

Parametric Study of Surface Response Spectra of Elastic Half-Spaces under Two Surface Explosions with Spatial Distance and Time Delay

Maryam Delfi^{1*}

1- Faculty Member, Department of Civil Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

ABSTRACT

Modeling of elastic half-spaces and wave propagation within half-spaces under dynamic impulse loading has numerous applications namely designing of structures. In explosion topics with respect to the pursued purpose, multiple explosions can be replaced by one explosion. So this research deals with the effect of two explosions and determining the critical zones for various goals. This study deals with wave propagation in soil half-spaces considering on the ground structures. Structural analysis is the first step for designing structures. Therefore, the study of soil media responses under the surface structure is the goal of present research. The 3D elastic half-space with absorbing boundaries under two surface explosions is modeled using ANSYS finite element software. The surface responses are correlated to loading through a parametric study varying spatial distance and time delay of two similar blasts. Spatial distance and time delay are analysis parameters. Model responses determined in this study are: displacement, velocity and acceleration spectra (surface responses). In summary, surface responses show, peak of the double blast spectra occur in smaller periods than single blast, also by increasing spatial distance, peak of the double blast spectra occur in larger periods. Comparing spectra reveal second blast has minimum effect on surface spectra and maximum effect on acceleration spectra.

ARTICLE INFO

Receive Date: 27 September 2022

Revise Date: 16 October 2022

Accept Date: 16 October 2022

Keywords:

*Dynamic Loading
Multiple Explosions
Elastic Half-Spaces
Displacement Spectra
Velocity Spectra
Acceleration Spectra*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.363702.2939>

*Corresponding author: Maryam Delfi

Email address: mdelfi@tvu.ac.ir

بررسی پارامتری تأثیر فاصله مکانی و تأخیر زمانی دو انفجار سطحی بر روی طیف‌های پاسخ سطح نیم‌فضاهای ارتجاعی

مریم دلفی^{*}

۱- عضو هیأت علمی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

چکیده

مدل‌سازی نیم‌فضاهای ارتجاعی و انتشار موج حاصل از بارگذاری ضربه‌ای دینامیکی در درون نیم‌فضا، کاربردهای مختلفی از جمله طراحی سازه‌ها دارد. در مباحث مربوط به انفجار معمولاً با توجه به هدفی که دنبال می‌شود، می‌توان از چند انفجار به جای یک انفجار استفاده نمود. لذا این تحقیق بر روی اثر دو انفجار متمرکز شده و با استفاده از نتایج آن می‌توان برای اهداف مختلف نقاط بحرانی را تعیین نمود. انتشار امواج در نیم‌فضاهای خاکی با در نظر گرفتن سازه روی سطح زمین، مورد بررسی قرار گرفته و از آنجاییکه اولین گام در طراحی سازه تحلیل آن می‌باشد، لذا عکس‌العمل خاک به عنوان محیط زیر سازه سطحی تحت انفجار، مورد بررسی قرار گرفته و محیط خاک که به صورت یک نیم‌فضای سه بعدی ارتجاعی در نرم‌افزار ANSYS مدل شده، تحت دو انفجار سطحی مورد آنالیز قرار گرفته است. انفجارها مشابه بوده و انفجار دوم با یک اختلاف زمانی نسبت به انفجار اول رخ می‌دهد. اختلاف زمانی و مکانی این دو انفجار، پارامترهای آنالیز تحقیق بوده و معیارهای رفتاری که در این تحقیق اندازه‌گیری می‌شوند، عبارتند از: طیف جابه‌جایی، سرعت و شتاب (معیارهای رفتار سطحی). خلاصه نتایج بررسی پاسخ‌های سطحی نشان می‌دهد، انفجار دوم باعث می‌گردد، مقادیر حداکثر در طیف‌ها در پیوندهای کمتری ایجاد شود و همچنین به طور متوسط با افزایش فاصله مکانی دو انفجار، مقادیر حداکثر در طیف‌ها در پیوندهای بیشتری ایجاد می‌شود. مقایسه طیف‌ها مشخص می‌کند، انفجار دوم کمترین تأثیر را بر روی طیف جابه‌جایی و بیشترین تأثیر را بر طیف شتاب دارد.

کلمات کلیدی: بارگذاری دینامیکی، انفجار دوگانه، نیم‌فضای ارتجاعی، طیف پاسخ جابه‌جایی، طیف پاسخ سرعت، طیف پاسخ شتاب

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.363702.2939	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.363702.2939	۱۴۰۲/۰۵/۳۱	۱۴۰۱/۰۷/۲۴	۱۴۰۱/۰۷/۲۴	۱۴۰۱/۰۷/۲۴	۱۴۰۱/۰۷/۰۵
				*نویسنده مسئول:		
				مریم دلفی		
				mdelfi.tvu.ac.ir		
				پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

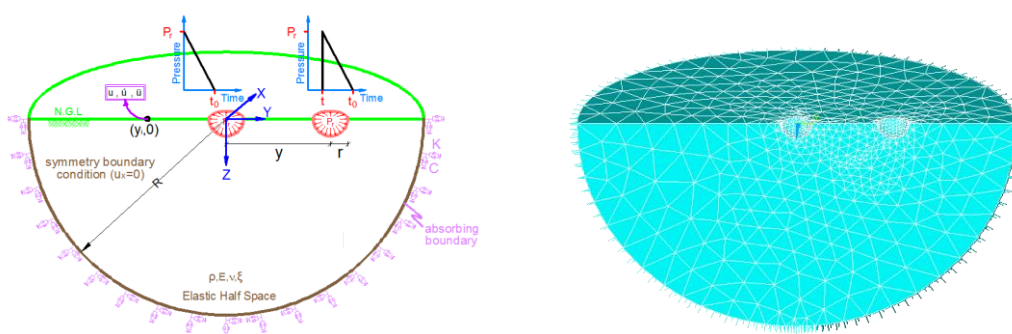
انفجار در واقع یک بار ضربه‌ای است و ضربه در محیط انتشار، موج را بوجود می‌آورد. مدل‌سازی نیم‌فضاهای ارتجاعی و انتشار موج حاصل از بارگذاری ضربه‌ای دینامیکی در درون نیم‌فضا، کاربردهای مختلفی از جمله تصویربرداری لرزه‌ای در میدین نفت و گاز، تعیین محل تأسیسات زیرزمینی [۱]، تست‌های غیرمخرب [۲]، [۳]، تشخیص معایب در مواد مرکب، آلیاژها و بافت‌های زنده [۴] و طراحی سازه‌های مدفون و سطحی [۵] دارد. بحث چند انفجار در زمینه‌های تشخیص یا تخریب مورد استفاده است. کاربرد تشخیص در مباحث تصویربرداری لرزه‌ای مطرح می‌گردد و کاربرد تخریب در موضوعات معدن و نظامی.

در این مقاله انتشار امواج در نیم‌فضاهای خاکی که امکان وجود سازه‌های سطحی استراتژیک در معرض انفجارهای تصادفی یا ساخته دست بشر در آنها مطرح است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. آیین‌نامه‌های معتبری در زمینه طراحی در برابر انفجار وجود دارد، از جمله [۶] TM و [۷] UFC که از انتشارات گروه مهندسين ارتش آمریکا هستند. در قسمت‌های مختلف این تحقیق برای کنترل صحت نتایج از این آیین‌نامه‌ها استفاده شده است.

اولین گام در طراحی سازه تحلیل آن می‌باشد، یعنی ابتدا باید عکس‌العمل سازه و محیط اطراف آن را تعیین کرد تا به تناسب آنها بتوان اعضای سازه‌ای مناسبی را طراحی نمود. لذا در این تحقیق قصد بر آن است تا عکس‌العمل خاک به عنوان محیط زیر سازه سطحی تحت انفجار مورد بررسی قرار گیرد.

در این تحقیق محیط خاک را به صورت یک نیم‌فضای سه بعدی ارتجاعی در نرم‌افزار ANSYS مدل می‌کنیم، که تحت دو انفجار روی سطح زمین مورد آنالیز قرار می‌گیرد. با حذف حفره حاصل از انفجار از مدل و ارتجاعی در نظر گرفتن سایر قسمت‌های محیط، آنالیزها الاستیک انجام شدند و همانطور که مشاهده خواهد شد نتایج حاصل از این آنالیزها با دقت مناسبی با نتایج تجربی ارائه شده در آیین‌نامه TM مطابقت دارد. لذا این نتایج می‌تواند جایگزین آنالیزهای پیچیده دینامیکی گردد.

