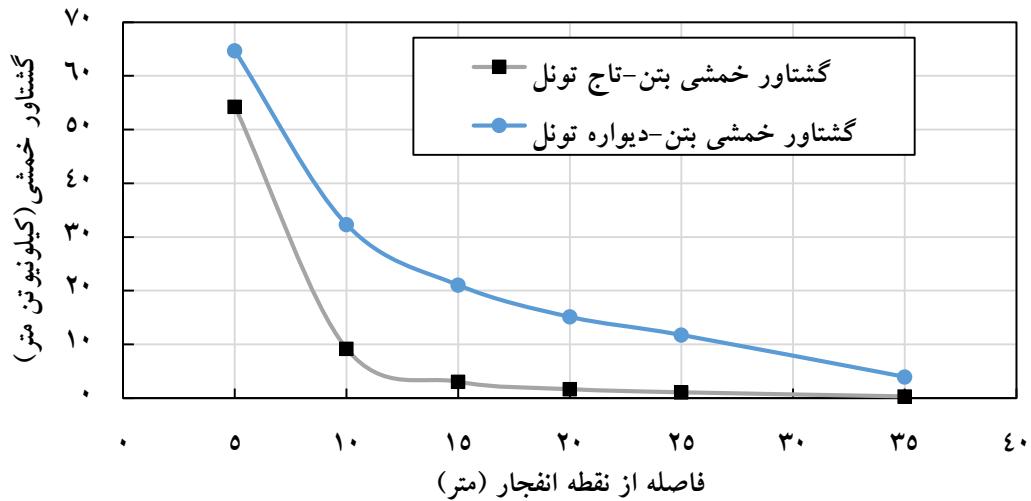
شکل ۸. نمودار جابجایی دیواره و تاج سیستم نگهداری تونل نسبت به فاصله سیستم نگهداری از مرکز انفجار

Fig. 8. Plot of wall displacement and the crown of the tunnel maintenance system relative to the distance of the maintenance system from the center of the explosion



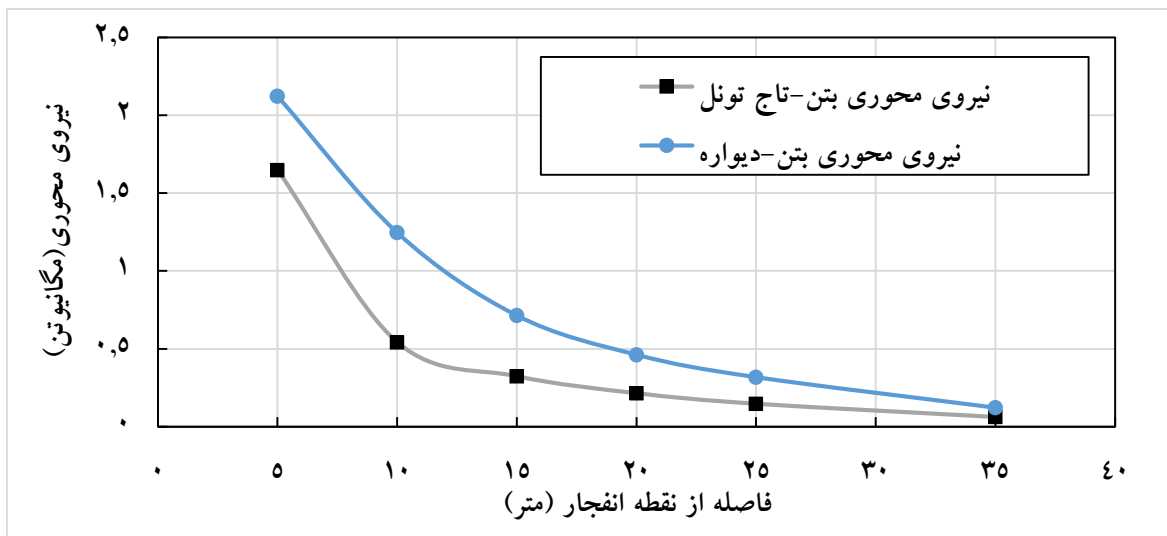
شکل ۹. نمودار سرعت دیواره و تاج ذرات سیستم نگهداری تونل نسبت به فاصله سیستم نگهداری از مرکز انفجار

Fig. 9. Plot of wall velocity and the crown of the tunnel maintenance system particles relative to the distance of the maintenance system from the center of the explosion



شکل ۱۰. نمودار گشتاور خمشی سیستم نگهداری نسبت به فاصله سیستم نگهداری از مرکز انفجار

Fig. 10. Bending torque plot of the maintenance system relative to the distance of the maintenance system from the center of the explosion

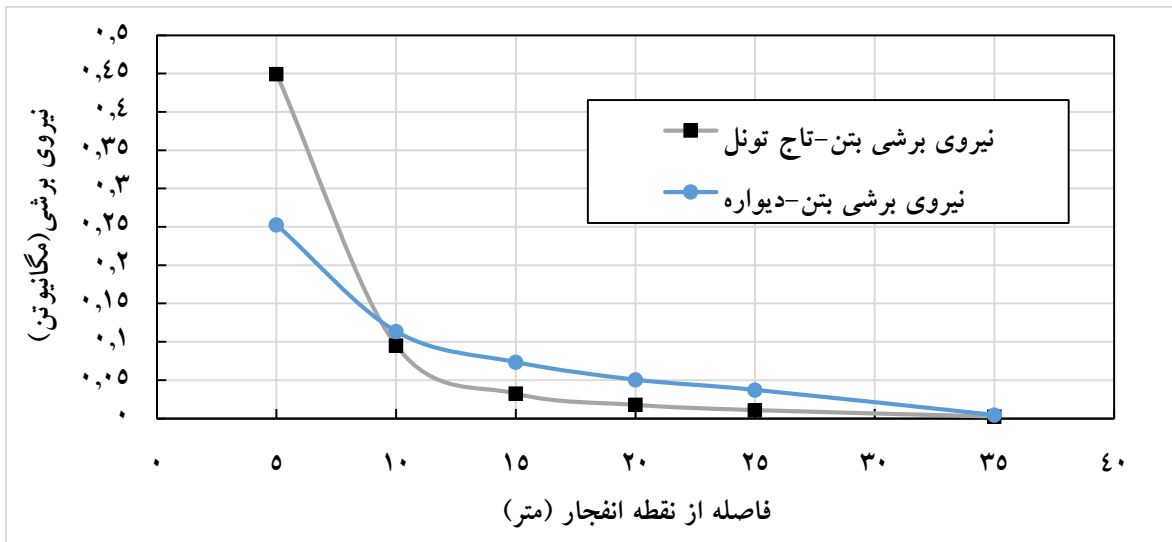


شکل ۱۱. نمودار نیروی محوری سیستم نگهداری نسبت به فاصله سیستم نگهداری از مرکز انفجار

Fig. 11. Axial force plot of the maintenance system relative to the distance of the maintenance system from the center of the explosion

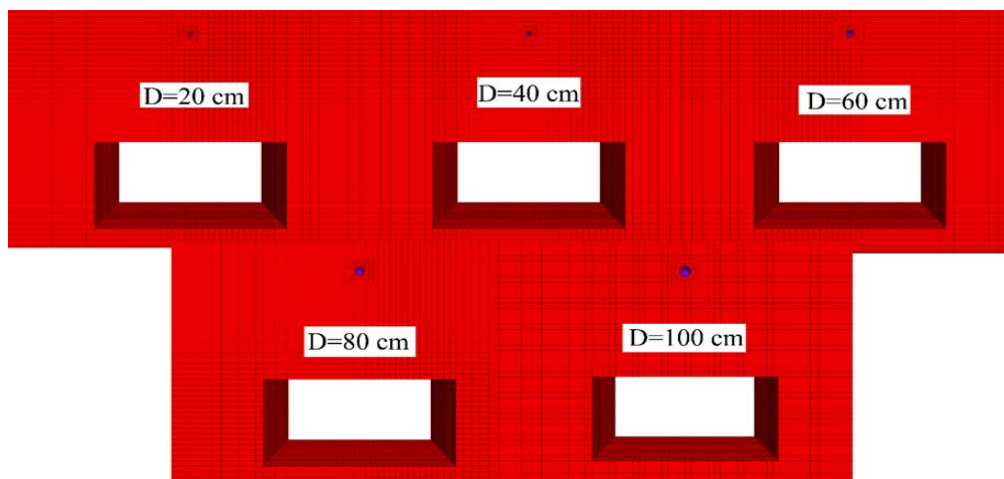
اما روند نیروی برشی متفاوت نسبت به نیروی محوری و گشتاور خمشی می‌باشد (شکل ۱۲). نیروی برشی برای فاصله کمتر از ده متر در تاج بسیار بیشتر از دیواره تونل می‌باشد و برای فاصله بالاتر از ۱۰ متر برعکس می‌شود.

می‌باشد که این مقادیر در فاصله کمتر از ۱۰ متر و بالاتر از ۳۰ متر به هم نزدیک‌تر می‌شود. با توجه به شکل ۱۱ چنین نتیجه‌ای برای نیروی محوری نیز قابل مشاهده است و به همین دلیل حالت بحرانی نیروهای القایی به سیستم نگهداری در دیواره تونل می‌باشد که در طراحی باید مدنظر قرار گیرد.