پارامترهایی که در این تحقیق متغیر در نظر گرفته می‌شوند، اختلاف زمانی و مکانی این دو انفجار می‌باشند. معیارهای رفتاری که قرار است در این تحقیق اندازه‌گیری شوند، عبارتند از: طیف جابه‌جایی، سرعت و شتاب (معیارهای رفتار سطحی)، که در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: نیم‌فضای سه بعدی به انضمام دو انفجار سطحی

برای انجام این مطالعه، ابتدا مدل پایه‌ای در نرم‌افزار ANSYS تهیه و برای کالیبره کردن آن، آنالیز حساسیت نسبت به پارامترهای مدل‌سازی شامل شرایط مرزی، بارگذاری انفجاری و مش‌بندی انجام گرفت. برای اطمینان از صحت نتایج مدل‌های ساخته شده در نرم‌افزار ANSYS، مدل‌هایی از کارهای مشابه انجام شده توسط نرم‌افزارهای دیگر و آزمایش‌های تجربی، در این نرم‌افزار اجرا شد و که با دقت مناسبی نتایج یکسانی به دست آمد. با ساختن تعدادی مدل سه بعدی و دو بعدی از یکسان بودن نتایج آنها نیز اطمینان حاصل شد. در کلیه موارد فوق اختلاف‌ها در حد مجاز و کمتر از پنج درصد مشاهده گردید. در مرحله بعد که مطالعه پارامتری مسئله است، مدل‌های اصلی به گونه‌ای تهیه شد که تأثیر پارامترهای آنالیز بر روی معیارهای رفتاری مورد بررسی قرار گیرد. در این تحقیق اختلاف مکانی و زمانی

دو انفجار، پارامترهای آنالیز هستند و معیارهای رفتاری عبارتند از: پاسخ‌های سطحی (طیف جابه‌جایی، طیف سرعت، طیف شتاب). در این تحقیق خصوصیات مصالح نیم‌فضا و خصوصیات انفجارها ثابت در نظر گرفته شده است. در نهایت نتایج به دست آمده از آنالیزها به صورت نمودارها و جداولی تهیه شده و روند تغییر معیارهای رفتاری سازه بر اساس پارامترهای آنالیز بررسی و ارائه گردیده است.

۲- مروری بر تحقیقات پیشین

شاید وقوع جنگ‌هایی همچون جنگ جهانی اول و جنگ جهانی دوم به مراتب بیش از حوادث عمدی یا غیر عمدی صنعتی، کشورهای مختلف را بر آن داشته است تا از محققان برجسته و امکانات تحقیقاتی گسترده خود برای مقاوم سازی و تخمین مقاومت سازه‌ها در برابر انفجار استفاده نمایند [۸].

طراحی تدافعی و پخش امواج از جمله مسائلی است که سؤالات بسیار زیادی را در حین و پس از دومین جنگ جهانی ایجاد نموده است. شیپ و کارتر در مقاله طراحی تدافعی [۹] با بررسی انواع اثرات یک انفجار نظامی، به ارائه پیشنهادی عملی برای مقابله با هر یک از این اثرات می‌پردازند. لانگینو و الفواخیری [۱۰] به بررسی مشخصه‌های دیاگرام فشار ضربه بر روی سازه یک درجه آزادی تحت بارهای انفجاری پرداخته‌اند. در مطالعه صورت گرفته توسط این محققین از پاسخ ارتجاعی سازه در تعیین رفتار سازه و از تغییر مکان حداکثر به عنوان معیاری برای کنترل خرابی سازه استفاده شده است. در این مطالعه از یک سری منحنی‌های بدست آمده از روش تنش نهایی جهت تشخیص و قضاوت در مورد معیارهای خرابی سازه استفاده شده است. معیارهای تعیین خرابی در این مطالعه استفاده از منحنی فشار ضربه و تعیین بعضی از نقاط به عنوان سناریوهای وجود خرابی بوده است. برای یافتن نیروها و اثرات ناشی از انفجار، کتبی که حاصل سال‌ها تلاش جمعی از محققین در غالب گروه‌های تخصصی است، بخصوص کتاب ارزشمند "حرکت امواج در محیط‌های ارتجاعی" [۱۱] از مطالب بسیار کاربردی در این زمینه برخوردار است. در این کتاب پس از تشریح مسائل مختلف پخش امواج در کابل‌ها، میله‌ها، غشاها، صفحات و پوسته‌ها، پخش امواج در محیط‌های نامحدود یا نیمه محدود نیز مورد بررسی قرار گرفته است. مهم‌ترین کتابی که برای تشخیص میزان انرژی آزاد شده در اثر انفجار تسلیحات نظامی و دیگر اثرات چنین حوادثی در دسترس می‌باشد، کتاب ارزشمند بنگاش با عنوان "ضربه و انفجار" [۱۲] است که دایرةالمعارف انفجارات محسوب می‌گردد. در این کتاب از مدل یک درجه آزادی یک بعدی بعنوان یک پایه بسیار مناسب برای شروع مدل‌سازی رفتار سازه در برابر بارهای انفجاری یاد شده است. سادگی، مؤثر بودن و بیان قابل درک این مدل به عنوان یک راه‌گشای بسیار مناسب در اکثر تحقیقات نو می‌باشد.

در سال ۱۹۹۰ دپارتمان ارتش آمریکا با توجه به آزمایشات و تحقیقاتش در زمینه سازه‌های مقاوم در برابر انفجار، آیین‌نامه TM5-1300 [۶] را منتشر کرد که هدف آن بیان روشی برای طراحی سازه تحت اثر انفجار است.

در سال‌های اخیر موسسه مهندسی ارتش آمریکا نیز اقدام به انتشار آیین‌نامه‌ای حول موضوع انفجار کرده است و در سال ۲۰۰۸ با انتشار آیین‌نامه UFC 3-340-02 [۷] آنرا جایگزینی برای TM5-1300 معرفی کرد. هدف از این آیین‌نامه نیز بیان راهکارهای طراحی سازه‌ها تحت اثر انفجار است. در این آیین‌نامه بیشتر از آیین‌نامه TM5-1300 به موضوع شکل‌پذیری پرداخته شده است.

آیزنبرگ [۱۳] کاربرد اجزای محدود را برای اثرات ناشی از انفجار توضیح داد. در آنالیز او مدل‌های الاستیک سه بعدی غیر خطی متقارن محوری استفاده شده است. مرزهای محیطی گیردار بوده و هیچ ملاحظات خاصی برای انعکاس امواج در مرزها در نظر گرفته نشده است.

کیتو [۱۴] یک لایه نازک المان خاک را برای نشان دادن اندرکنش متقارن محوری خاک و سازه بکار برد. او هم مثل لایزمر [۱۵] نیم فضای خاکی را الاستیک در نظر گرفت و گفت مشخصات مواد مستقل از ترازهای تنش بوجود آمده توسط ارتعاشات هارمونیک افقی و عمودی هستند.

روش‌های متنوعی همچون اجزاء نامحدود و یا مرز جاذب در کنار اجزاء محدود، در مطالعه محیط‌های نامحدود کاربرد دارد. یکی از اولین کسانی که به کمک روش مرز جاذب در کنار اجزاء محدود، به حل مشکل امواج بازگشتی از مرزهای محیط خاک پرداخت، لایزمر

[۱۵] می‌باشد. او با استفاده از المان‌های میراگر در اطراف محیط خاک، نسبت به ارائه روشی برای جذب امواج برخورد کننده به انتهای محیط، اقدام نموده است. در تکمیل روش لایزمر کارهای گوناگونی صورت پذیرفته که می‌توان در کتاب اندرکنش خاک و سازه ولف [۱۶] موارد فراوانی را یافت. یکی از موارد حائز اهمیت در این راستا مقاله کلیزی [۱۷] است که در آن از المان‌های محلی در مرزها برای جلوگیری از انعکاس امواج استفاده کرده است. با توسعه روش‌های عددی، یرلی و همکاران [۱۸] استفاده از اجزاء نامحدود را مورد توجه قرار داده‌اند. یرلی و همکاران در سال ۱۹۹۸ به بررسی اندرکنش خاک و سازه با استفاده از یک مدل دو بعدی پرداختند. در این مطالعه از معادله دو بعدی حرکت به کمک روش‌های متعارف استفاده شده است. برای مدل کردن انتشار امواج در خاک از ترکیب روش اجزاء نامحدود^۱ با روش اجزاء محدود^۲ استفاده شده است.

ایمنی و پایداری سازه‌های در معرض انفجار، اغلب تحت تأثیر خرابی و ارتعاش حاصل از انفجار می‌باشد. مقدار خرابی بسته به فاصله تا منبع انفجار، وزن ماده منفجره و خصوصیات توده سنگ دارد. بنابر مطالعات انجام شده، بدست آوردن یک معیار خرابی کلی مشکل است چون فاکتورهای زیادی را در بر می‌گیرد. برای مقاصد عملی از سرعت حداکثر ذره‌ای^۳ استفاده می‌شود چون به راحتی در محل قابل اندازه گیری است. دوین [۱۹] نشان داد که پیک سرعت ذرات با ماکزیمم وزن خرج یا مقدار ماده منفجر شده، بسیار مرتبط است.