شکل ۱۲. نمودار نیروی محوری سیستم نگهداری نسبت به فاصله سیستم نگهداری از مرکز انفجار

Fig. 12. Axial force plot of the maintenance system relative to the distance of the maintenance system from the center of the explosion



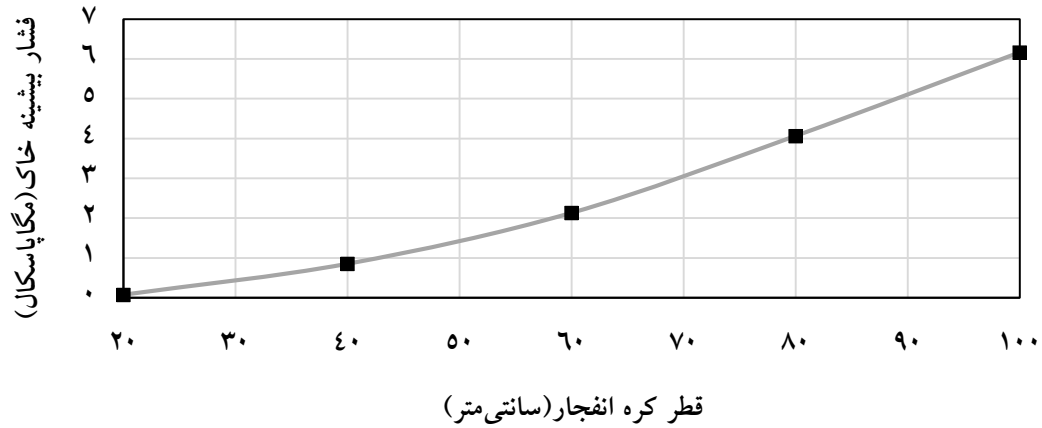
شکل ۱۳. هندسه مدل عددی برای تحلیل حساسیت تأثیر قطر کره انفجاری بر روی سیستم نگهداری فضای زیرزمینی (D قطر کره انفجاری می‌باشد)

Fig. 13. Geometry of numerical model to analyze the sensitivity of the effect of explosive sphere diameter on the underground space maintenance system (D is the diameter of the explosive sphere)

خاک بر روی سازه زیرزمینی برای قطر ۶۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر کره انفجاری تقریباً دو برابر برای حالت ۲۰ تا ۶۰ سانتی‌متر می‌باشد (شکل ۱۴). همان‌طور که در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است، با افزایش قطر کره انفجاری جابجایی‌ها و سرعت‌های عمودی و افقی به ترتیب در تاج و دیواره تونل به صورت نمایی افزایش می‌یابد که مقادیر جابجایی‌ها و سرعت‌های افقی

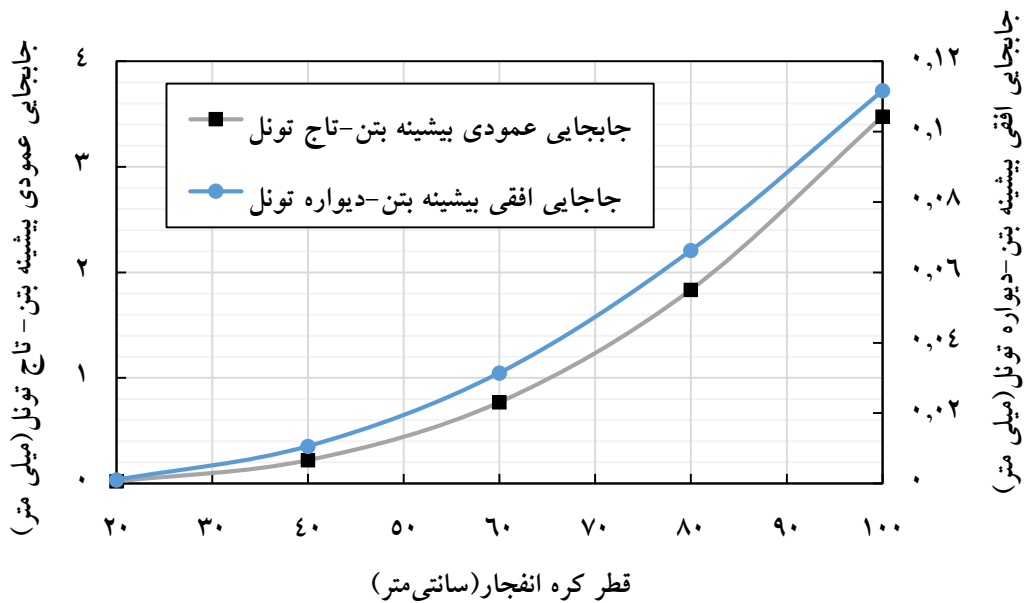
۴- تأثیر قطر کره انفجاری بر روی سیستم نگهداری

جهت بررسی این تأثیر مقادیر ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر برای قطر کره انفجاری در مدل‌سازی عددی در نظر گرفته شد. فاصله سیستم نگهداری از مرکز انفجار برابر ۱۰ متر و ارتفاع مرکز انفجار از سطح زمین ۱۵ متر به صورت ثابت در نظر گرفته شد. شکل ۱۳ شیب افزایش فشار بیشینه