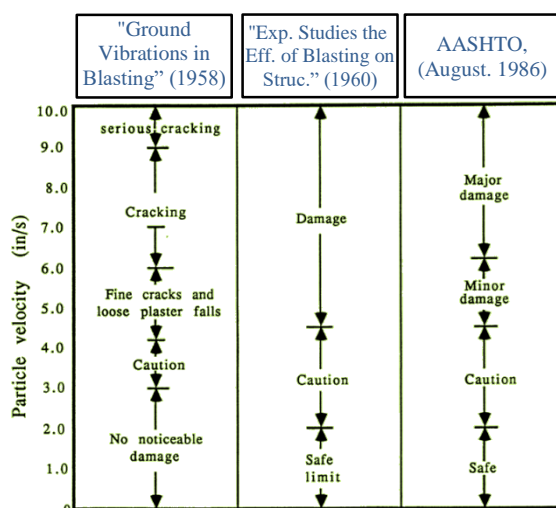
امبرسیز و هندرون [۲۰] رابطه زیر را برای تعیین حداکثر سرعت ذرات در راستای شعاعی ارائه دادند.

$$PPV = a \left(\frac{R}{W^{\frac{1}{3}}} \right)^n \text{ in/s} \quad (1)$$

که در آن برای $\left(\frac{R}{W^{\frac{1}{3}}} \right) < 10$ یعنی امواج حجمی (نزدیک انفجار)، $n = -2.8$ و $a = 6000$ می‌باشد و برای فاصله‌های دورتر $\left(\frac{R}{W^{\frac{1}{3}}} \right) > 10$

یعنی امواج ریلی، $n = -1.6$ و $a = 360$ است. مقیاس ریشه سوم، از تئوری الاستیسیته برای حرکت کروی امواج منتشر شده یک منبع نقطه‌ای در یک محیط بی‌نهایت، بدست می‌آید.

آسیب سازه می‌تواند بنا به مقدار سرعت حداکثر بوجود آمده ناشی از ارتعاش تغییر کند. شکل ۲ که حاصل تست‌های ارگان‌های معتبر بین‌المللی است، معیاری برای میزان آسیب سازه‌های سطحی با توجه به مقدار سرعت ذره‌ای حداکثر، در اختیار قرار می‌دهد.



شکل ۲: دسته بندی آسیب سازه‌های روی سطح زمین

¹ Infinite Element Method

² Finite Element Method

³ Peak Particle Velocity (PPV)

۳- مبانی نظری تحقیق

۳-۱- مدل سازی حفره حاصل از انفجار^۴

به طور کلی سه رفتار الاستیک، الاستوپلاستیک و ویسکوالاستیک برای خاک‌ها تعریف شده است. تحت بارگذاری انفجاری به دلیل کوتاه بودن زمان انفجار، اولین رفتار محیط، مهم‌ترین رفتار می‌باشد که این شامل تغییر شکل‌های پلاستیک خاک در مجاورت ماده منفجره می‌شود. در نتیجه می‌توان محیط را به صورت یک ماده الاستوپلاستیک در نظر گرفت که در فاصله ای به اندازه کافی دورتر از ماده منفجره الاستیک فرض می‌شود. خاک‌های ویسکوالاستیک به محض بارگذاری رفتار الاستیک از خود نشان می‌دهند که این رفتار بعد از آن با افزایش آهسته و پیوسته کرنش با نرخ کاهنده ادامه می‌یابد [۲۱].

در این تحقیق فرض شده انفجار روی سطح زمین اتفاق می‌افتد در نتیجه محیط خاک، صرف نظر از حفره ناشی از انفجار، به عنوان مصالح الاستیک، همگن و ایزوتروپیک در نظر گرفته می‌شوند. برای بررسی مکانیک این گونه مصالح، داشتن دو پارامتر مدول الاستیسیته E و ضریب پواسن ν کفایت می‌کند.

گام اول در تحلیل‌ها، مدل کردن دقیق حفره حاصل از انفجار است. برای مدل کردن حفره حاصل از انفجار دو روش وجود دارد، مدل سازی به صورت آزمایشگاهی-تجربی و مدل سازی عددی. با توجه به این که آزمایشات مربوط به انفجار هزینه بر و همراه با ریسک فراوان بوده و با موانع محیط زیستی نیز مواجه است، اغلب تحقیقات به صورت مدل سازی عددی انجام شده است.

معادلاتی برای ارزیابی ابعاد حفره، برای انواع خاصی از خاک، شکل ماده منفجره، حجم مختلف ماده منفجره و عمق آنها توسط محققین ارائه شده است [۲۲]، [۲۳]، [۲۴]، [۲۵]. برای معتبر ساختن مدل‌ها، خصوصیات مواد و حتی روند آنالیز، مقایسه‌ای با نتایج تجربی و آزمایشگاهی صورت پذیرفته است. برای بررسی تأثیر پارامترهای خاک روی اندازه حفره، یک سری مطالعات با ایجاد تغییر در خصوصیات الاستیک، مقاومت شکست و تسلیم انجام گرفته و نتایج حاصله نشان می‌دهد، خصوصیات الاستیک خاک تقریباً هیچ تأثیری در قطر حفره ندارند. اگرچه، اختلافی حدود $\pm 5\%$ در موارد خاص دیده می‌شود. همچنین اگر حد شکست و توابع تسلیم در محدوده اعداد قابل قبول تغییر کنند، قطر حفره ثابت باقی می‌ماند.

در این تحقیقات مشاهده شد، حفره‌ای که در ماسه ایجاد می‌شود از رس کمتر است و بقیه خاک‌ها (ماسه رسی، سیلت، لوم و ...) معمولاً بین ماسه و رس قرار می‌گیرند. همچنین در خاک مرطوب به نسبت خاک خشک حفره بزرگ‌تری ایجاد می‌شود، بویژه در خاک‌های رسی.

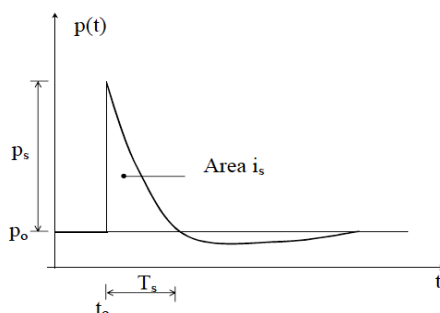
در این تحقیق هدف بررسی حفره‌های حاصل از انفجار سطحی می‌باشد. انفجاری که روی سطح زمین یا بسیار نزدیک به آن رخ می‌دهد، بعنوان انفجار سطحی محسوب می‌شود. از آنجا که شکل حفره طی یک سری مراحل پیچیده به وجود می‌آید، اختلاف‌هایی در ظاهر فیزیکی آن ممکن است به وجود آید، ولی به طور غالب یک نیمکره به شعاع r می‌باشد. در این تحقیق از نمودار ۵-۷ آیین‌نامه TM5-1-855 [۲۶] برای تعیین شعاع حفره حاصل از انفجار استفاده شده است. این نمودار نتایج آزمایش‌های صحرایی بسیاری است و قطر حفره ناشی از انفجار ماد منفجره را که در انواع مختلفی از خاک منفجر می‌شوند را بصورت تابعی از عمق دفن ماده منفجره نشان می‌دهد.

۳-۲- موج انفجار

وقتی حجم بالایی از خرج انفجار فشرده شده منفجر می‌شود، موج انفجار به وجود می‌آید. پروفیل فشار-زمان کلی برای موج انفجار در هوای آزاد در شکل ۳ قابل مشاهده است. افزایش سریع فشار هوا باعث به وجود آمدن فضایی در اطراف بمب انفجاری خواهد شد که در جلوی این محیط هوا دست نخورده می‌ماند ولی در پشت سر آن هوا تحت فشار جدیدی قرار خواهد گرفت که این منطقه، شوک جلویی موج انفجار نامیده می‌شود. چون انفجار باعث گرم و منبسط شدن هوای اطراف می‌گردد، در نتیجه این امر در هوا و مایعات قابل

⁴ explosion crater

فشار، موجب به وجود آمدن موج انفجار می شود.