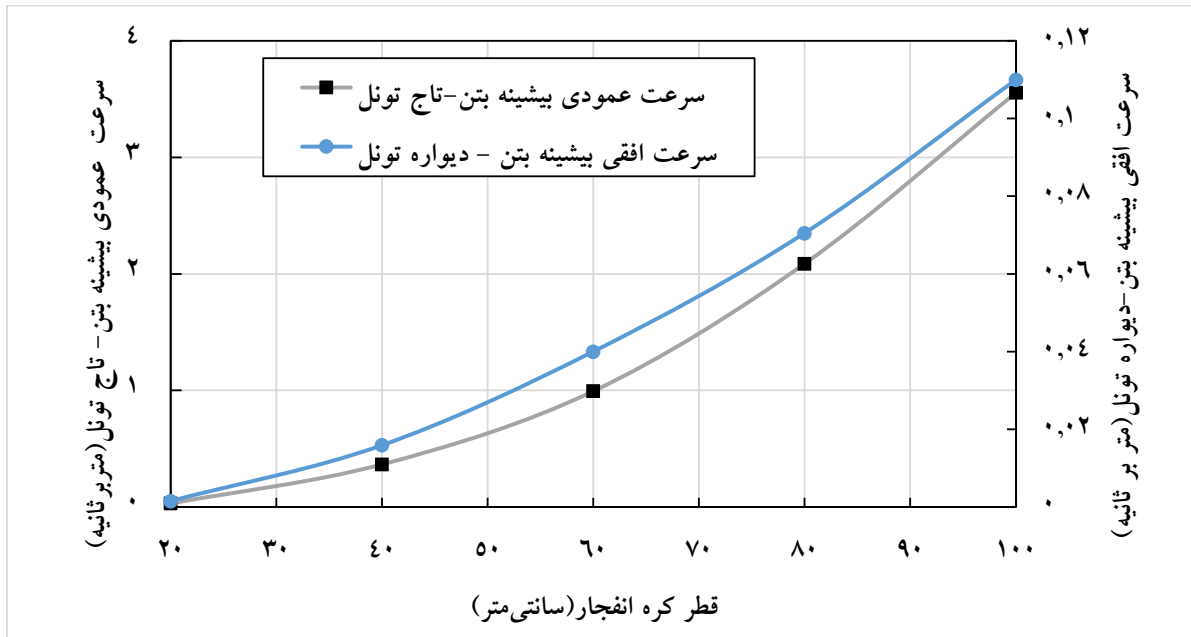
شکل ۱۴. نمودار فشار بیشینه خاک نسبت به قطر کره انفجاری

Fig. 14. The plot of maximum pressure of soil relative to the diameter of the explosive sphere



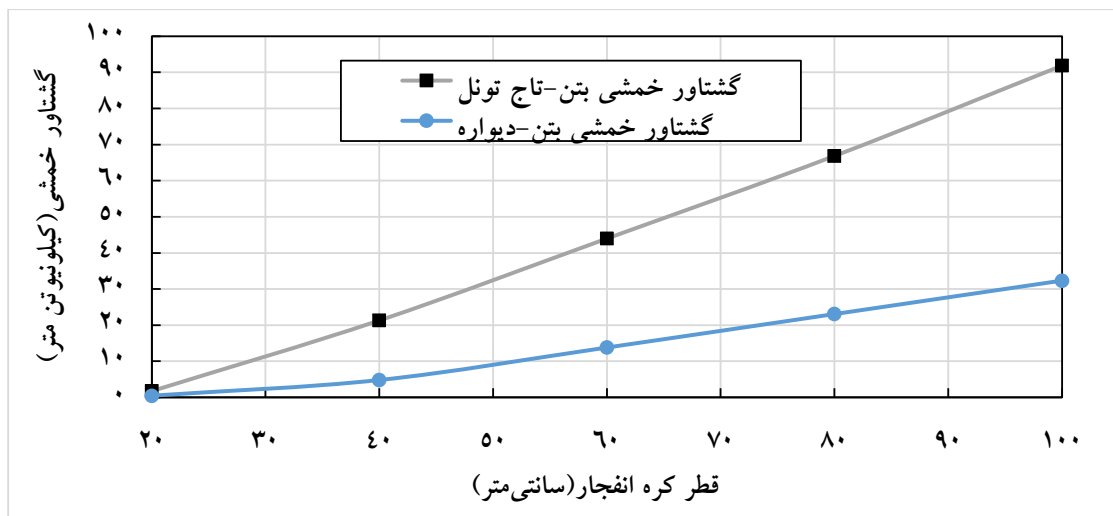
شکل ۱۵. نمودارهای جابجایی عمودی و افقی بتن به ترتیب در تاج و دیواره نسبت به قطر کره انفجاری

Fig. 15. Plots of vertical and horizontal displacement of concrete in the crown and wall relative to the diameter of the explosive sphere



شکل ۱۶. نمودارهای سرعت عمودی و افقی بتن به ترتیب در تاج و دیواره نسبت به قطر کره انفجاری

Fig. 16. Plots of vertical and horizontal velocities of concrete in the crown and wall relative to the diameter of the explosive sphere

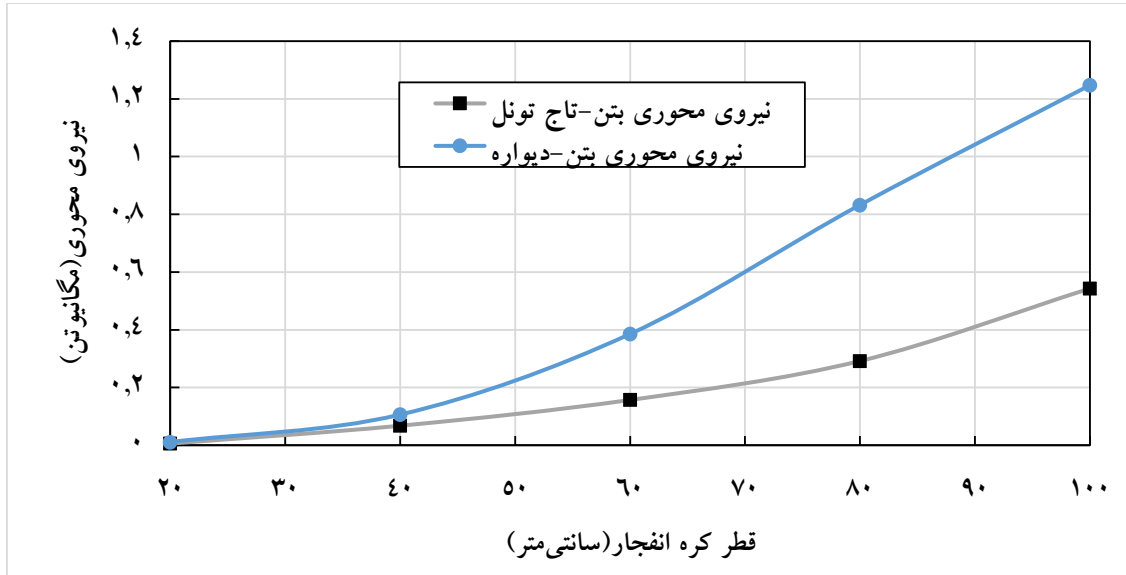


شکل ۱۷. نمودار گشتاور خمشی در تاج و دیواره تونل نسبت به قطر کره انفجاری

Fig. 17. Flexural torque diagram in the crown and wall of tunnel relative to the diameter of the explosive sphere

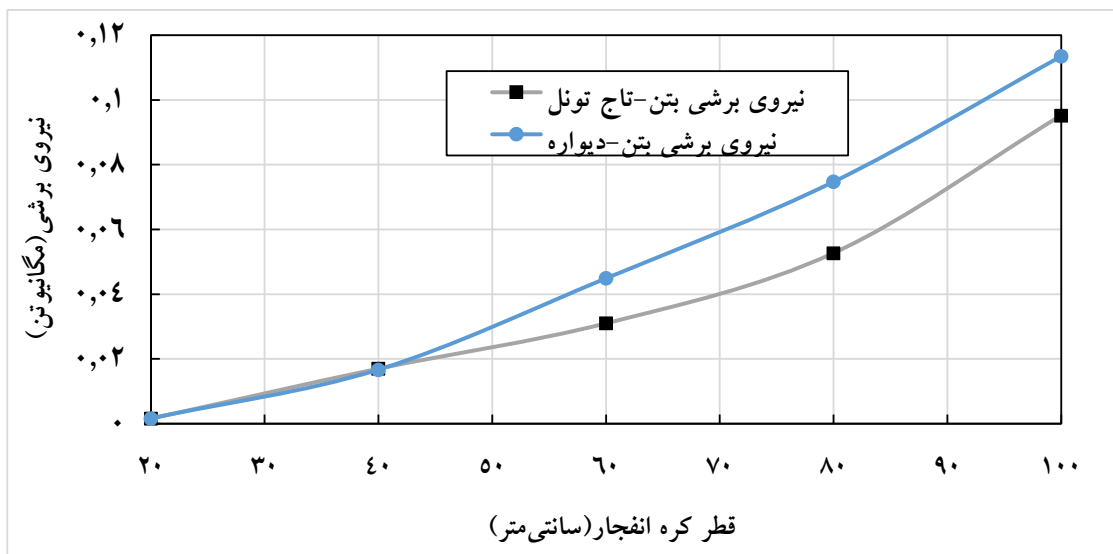
با توجه به نمودارهای رسم شده در شکل ۱۸ می توان مشاهده نمود که نیروی محوری القایی در دیواره و تاج تونل برای قطر کره انفجاری کمتر از ۴۰ سانتی متر با هم برابر و برای مقادیر بالاتر از ۴۰ سانتی متر مقدار نیروی محوری در تاج تونل با شیب بیشتری نسبت به دیواره تونل

نسبت به جابجایی ها و سرعت های عمودی تونل بسیار کم می باشد. با توجه به شکل ۱۷ مشاهده می شود که با افزایش قطر کره انفجاری، گشتاور خمشی در تاج و دیواره تونل تقریباً به صورت خطی افزایش می یابد که این شیب برای تاج تونل سه برابر دیواره می باشد.