شکل ۳. پروفیل فشار-زمان موج انفجار [۲۶]

نمودار با یک افزایش ناگهانی فشار در شوک اولیه شروع می شود، سپس با یک کاهش و زوال شبه توانی ادامه پیدا می کند و به فشار محدود شده P_0 برمی گردد و در نهایت یک فاز منفی وجود دارد که در آن فشار از فشار محدود P_0 هم کمتر است. سه پارامتر مهم برای موج وجود دارد:

$$P_s = \text{فشار اوج}$$

$$T_s = \text{طول بازه زمانی فاز مثبت}$$

$$i_s = \text{ضربه مخصوص موج که سطح زیر نمودار فشار-زمان از لحظه شروع } t_0 \text{ تا پایان فاز مثبت است.}$$

پروفیل فشار-زمان برای موج انفجار معمولاً با توابع توانی مانند تابع فریدلندر^۵ توصیف می شود، که به فرم زیر است:

$$P(t) = P_s \left[1 - \frac{t}{T_s} \right] \exp \left\{ -\frac{b t}{T_s} \right\} \quad (2)$$

در آن b ضریب ثابت مثبتی است که پارامتر شکل موج گفته می شود و به فشار اوج P_s بستگی دارد. متداول ترین روندی که برای مقیاس گذاری موج انفجار استفاده می شود قانون مقیاس بندی هاپکینسون^۶ است که نشان می دهد وقتی دو جرم مختلف از یک ماده منفجره در یک اتمسفر با یک هندسه و در یک فاصله مقیاس شده برابر منفجر می شوند یک موج انفجار مشابه به وجود می آید. بنابراین هر فاصله r از خرج انفجار W به یک فاصله مقیاس شده Z تبدیل می شود. استفاده از پارامتر Z این اجازه را می دهد که داده های موج انفجار را برای موارد بسیار زیادی به صورت فشرده و مفید بیان کنیم.

$$Z = \frac{r}{W^{1/3}} \quad (3)$$

$$Z = \text{فاصله مقیاس شده (m/kg}^{1/3}\text{)}$$

$$r = \text{شعاع حفره ناشی از انفجار (m)}$$

$W =$ جرم خرج TNT معادل (kg). برای منابع دیگری به جز TNT، جرم واقعی خرج باید به جرم معادل از TNT تبدیل شود. برای این منظور باید جرم ماده منفجره را در یک ضریب تبدیلی بر مبنای انرژی مخصوص، فشار نقطه اوج یا شدت ضربه ضرب کنیم.

فشار ناشی از موج ضربه یا موج فشار با افزایش فاصله جبهه موج، کاهش یافته و به فشار محیطی میل می کند و سرانجام پس از رسیدن وضعیت به فشار محیطی، فشار منفی باعث بازگشت هوا به مرکز انفجار می گردد.

⁵ Friedlander

⁶ Hopkinson scaling law

از آنجا که بار انفجار یک بار ضربه‌ای دینامیکی است، الگوی نیرویی که در این تحقیق در نظر گرفته شده، مدل متداول مثلی است که روی حفره بوجود آمده، اعمال می‌گردد. براساس این الگو تغییرات نیرو از حداکثر به صفر بصورت خطی کاهش می‌یابد. فشار ناشی از انفجار و زمان تداوم انفجار با استفاده از نمودار ۲-۱۵ آیین‌نامه UFC [۷] تعیین گردیده است. این نمودار نتایج آزمایش‌های صحرایی بسیاری است و پارامترهای موج انفجار سطحی را برحسب تابعی از فاصله مقیاس شده (Z) نشان می‌دهد.

برای بررسی پدیده پخش امواج در خاک از ساده‌ترین معادله یعنی معادله دیفرانسیل بقای اندازه حرکت خطی که بصورت زیر قابل خلاصه کردن است، شروع می‌کنیم [۱۱].

$$\partial_k \tau_{ki} + \rho f_i = \rho \partial_t \partial_i u_i \quad (4)$$

در این معادله f نیرو در واحد جرم جسم، ρ چگالی، u جابجایی و τ تنش است. با توجه به رابطه تنش- کرنش در یک جسم همگن همسانگرد خطی ارتجاعی:

$$\tau_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (5)$$

که در آن μ و λ ثابت‌های لامه^۷ می‌باشند و جایگذاری رابطه کرنش-جابجایی:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (\partial_i u_j + \partial_j u_i) \quad (6)$$

در این رابطه و جایگذاری نتیجه در معادله قبل خواهیم داشت:

$$(\lambda + \mu) \partial_i \partial_k u_k + \mu \partial_j \partial_j u_i + \rho f_i = \rho \partial_t \partial_i u_i \quad (7)$$

این رابطه در فرم برداری بصورت:

$$(\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot u) + \mu \nabla^2 u + \rho f = \rho \partial_t \partial_i u \quad (8)$$

درمی‌آید. اگر از رابطه:

$$\nabla^2 u = \nabla (\nabla \cdot u) - \nabla \wedge \nabla \wedge u \quad (9)$$

استفاده شود، به فرم:

$$(\lambda + 2\mu) \nabla (\nabla \cdot u) - \mu \nabla \wedge \nabla \wedge u + \rho f = \rho \partial_t \partial_i u \quad (10)$$

در می‌آید.

با ورود موج به خاک با توجه به نزدیک بودن مقصد به محل ایجاد امواج، فرصت به وجود آمدن امواج برشی ایجاد نمی‌شود. بنابراین اکثر امواج بصورت امواج فشاری منتشر می‌گردند. خصوصیت این امواج آن است که در سیستم مختصات کروی تغییرات آنها تنها وابسته به مختصات شعاع (r) می‌باشند و تنها مؤلفه جابجایی ذره (u)، نیز در راستای شعاعی می‌باشد. لذا معادله جابجایی بصورت زیر در می‌آید:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2\partial u}{r\partial r} - \frac{2u}{r^2} = \frac{1}{C_L^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (11)$$

C_L = سرعت موج طولی

همانگونه که مشاهده می‌شود، در این معادله حرکت عرضی و سرعت موج برش دیده نمی‌شود. با تغییر متغیر $u = \frac{\partial \phi}{\partial r}$ داریم:

⁷ Lamé constants

$$\frac{\partial^2(r\phi)}{\partial r^2} = \frac{1}{C_L^2} \frac{\partial^2(r\phi)}{\partial t^2} \quad (12)$$

حل آن بصورت زیر می باشد:

$$\phi(r,t) = \frac{1}{r} f\left(t - \frac{r}{C_L}\right) + \frac{1}{r} g\left(t + \frac{r}{C_L}\right) \quad (13)$$

در این معادله جمله اول بیانگر موج متحرک و جمله دوم بیانگر موج بازگشتی است.

۴- روش تحقیق

در این تحقیق از نرم افزارهای AutoCAD 3D برای ترسیمات اولیه و ANSYS [۲۷] برای مدل سازی و آنالیز استفاده شده است. در روند این بررسی، ابتدا مدل پایه ای تنظیم و آنالیز حساسیت و کالیبراسیون بر روی آن انجام گرفت. پس از اطمینان از صحت نتایج نرم افزار، مدل های اصلی به گونه ای تهیه شد که تأثیر اختلاف مکانی و زمانی دو انفجار مورد بررسی قرار گیرد.

۴-۱- آنالیز حساسیت

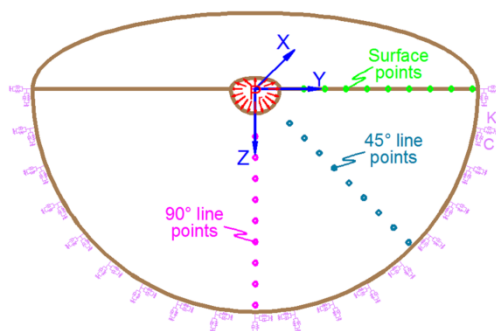
تمامی مدل های ساخته شده، نسبت به متغیرهایی همچون سایز مش ها، گام زمانی آنالیز دینامیکی و محل مرز جاذب بررسی شده اند. سایز مش ها و گام زمانی باید از دقت بالایی برخوردار باشند ولی با بالا بردن دقت محاسبات مدت زمان آنالیزها نیز افزایش می یابد، لذا این پارامترها به فرمی انتخاب شدند که آنالیزها دقت مناسبی برخوردار باشند. بیش از ۲۰ مدل تحت آنالیز حساسیت قرار گرفت تا بهترین گام های زمانی، سایز المان ها و ابعاد نیم فضا و ... را در اختیار قرار دهد و مقادیری مورد قبول قرار گرفتند که اختلافی کمتر از پنج درصد در پاسخ سیستم ایجاد نمودند.

۴-۲- صحت سنجی

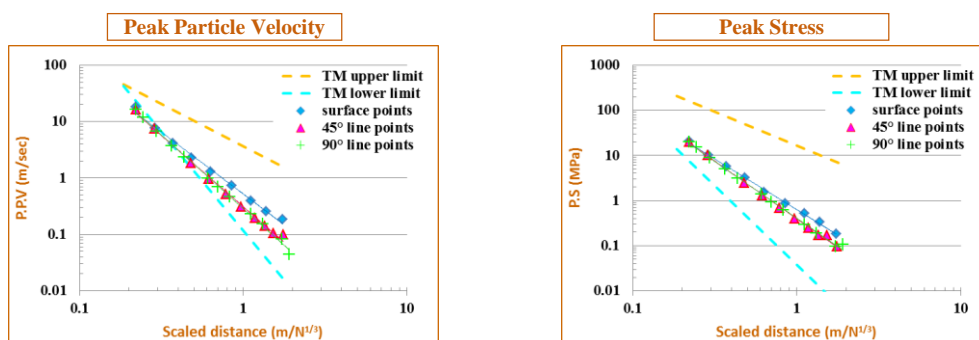
برای اطمینان از صحت نتایج مدل های ساخته شده در نرم افزار ANSYS، مدل هایی از کارهای مشابه انجام شده توسط نرم افزارهای دیگر، در این نرم افزار اجرا شد و با دقت مناسبی نتایج یکسانی به دست آمد.