شکل ۱۸. نمودار نیروی محوری نسبت به قطر کره انفجاری برای دیواره و تاج تونل

Fig. 18. The plot of axial force relative to the diameter of exploitation sphere for wall and the crown of the tunnel



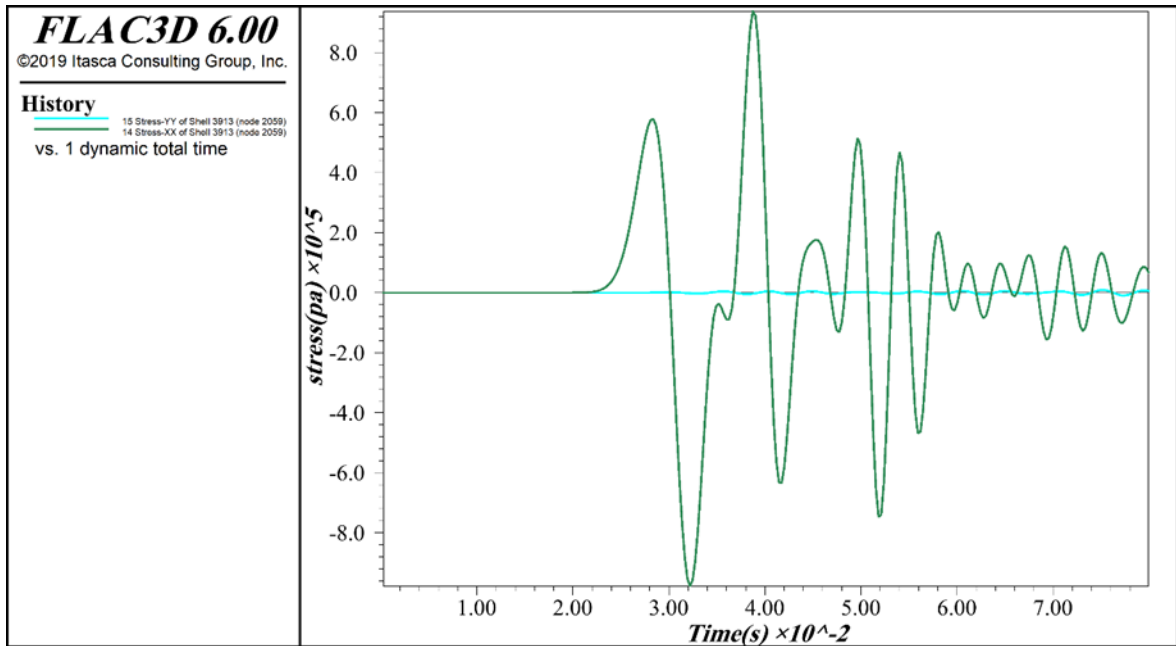
شکل ۱۹. نمودار نیروی برشی نسبت به قطر کره انفجاری برای دیواره و تاج تونل

Fig. 19. The plot of shear force relative to the diameter of exploitation sphere for wall and the crown of the tunnel

و نتیجه شد که هم در تاج و هم دیواره مقادیر تنش‌ها در جهت محیط تونل بسیار بیشتر از در جهت محور تونل می‌باشد. و این تفاوت برای تاج تونل افزایش می‌یابد. این نتیجه را می‌توان برای تمام مقادیر قطرهای کره انفجاری مشاهده کرد.

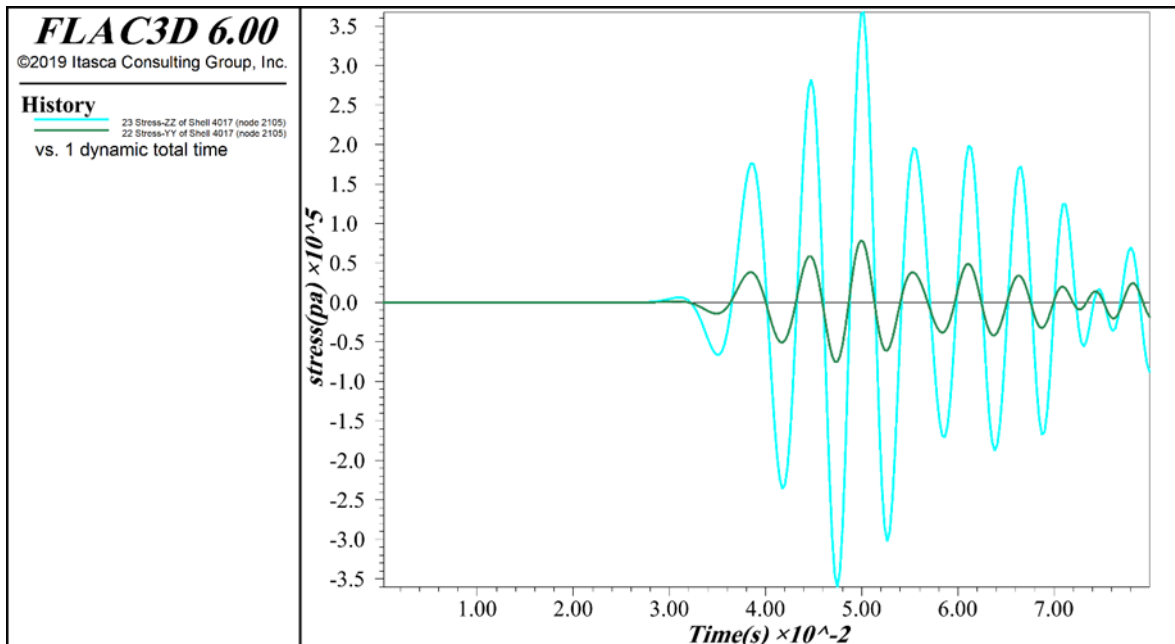
افزایش می‌یابد. که همین موضوع را می‌توان برای نیروی برشی مشاهده کرد (شکل ۱۹).