همچنین نتایج حاصل از مدل های سه بعدی با نتایج تجربی نمودار ۵-۲ آیین نامه TM5-855-1 [۲۶] مقایسه گردید و مشاهده شد نتایج با دقت خوبی با آیین نامه تطابق دارند. این نمودار نتایج آزمایش های صحرایی بسیاری است و تنش حداکثر^۸ و سرعت ذره ای حداکثر برای انفجارات محدود شده در خاک های مختلف را برحسب تابعی از فاصله مقیاس شده (Z) نشان می دهد. در این راستا همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، در تعدادی گره روی مسیرهای صفر درجه، ۴۵ درجه و ۹۰ درجه روی صفحه انفجار مدل سه بعدی، خروجی تنش حداکثر و سرعت ذره ای حداکثر گرفته شد و همانطور که در شکل ۵ مشاهده می شود خروجی در هر یک از این سه راستا تقریباً بر روی یک خط واقع بوده و بین خطوط حد بالا و پایین نمودارهای آیین نامه قرار گرفته اند. که این نشان از صحت نتایج آنالیز مدل سه بعدی با نرم افزار ANSYS است.

^۸ Peak Stress (PS)



شکل ۰. نمایش مسیرها و گره‌های تعیین تنش حداکثر و سرعت ذره‌ای حداکثر



شکل ۵. مقایسه مقادیر تنش حداکثر و سرعت ذره‌ای حداکثر در گره‌های راستاهای ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه روی صفحه انفجار مدل سه بعدی با حد بالا و پایین آیین‌نامه TM

با ساختن تعدادی مدل سه بعدی و دو بعدی از یکسان بودن نتایج آنها نیز اطمینان حاصل شد. در کنترل دیگری تأثیر دو انفجار با قانون جمع آثار و قوا ناشی از دو انفجار مجزا مقایسه گردید. در نهایت در مورد دو انفجار همزمان کنترل گردید که تأثیر دو انفجار روی عمودمنصف بین دو انفجار دقیقاً دو برابر اثر یک انفجار باشد. در کلیه موارد فوق اختلافها در حد مجاز و کمتر از پنج درصد مشاهده گردید.

۴-۳- مدل سازی

مدل سازی نیم‌فضای الاستیک در نرم‌افزار ANSYS [۲۷] انجام شده است. نیم‌فضای خاکی به صورت سه بعدی و با در نظر گرفتن خصوصیات خطی و ارتجاعی برای مصالح توسط المان سه بعدی solid 187 مدل گشته است [۲۸].

برای اطمینان از عملکرد نیمه بینهایت بودن نیم‌فضا، از المان فتر و دمپر 14 combine در سه راستای R ، θ و Φ در کلیه نقاط انتهایی، برای ایجاد مرز جاذب استفاده شده است و خصوصیات المان‌های مماسی و المان‌های شعاعی به طور جداگانه به آنها اختصاص یافته است. المان‌بندی با دقت قابل قبول که با سعی و خطاهای فراوان در مرحله تنظیم کردن مدل ذکر شد، صورت گرفته است.

به طور کلی این مدل سه بعدی که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، زمان آنالیز بالایی داشته و بالغ بر ۲۲،۰۰۰ گره و ۱۱،۰۰۰ المان را شامل می‌شود.

بار انفجار به صورت یک بار دینامیکی و همانطور که در قسمت ۳-۲ اشاره شد به صورت مثلثی اعمال شده است. بار به صورت فایل text به نرم‌افزار ANSYS وارد و با انجام کلیه تنظیمات مربوط به نوع بار دینامیکی در نرم‌افزار، بر روی سطح حفره واقع در مرکز اعمال شده است. فشار ناشی از انفجار دوم نیز با تأخیر زمانی به صورت فایل text به نرم‌افزار وارد شده و پس از انجام تنظیمات، بر روی سطح حفره دیگر اعمال گردید.

۴-۴- بررسی پارامتری

در این تحقیق هدف بررسی پارامتری رفتار سطحی نیم‌فضاهای ارتجاعی تحت دو انفجار سطحی می‌باشد. انفجارها مشابه بوده و انفجار دوم با یک اختلاف زمانی نسبت به انفجار اول رخ می‌دهد. موقعیت انفجار اول در مرکز در نظر گرفته شده و انفجار دوم در چندین موقعیت‌های مکانی روی سطح جابه‌جا گردیده است. این آنالیزهای ساده‌تر می‌تواند جایگزین مناسبی برای آنالیزهای پیچیده غیرخطی بوده و معیارهای طراحی مورد نیاز طراح را با خطای معقولی در اختیارش قرار دهد. چون با توجه به مباحث مطرح شده در قسمت‌های قبل می‌توان تغییر در تمام نقاط غیر از حفره انفجار را الاستیک در نظر گرفت.

پارامترهایی همچون تغییر شکل، دوران، تنش، ممان و ... که در نقاط مختلف خاک و سازه محاسبه می‌شوند، برای طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

پارامترهای آنالیز در این تحقیق عبارتند از:

✓ اختلاف زمانی دو انفجار (t)

✓ اختلاف مکانی دو انفجار (y)

مدل‌های آنالیز شده در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول پارامتر r شعاع حفره یک انفجار، y فاصله مرکز تا مرکز انفجارها و t₀ مدت زمان اعمال فشار انفجار می‌باشد.

جدول ۱: مدل‌های آنالیز شده

شماره مدل	فاصله مکانی (y)	تأخیر زمانی (t)
1	0	(0.0) t ₀
2	3r	(0.0 - 1.0 - 2.0) t ₀
3	4r	(0.0 - 1.0 - 2.0) t ₀
4	5r	(0.0 - 1.0 - 2.0) t ₀
5	6r	(0.0 - 1.0 - 2.0) t ₀

معیارهای رفتاری که در این تحقیق اندازه‌گیری شده‌اند، عبارتند از:

✓ پاسخ‌های سطحی

▪ طیف جابه‌جایی

▪ طیف سرعت

▪ طیف شتاب

پارامترهای ثابت آنالیز عبارتند از:

✓ خصوصیات مصالح نیم‌فضا (پارامترهای مدل‌سازی خاک نرم)

▪ مدول یانگ (E=1.1 GPa)

▪ جرم حجمی (ρ=1700 Kg/m²)

▪ ضریب پواسن (ν=0.3)

▪ میرایی (ξ=8%)

▪ شعاع نیم‌فضا (R=30 m)، پس از سعی و خطاهای مختلف به گونه‌ای انتخاب گردید که به اندازه کافی از محل

انفجار دور بوده و مسئله بازگشت موج از طرف مرز را مرتفع نماید و از طرفی تا حد امکان مدلی کوچک تر و با زمان آنالیز معقول در اختیار قرار دهد.

✓ خصوصیات انفجارها (مشخصات دو انفجار یکسان در نظر گرفته شده است)

▪ وزن خرج انفجار (W=10 Kg) و شعاع حفره (r=2.2 m) از نمودار ۷-۵ آیین نامه TM5-855-1 [۲۶] استخراج گردید. خصوصیات انفجار نیز از نمودار ۱۵-۲ آیین نامه UFC 3-340-02 [۶] تعیین گردید و مشاهده شد این انفجار، فشار (P_r=44.3 MPa) را در مدت زمان (t₀=1.23 msec) بر سطح حفره اعمال می کند.

✓ خصوصیات مرز جاذب

همانطور که گفته شد برای اطمینان از عملکرد نیمه بینهایت نیم فضا، در انتهای نیم فضا مرز جاذبی تعبیه گردیده تا انرژی باقیمانده از انفجار را که بدان مرز رسیده، جذب نموده و مانع از برگشت آن به داخل نیم فضا گردد. با توجه به سه بعدی بودن مدل، در هر نقطه انتهایی از نیم فضا سه المان فنر و دمپر، برای مدل کردن مرز جاذب، استفاده شده اند. مقادیر میرایی در راستاهای مماسی وابسته به سرعت موج برشی بوده و میرایی در راستای شعاعی توسط سرعت موج فشاری تعیین می گردد. ضریب سختی فنرها نیز در سه راستا مساوی بوده و با ضریب الاستیسیته و ضریب پواسن نیم فضا و مساحت مرز جاذب رابطه دارد. نحوه محاسبه این مقادیر در ادامه آمده است.

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = 499 \text{ m/sec} \quad (14)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-\nu)}} = 993 \text{ m/sec} \quad (15)$$

$$C_R = \rho V_p A = 8.97 \times 10^9 \text{ N.sec/m} \quad (16)$$

$$C_{\theta,\phi} = \rho V_s A = 4.8 \times 10^9 \text{ N.sec/m} \quad (17)$$

$$K = \frac{E}{0.3(1-\nu^2)} \left(\frac{\sqrt{A}}{0.3} \right)^{-3/4} = 3.62 \times 10^9 \text{ N/m} \quad (18)$$

۴-۵- آنالیز

از آنالیز دینامیکی نیومارک-بتا^۹ برای تحلیل نیم فضا تحت بارگذاری استفاده شده و ضرایب γ و β در این روش به ترتیب ۰/۵ و ۰/۲۵ لحاظ شده اند. میرایی محیط توسط ضرایب میرایی ریلی^{۱۰} برای نرم افزار تعریف شده است. نحوه محاسبه آن در زیر آمده است.

$$C = \alpha M + \beta K \quad (19)$$

$$\alpha = \frac{2\xi\omega_1\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} = 8.51 \text{ rad/sec} \quad (20)$$

$$\beta = \frac{2\xi}{\omega_1 + \omega_2} = 0.45 \times 10^{-4} \text{ rad/sec} \quad (21)$$

که در این روابط ω_1 و ω_2 کمترین و بیشترین فرکانس های غالب هستند.

به طور متوسط مدت زمان آنالیز هر مدل سه بعدی روی سیستم دو هسته ای ۲/۸ گیگا هرتز با RAM، ۴ گیگا بایت، دو ساعت به طول می انجامید و فایل ایجاد شده در طی آنالیز که حاوی کلیه پارامترها در تمامی گره ها است، ۲۵ گیگا بایت از حافظه کامپیوتر را اشغال

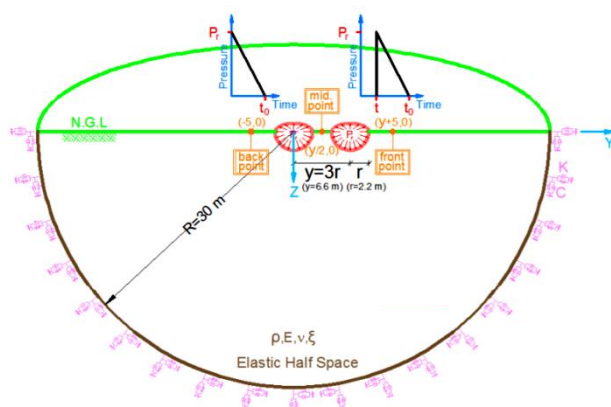
⁹ Newmark's - β

¹⁰ Rayleigh damping coefficients

کرده است.

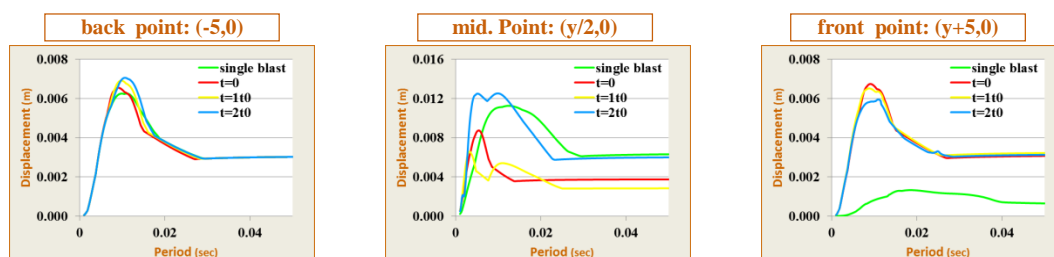
۵- بحث و ارائه نتایج

همانطور که گفته شد، برای طراحی سازه‌های سطحی طیف‌های جابه‌جایی، سرعت و شتاب کنترل کننده می‌باشند، لذا در این تحقیق تعدادی از نقاط روی سطح واقع بر صفحه گذرنده از مرکز دو انفجار (صفحه Y-Z) مورد بررسی قرار گرفته است. این سه نقطه سنجش روی سطح، یکی بین دو انفجار و دو تا در طرفین انفجارها در نظر گرفته شده و در شکل ۶ رسم شده است. با توجه به انفجار در نظر گرفته شده در این تحقیق که معادل ۱۰ کیلوگرم TNT بوده و مطابق نمودار ۷-۵ آیین‌نامه TM5-855-1 [۲۶] حفره‌ای با شعاع ۲/۲ متر ایجاد می‌کند ($r=2.2$ m)، نقطه بین دو انفجار (mid. point) دقیقاً وسط فاصله مکانی بین دو انفجار بوده ($y/2$). نقطه بررسی پشت انفجار اول (back point)، فاصله‌ای حدود یک شعاع حفره از لبه حفره انفجار اول دارد. انتخاب این معیار بدین دلیل است که پس از انجام آنالیزها مشخص شد، تأثیر قابل توجه انفجار در محدوده‌ای به فاصله یک شعاع حفره از لبه حفره است. با توجه به ثابت بودن موقعیت مکانی انفجار اول در مرکز نیم فضا، نقطه پشت دارای مختصات ثابت ۵- روی سطح است. نقطه بررسی جلو انفجار دوم (front point)، به دلیل مشابه فاصله‌ای حدود یک شعاع حفره از لبه حفره انفجار دوم دارد، یعنی فاصله‌ای حدود ۵ متر که حدوداً معادل یک قطر حفره حاصل از انفجار است، بنابراین دارای مختصات $y+5$ روی سطح نیم‌فضا است.

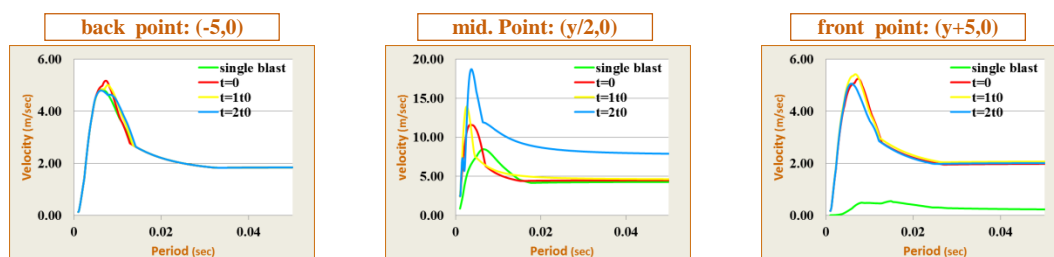


شکل ۶. موقعیت نقاط جلو، میانی و پشت روی صفحه

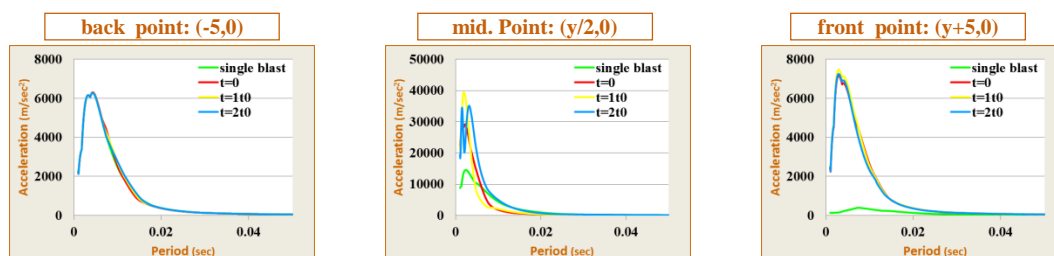
مدت زمان اعمال انفجار از نمودار ۱۵-۲ آیین‌نامه UFC 3-340-02 [۶] تعیین گردیده و مشاهده شد این انفجار در مدت زمان ۱/۲۳ میلی ثانیه بر سطح حفره اعمال می‌شود ($t_0=1.23$ msec). طیف جابه‌جایی، سرعت و شتاب مربوط به دو انفجار، در سه تأخیر زمانی (دو انفجار همزمان، تأخیر زمانی t_0 و تأخیر زمانی $2t_0$) و همچنین طیف‌های نظیر در حالت یک انفجار استخراج گردیده است این نمودارهای مرکب برای پارامترهای شتاب، سرعت و جابه‌جایی در سه نقطه سنجش روی سطح، یکی بین دو انفجار و دو تا در طرفین انفجارها رسم شده است. خروجی آن ۱۴۴ نمودار بوده که به عنوان نمونه نمودارهای پاسخ‌های سطحی برای مدلی که فاصله مرکز تا مرکز انفجارها سه برابر شعاع یک حفره می‌باشد ($y=3r$) در شکل ۷ تا شکل ۹ ارائه شده است.