تاریخچه تنش‌های صفحه‌ای در تاج و دیواره تونل برای حالتی که قطر کره انفجاری ۱ متر می‌باشد به ترتیب در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ آورده



شکل ۲۰. مقادیر تنش صفحه‌ای در تاج تونل

Fig. 20. The values of plate tension in the crown of the tunnel



شکل ۲۱. مقادیر تنش صفحه‌ای در دیواره تونل

Fig. 21. The values of plate tension in the tunnel wall

۵- نتیجه گیری

• تأثیر فاصله سازه از مرکز انفجار بر روی سازه

فشار بیشینه خاک بر روی سیستم نگهداری با افزایش فاصله سازه زیرزمینی از مرکز انفجار به صورت نمایی کاهش می‌یابد و در فاصله تا ۱۰ متر، کاهش فشار بیشینه با شیب بالایی اتفاق می‌افتد. گشتاور خمشی تاج و دیواره تونل تا فاصله ده متری با شیب بسیار بالایی کاهش می‌یابد و از فاصله ده متری به بالا این شیب به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد که برای تاج تونل این روند محسوس‌تر است. مقادیر گشتاور خمشی در دیواره تونل بیشتر از تاج تونل می‌باشد که این مقادیر در فاصله کمتر از ۱۰ متر و بالاتر از ۳۰ متر به هم نزدیک‌تر می‌شود. چنین نتیجه‌ای برای نیروی محوری نیز قابل مشاهده است و به همین دلیل حالت بحرانی نیروهای القایی به سیستم نگهداری در دیواره تونل می‌باشد که در طراحی باید مدنظر قرار گیرد. نیروی برشی برای فاصله کمتر از ده متر در تاج بسیار بیشتر از دیواره تونل می‌باشد و برای فاصله بالاتر از ۱۰ متر برعکس می‌شود.

• تأثیر قطر کره انفجاری بر روی سازه

شیب افزایش فشار بیشینه خاک بر روی سازه زیرزمینی برای قطر ۶۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر کره انفجاری تقریباً دو برابر برای حالت ۲۰ تا ۶۰ سانتی‌متر می‌باشد. با افزایش قطر کره انفجاری، گشتاور خمشی در تاج و دیواره تونل تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد که این شیب برای تاج تونل سه برابر دیواره می‌باشد. نیروی محوری القایی در دیواره و تاج تونل برای قطر کره انفجاری کمتر از ۴۰ سانتی‌متر با هم برابر و برای مقادیر بالاتر از ۴۰ سانتی‌متر مقدار نیروی محوری در تاج تونل با شیب بیشتری نسبت به دیواره تونل افزایش می‌یابد. که همین موضوع را می‌توان برای نیروی برشی مشاهده کرد. نتایج پژوهش نشان داد که فضای زیرزمینی و تنش‌ها و نیروهای القایی در سیستم نگهداری فضای زیرزمینی نسبت به نیروهای ایجاد شده ناشی از انفجار حساسیت قابل توجهی دارد که در تحلیل و طراحی فضای زیرزمینی باید حتماً در نظر گرفته شود.