شکل ۷. طیف‌های جابه‌جایی در نقاط جلو، میانی و پشت دو انفجار با فاصله $y=3r$

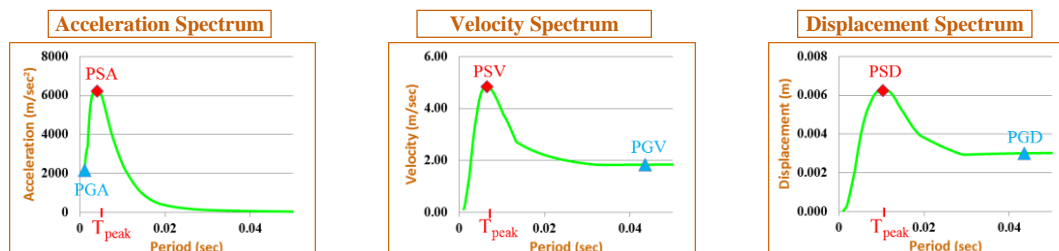


شکل ۸. طیف‌های سرعت در نقاط جلو، میانی و پشت دو انفجار با فاصله $y=3r$



شکل ۹. طیف‌های شتاب در نقاط جلو، میانی و پشت دو انفجار با فاصله $y=3r$

برای مقایسه روندها در این ۱۴۴ نمودار پاسخ‌های سطحی خروجی آنالیزها، پارامترهای تأثیرگذار در طیف‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. زمان وقوع پیک در نمودارهای طیف (T_{peak})، مقدار ماکزیمم در طیف جابه‌جایی (PSD)، مقدار ماکزیمم در طیف سرعت (PSV)، مقدار ماکزیمم در طیف شتاب (PSA)، مقدار ثابت نمودار در طیف جابه‌جایی (PGD)، مقدار ثابت نمودار در طیف سرعت (PGV) و مقدار ثابت نمودار در طیف شتاب (PGA)، پارامترهای تأثیرگذار در هر طیف می‌باشند که در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.



شکل ۱۰. نقاط تأثیرگذار در طیف جابه‌جایی، طیف سرعت و طیف شتاب

به طور مشابه برای سایر مدل‌ها، کلیه مراحل فوق‌الذکر انجام، نمودارها و جداولی برای هر مدل تهیه شد، که سند پشتیبان موجود می‌باشد. از آنجاییکه هدف این تحقیق بررسی اثر انفجار دوم بر روی انفجار اول می‌باشد، برای مقایسه بهتر دو انفجار نسبت به یک انفجار، پارامترهای تأثیرگذار در طیف‌های مربوط به دو انفجار بر پارامترهای نظیر در حالت تک انفجار تقسیم شده و خلاصه این بررسی پارامتری بر روی طیف‌های سطحی در جدول ۲ و جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۲: نسبت پارامترهای اصلی در پاسخ‌های سطحی

طیف شتاب						طیف سرعت						طیف جابه‌جایی																
نقطه جلو		نقطه میانی		نقطه پشت		تأخیر مکانی		نقطه جلو		نقطه میانی		نقطه پشت		تأخیر مکانی		نقطه جلو		نقطه میانی		نقطه پشت		تأخیر مکانی						
PGA	PSA	PGA	PSA	PGA	PSA	t ₀	(y)	PGV	PSV	PGV	PSV	PGV	PSV	PGD	PSD	PGD	PSD	PGD	PSD	t ₀	(y)	t ₀	(y)					
18.9	18.4	2.5	2.0	1.0	1.1	0	3r	8.5	9.6	1.0	1.4	1.0	1.0	4.7	5.1	0.6	0.8	1.0	1.1	0	3r	0	3r					
19.8	19.2	2.4	2.7			t ₀		8.9	9.9	1.1	1.6			t ₀	5.0	4.9	0.4			0.6		2t ₀		4.8	4.5	1.0	1.1	0
19.2	18.6	2.2	2.4			0		11.7	11.7	0.8	1.1			0	4.8	5.6	0.7			0.9		0		4.8	5.6	0.7	0.9	0
28.2	20.3	0.9	1.2	1.0	1.0	t ₀	4r	12.2	12.3	1.2	1.5	1.0	1.0	5.0	5.8	1.0	1.4	1.0	1.1	t ₀	4r	t ₀	4r					
29.4	21.2	1.0	1.3			2t ₀		11.8	12.0	1.1	1.5			2t ₀	4.8	5.3	1.0			1.6		0		4.8	5.3	1.0	1.6	0
28.6	20.6	1.0	1.2			0		14.4	14.7	0.9	0.9			0	5.7	6.8	0.6			0.7		0		5.7	6.8	0.6	0.7	0
37.3	27.1	1.3	1.3	1.0	1.0	t ₀	5r	15.0	15.4	0.8	0.7	1.0	1.0	6.0	7.2	0.5	0.5	1.0	1.0	t ₀	5r	t ₀	5r					
39.1	28.4	0.9	1.1			2t ₀		14.6	15.0	1.8	1.6			2t ₀	5.8	7.0	1.1			1.3		0		5.8	7.0	1.1	1.3	0
37.9	27.6	1.9	2.2			0		19.6	18.6	0.1	0.1			0	4.6	9.0	0.1			0.1		0		4.6	9.0	0.1	0.1	0
58.5	36.4	0.1	0.1	1.0	1.0	t ₀	6r	20.6	19.4	0.9	0.9	1.0	1.0	4.9	9.7	0.7	0.7	1.0	1.0	t ₀	6r	t ₀	6r					
60.7	38.1	1.2	1.2			2t ₀		19.9	18.8	1.6	1.6			2t ₀	4.7	9.8	1.3			1.4		0		4.7	9.8	1.3	1.4	0
59.2	37.0	1.7	1.8			0								0														

جدول ۳: نسبت زمان وقوع پاسخ سطحی حداکثر به مدت زمان انفجار (T_{peak}/t_0)

شتاب			سرعت			جابه‌جایی			تأخیر	فاصله مکانی (y)
جلو	میانی	پشت	جلو	میانی	پشت	جلو	میانی	پشت	زمانی (t)	
6.5	1.9	3.5	12.1	5.3	5.1	15.1	10.2	9.0	تک انفجار	3r
			6.0	2.8	6.0	7.4	4.4	7.4	0	
			5.5	2.1	6.4	7.1	2.6	8.0	t ₀	
			4.8	3.0	5.1	8.9	8.1	8.6	2t ₀	
6.9	2.0	2.8	7.6	4.4	5.9	18.1	6.6	8.0	تک انفجار	4r
			7.5	3.4	7.1	8.0	7.0	7.9	0	
			7.1	4.2	5.6	7.8	6.6	8.1	t ₀	
			6.0	5.1	5.5	7.7	7.3	8.5	2t ₀	
7.7	4.3	3.5	16.6	6.3	5.5	18.1	7.4	8.3	تک انفجار	5r
			5.6	4.6	5.5	9.0	6.0	8.9	0	
			5.6	3.7	5.8	8.6	7.1	9.2	t ₀	
			5.7	4.7	6.1	8.1	6.6	9.6	2t ₀	
8.3	4.7	2.6	8.3	7.5	5.6	33.9	8.8	8.3	تک انفجار	6r
			6.1	7.3	6.2	8.2	10.0	8.2	0	
			5.7	5.5	6.4	8.8	7.5	7.5	t ₀	
			5.7	6.1	6.7	8.6	7.7	7.7	2t ₀	

روندهای مشاهده شده در پاسخ‌های این مدل‌ها عبارتند از:

- انفجار دوم روی پاسخ‌های سطحی در ناحیه پشت تأثیر چندانی ندارد.
- در ناحیه جلو در تأخیر زمانی $1t_0$ انفجار دوم بیشترین تأثیر افزایشی را روی انفجار اول دارد.
- در ناحیه میانی زمانی که دو انفجار به طور همزمان رخ می‌دهند، انفجار دوم باعث کاهش اثر انفجار اول می‌گردد. در حالیکه با تأخیر زمانی $2t_0$ انفجار دوم بیشترین تأثیر افزایشی را خواهد داشت.
- در طیف شتاب، در ناحیه میانی و ناحیه جلو به ازای تمامی تأخیرهای زمانی، انفجار دوم باعث افزایش اثر انفجار اول می‌گردد.
- انفجار دوم کمترین تأثیر را بر روی طیف جابه‌جایی و بیشترین تأثیر را بر طیف شتاب دارد.
- انفجار دوم باعث می‌گردد، مقادیر حداکثر در طیف‌ها در پریودهای کمتری ایجاد شود.
- تأخیرهای زمانی مختلف انفجار دوم تأثیر قابل توجهی بر تغییرات طیف شتاب نمی‌گذارد.

۸. به طور متوسط مقادیر حداکثر در طیف‌های جابه‌جایی، سرعت و شتاب به ازای تأخیر زمانی $1t_0$ در پریودهای کمتری ایجاد می‌شوند.
۹. به طور متوسط مقادیر حداکثر در طیف‌های جابه‌جایی، سرعت و شتاب به ازای تأخیر زمانی $2t_0$ در پریودهای بزرگ‌تری ایجاد می‌شوند.
۱۰. در ناحیه میانی، در طیف جابه‌جایی، بیشترین افزایش در مقادیر حداکثر طیف (PS و PG) به ازای فاصله مکانی $y=4r$ رخ می‌دهند.
۱۱. در ناحیه میانی، در طیف سرعت و شتاب، بیشترین افزایش در مقادیر حداکثر طیف (PS و PG) به ازای فاصله مکانی $y=3r$ رخ می‌دهند.
۱۲. در ناحیه جلو، در طیف جابه‌جایی، سرعت و شتاب، بیشترین افزایش در مقادیر حداکثر طیف (PS و PG) به ازای فاصله مکانی $y=6r$ رخ می‌دهند.
۱۳. در فاصله مکانی $y=3r$ مقادیر حداکثر در طیف‌ها در پریودهای کمتری ایجاد می‌شود.
۱۴. به طور متوسط با افزایش فاصله مکانی دو انفجار مقادیر حداکثر در طیف‌ها در پریودهای بیشتری ایجاد می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری

این تحقیق بر روی اثر دو انفجار متمرکز شده و با استفاده از نتایج آن می‌توان برای اهداف مختلف نقاط بحرانی را تعیین نمود. در مباحث مربوط به انفجار معمولاً با توجه به هدفی که دنبال می‌شود می‌توان از چند انفجار به جای یک انفجار استفاده نمود. تأثیر انفجارها بر یکدیگر می‌تواند افزایشی یا کاهش‌ی باشد، گاهی نیاز است انفجارها اثر یکدیگر را تشدید کنند، گاهی نیز نیاز است با ایجاد یک انفجار اثر انفجار دیگر را خنثی نمود. این اهداف با تهیه یک الگوی مناسب از چیدمان انفجارها و اختلاف‌های زمانی بین وقوع آنها قابل دستیابی است. خلاصه نتایج این تحقیق عبارتند از:

۱. مطابقت با دقت مناسب نمودارهای خروجی آنالیزهای الاستیک انجام شده در قسمت صحت سنجی با نتایج آزمایش‌های گسترده تجربی ارائه شده در آیین‌نامه TM، حاکی از آنست که نتایج این آنالیزهای الاستیک می‌تواند جایگزین آنالیزهای پیچیده غیرخطی گردد و معیارهای طراحی مورد نیاز طراح را با خطای معقولی در اختیارش قرار دهد.
۲. در ناحیه جلو در تأخیر زمانی $1t_0$ انفجار دوم بیشترین تأثیر افزایشی را روی انفجار اول دارد.
۳. در ناحیه میانی زمانی که دو انفجار به طور همزمان رخ می‌دهند، انفجار دوم باعث کاهش اثر انفجار اول می‌گردد. در حالیکه با تأخیر زمانی $2t_0$ انفجار دوم بیشترین تأثیر افزایشی را خواهد داشت.
۴. انفجار دوم کمترین تأثیر را بر روی طیف جابه‌جایی و بیشترین تأثیر را بر طیف شتاب دارد.
۵. انفجار دوم باعث می‌گردد، مقادیر حداکثر در طیف‌ها در پریودهای کمتری ایجاد شود.
۶. تأخیرهای زمانی مختلف انفجار دوم تأثیر قابل توجهی بر تغییرات طیف شتاب نمی‌گذارد.
۷. به طور متوسط مقادیر حداکثر در طیف‌های جابه‌جایی، سرعت و شتاب به ازای تأخیر زمانی $1t_0$ در پریودهای کمتری ایجاد می‌شوند.
۸. به طور متوسط مقادیر حداکثر در طیف‌های جابه‌جایی، سرعت و شتاب به ازای تأخیر زمانی $2t_0$ در پریودهای بزرگ‌تری ایجاد می‌شوند.

۹. به طور متوسط با افزایش فاصله مکانی دو انفجار مقادیر حداکثر در طیف‌ها در پریودهای بیشتری ایجاد می‌شود.
۱۰. با استفاده از نتایج ارائه شده در جداول نسبت دو انفجار به یک انفجار (جدول ۲ و جدول ۳) و داشتن پاسخ‌های مربوط به یک انفجار که از پایگاه داده آنالیزهای ساده دوبعدی قابل استخراج است، می‌توان پاسخ مربوط به دو انفجار را در نقاط بحرانی تعیین نمود.
۱۱. تکمیل این تحقیقات با تعیین پاسخ‌های عمقی نیم‌فضا، بررسی پارامترهای طراحی سازه‌های مدفون تحت دو انفجار سطحی و تعیین ضرایبی که نسبت عکس‌العمل‌ها در دو انفجار به یک انفجار هستند، می‌تواند آنالیزهای ساده دو بعدی را جایگزین آنالیزهای پیچیده سه بعدی نماید.

۷- منابع

- [1] Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- [2] Mooney, M. A., & Miller, P. K. (2009). Analysis of Lightweight Deflectometer Test Based on In Situ Stress and Strain Response. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(2), 199-208. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2009\)135:2\(199\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2009)135:2(199))
- [3] Roesset, J. M. (1998). Nondestructive Dynamic Testing of Soils and Pavements. *Tamkang Journal of Science and Engineering*, 1, 61-81.
- [4] US Army Corps of Engineers. (1991). *Nondestructive Testing of Concrete with Ultrasonic Pulse-Echo. REMR (Repair, Evaluation, Maintenance, and Rehabilitation Research Program) Technical Note CS-ES-1.10.*
- [5] Kourehli, S. S., & Hamidi Khasraghi, M. B. (2022). Investigation of the Behavior of Cylindrical Steel Tanks Under Surface Blast Loads. *Journal of Structural and Construction Engineering*. <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.323712.2688>
- [6] Departments of the Army; the Navy and the Air Force. (1990). *TM 5-1300, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions.*
- [7] US Department of Defense. (2008). *UFC (Unified Facilities Criteria) 3-340-02, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions.*
- [8] Najimi Varzane, M. (2000). *Study the Effect of Air Attacks Explosion on Military Structures* [Master's thesis, University of Tehran]. (In Persian)
- [9] Shipe, J. A., & Carter, C. J. (2003). Defensive Design. *Modern Steel Construction, AISC*, 43(11), 25-31.
- [10] Longinow, A., & Alfawakhiri, F. (2003). Blast resistant design with structural steel. *Modern Steel Construction, AISC*, 43(10), 61-66.
- [11] Graff, K. F. (1991). *Wave Motion in Elastic Solids*. Dover Publications.
- [12] Bangash, M. Y. H. (1993). *Impact and Explosion: Structural Analysis and Design*. Blackwell Scientific.
- [13] Isenberg, J., Lee, L.-c., & Agbabian, M. S. (1973). Response of Structures to Combined Blast Effects. *Transportation Engineering Journal of ASCE*, 99(4), 887-908.
- [14] Kato, S., Sohri, T., & Gould, P. L. (1986). A Modified Thin-Layered Far Field Soil Element for Soil-Structure Interaction of Axisymmetric Structures. *Computers and Geotechnics*, 2(3), 167-184.
- [15] Lysmer, J., & Richart Jr, F. E. (1966). Dynamic Response of Footings to Vertical Loading. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 92(1), 65-91.
- [16] Wolf, J. P., & Song, C. (1996). *Finite-Element Modelling of Unbounded Media*. John Wiley & Sons.
- [17] Kellezi, L. (2000). Local Transmitting Boundaries for Transient Elastic Analysis. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 19(7), 533-547.
- [18] Yerli, H. R., Temel, B., & Kiral, E. (1998). Transient Infinite Elements for 2D Soil-Structure Interaction Analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(10), 976-988.
- [19] Devine, J. F. (1966). Avoiding Damage to Residence from Blast Vibrations. *Highway research record*(135), 35-42.
- [20] Ambraseys, N. R., & J., H. A. (1968). Dynamic Behavior of Rock Masses. In K. G. Stagg & O. C. Zienkiewicz (Eds.), *Rock Mechanics in Engineering Practice* (pp. 203-227). John Wiley & Sons.
- [21] Boh, J. W., Louca, L. A., & Choo, Y. S. (2007). *Finite Element Analysis of Blast Resistance Structures in the Oil and Gas Industry*. ABAQUS Users' Conference, Paris, France.
- [22] Ye, T.-q. (2008). Field Experiment for Blasting Crater. *Journal of China University of Mining and Technology*, 18(2), 224-228. [https://doi.org/10.1016/S1006-1266\(08\)60047-4](https://doi.org/10.1016/S1006-1266(08)60047-4)
- [23] Baker, W. E., Westine, P. S., & Dodge, F. T. (1991). *Similarity Methods in Engineering Dynamics: Theory and Practice of Scale Modeling* (2nd ed.). Elsevier Science.

- [24] Kinney, G. F., & Graham, K. J. (1985). *Explosive Shocks in Air* (2nd ed.). Springer.
- [25] Ambrosini, D., Luccioni, B., & Danesi, R. (2004). Influence of the Soil Properties on Craters Produced by Explosions on the Soil Surface. *Mecánica Computacional-Structural and Solid Mechanics*, XXIII(7), 571-590.
- [26] Headquarters; Department of the Army. (1986). *TM 5-855-1, Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons*.
- [27] ANSYS® *Mechanical APDL, Release 19.0, Help System*. ANSYS, Inc.
- [28] Jahed Motlagh, H. R., Noban, M. R., & Eshraghi, M. A. (2008). *ANSYS Finite Element* (4th ed.). University of Tehran Press. (In Persian)