۶- فهرست علائم

ω ثابت مصالح
 R_1 ثابت مصالح
 R_2 ثابت مصالح
 A ثابت مصالح
 B ثابت مصالح

ρ_0 چگالی اولیه ماده منفجره، کیلوگرم بر متر مکعب

ρ چگالی ماده منفجره، کیلوگرم بر متر مکعب

E_{m0} انرژی اولیه ماده منفجره، مگاتن

P_0 فشار بیشینه ناشی از انفجار در زمین، گیگاپاسکال

u سرعت بیشینه زمین، متر بر ثانیه

f ضریب جفت شدگی زمین و ماده منفجره

W وزن ماده منفجره، کیلوگرم

R فاصله از مرکز انفجار، متر

ρ چگالی مواد انفجار، کیلوگرم بر متر مکعب

C سرعت انتشار موج انفجار، متر بر ثانیه

K مدول بالک، گیگاپاسکال

G مدول برشی، گیگاپاسکال

n ضریب سستی

t_n تنش عمودی، کیلوگرم بر متر مربع

t_s تنش برشی، کیلوگرم بر متر مربع

C_n سرعت موج فشاری، متر بر ثانیه

C_s سرعت موج برشی، متر بر ثانیه

V_n سرعت نوسان افقی ذرات مرزهای مدل، متر بر ثانیه

V_s سرعت نوسان عمودی ذرات مرزهای مدل، متر بر ثانیه

منابع

- [1] M. Momenzadeh, M.R. Mansouri, A. Aziminejad, Assessing the damages created in the twin circle tunnels under explosive loading and their responses, *Tunneling & Underground Space Engineering*, 8(2) (2019) 89-108, (In Persian).
- [2] TM5-1300, The Design of Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions-Technical Manual, US Department of the Army-Navy and Air Force-Washington DC, (1990).
- [3] A.M. Remennikov, A review of methods for predicting bomb blast effects on buildings, *Journal of Battlefield Technology*, 6(3) (2003) 155-161.
- [4] N. Nagy, M. Mohamed, J.C. Boot, Nonlinear numerical modeling for the effect of surface explosions on buried reinforces concrete structures, *Geomechanics & Engineering*, 2(1) (2010) 1-18.

- Persin).
- [13] J. Zhua, Y. Lia, S. Wub, R. Zhange, L. Rend, Decoupled explosion in an underground opening and dynamic responses of surrounding rock masses and structures and induced ground motions: A FEM-DEM numerical study, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 82(2018) (2018) 442-454.
- [14] M. Rahimi Dizadji, A. Fahimifar, M. Jabbarzadeh, Sensitivity Analysis of Un-lined Underground Spaces under Dynamic Loading using Numerical Methods, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 2 (50) (2018) 377-390, (In Persin).
- [15] L. Guangkuna, W. Weic, L. Ruichaoa, Z. Weimingb, Z. Qiangb, Deriving formulas of loading distribution on underground arc structure surface under close-in explosion, *Engineering Failure Analysis*, 115(2020) 104608.
- [16] A. Rashiddel, M. Kharghani, D. Dias, M. Hajihassani, , Numerical study of the segmental tunnel lining behavior under a surface explosion – Impact of the longitudinal joints sha, pe, *Computers and Geotechnics*,, 128(2020) (2020) 103822.
- [17] G. Wang , A. Cao, X. Wang, R. Yu, x. Huang, J. Lin, Numerical simulation of the dynamic responses and damage of underground cavern under multiple explosion sources, *Engineering Failure Analysis*, 1350-6307/© 2020 Elsevier Ltd, (2020).
- [18] M.H. Taghavi Parsa, S. Peyman, Analysis of the Effect of Buried Explosive Loading on Underground Reinforced Concrete Structures, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 1 (51) (2019) 3-18, (In Persin).
- [19] UFC 3-340-02, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosion, Unified Facilities Criteria, (2008).
- [20] Itasca consulting group, Flac3d v6 manual, U.S. Minneapolis, (2019).
- [21] T. 5-855-1, Fundamental of Protective design-Technical Manual, US Department of the Army, (1986).
- [5] Y. Yang, X. Xie, R. Wang, Numerical simulation of dynamic response of operating metro tunnel induced by ground explosion, *Journal of Rock Mechanics & Geotechnical Engineering*, 2(4) (2010) 373-384.
- [6] H. Shahnazari, M. Esmaeili, H. Ranjbar, Simulating the Effects of Projectile Explosion on a Jointed Rock Mass Using DEM 2D: A Case Study of Ardebil-Mianeh Railway Tunnel, *International Journal of Civil Engineering*, 8(2) (2010).
- [7] S.H. Mirzeinali, M.H. Baziar, M. Rabeti Moghaddam, H.R. Hashemi, Determination of Maximum Free Field Explosion Pressure of Conventional Projectiles in Soil for Modeling of Blast Loading Effect on the Underground and Above Ground Structures using FAC Software, 1st Conf. on Passive Defence and Resistance Structures, Babol Noshirvani University of Technology, (2010), (In Persin).
- [8] M. Mohammadnejad, A. Ramazanzadeh, M.E. Jalali, Dynamic Analysis of Underground Structure Under Explosion of Penetrating Bunker Buster, 6st International Conf. on Seismology and Engineering, (2010), (In Persin).
- [9] J.S. Castro, L.S. Bryson, N.K. Gambern, B.T. Lusk, Numerical modeling of subsurface blasting, 14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Toronto: Canadian Geotechnical Society, 9 (2011).
- [10] B. Mobaraki, B. Vaghefi, Numerical Study of the Depth and Cross-Sectional Shape of Tunnel under Surface Explosion, *Tunn. Undergr. Sp. Tech*, 47 (2015) 114-122.
- [11] M.R. Kheirandish, B. Alizadeh Sevari, The Study of Explosion Impact on Underground Tunnels, Case Study: North of Tehran. *Scientific Journal of Advanced Defence Science and Technology*, (2016) 201-208.
- [12] O. Rezaee, Dynamic Study of Buried Structures in Surface Blast with a Passive Defense Approach, *NAJA Engineering Studies Journal*, 9(32) (2017) 64-98, (In

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Gholipour Noroozi, Sh. Sakipour, M. Mohammadzadeh, *Simulation of Underground Structures Explosion using Finite Difference Method for Different Applications*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(7) (2022) 2527-2546.

DOI: 10.22060/mej.2019.15465.6128

