

اثر انفجارهای هم‌زمان و چندمرحله‌ای بر پاسخ سازه‌های مدفون در خاک

سعید فیروزآبادی

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران

هادی دشتی*

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران

علیرضا فیوض

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

hdashti1356@yahoo.com

تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۱۲/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۵

چکیده

سازه‌های زیرزمینی بهترین گزینه برای احداث قرارگاه‌های فرماندهی و کنترل، پناهگاه‌ها، انبار سلاح‌ها و تجهیزات مهم و صنایع دفاعی می‌باشند. یکی از موضوعات مهمی که پیرامون آن‌ها مطالعات نسبتاً محدودی انجام شده است و ممکن است در طراحی این نوع سازه‌ها لحاظ نشود، نحوه اعمال بارگذاری ناشی از پرتاب بمب‌های هوایی هواپیماها بر روی سازه‌های مدفون زیرزمینی می‌باشد. وقوع بارهای انفجاری به صورت هم‌زمان و چندمرحله‌ای ناشی از پرتاب موشک از هواپیما و پهبادها نیز پاسخ سازه‌ای مدفون را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از این رو در مطالعه‌ی حاضر پس از صحت‌سنجی مدل عددی با یک مدل واقعی، به بررسی مقایسه‌ای اثر بمب‌های هم‌زمان و چندمرحله‌ای بر پاسخ سازه‌های امن مدفون در خاک با استفاده از روش اجزاء محدود پرداخته شده است. بررسی این موضوع در چهار حالت با عمق دفن ثابت و موقعیت قرارگیری انفجار مختلف انجام گرفته است. نتایج حاصل از بیشینه تنش‌های ایجاد شده نشان می‌دهد، که در حالت اعمال بارهای ناشی از بمب‌گذاری چندمرحله‌ای، سازه‌های زیرزمینی مورد بررسی، در تمامی موقعیت‌های در نظر گرفته شده، متحمل تنش‌های بیشتری نسبت به حالت بارگذاری انفجاری هم‌زمان شده است. تفاوت این تغییرات در برخی نقاط تا حدود ۱۵ درصد مشاهده گردیده است.

کلید واژگان: اجزاء محدود، سازه مدفون، انفجار چندمرحله‌ای، انفجار هم‌زمان

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، متأسفانه کشورهای مختلف با حملات و جنگ‌های شهری گسترده مواجه شده و در بیشتر موارد وقوع انفجار موجب تخریب سازه و یا تلفات زیاد گردیده است. از این رو در بسیاری از کشورها تحقیقاتی برای تدوین ضوابط طراحی سازه‌های مختلف تحت این‌گونه انفجارات و یا بررسی انفجار بر سازه‌ها، قرار گرفته است [۱-۳].

در زمینه بررسی پاسخ سازه‌های مدفون در برابر بارهای انفجاری مطالعات مختلفی انجام شده است [۴-۷]. در مطالعه بازیار و همکاران به شبیه‌سازی اثر انفجار بر سازه‌های زیرزمینی پرداخته شد. از نتایج این مطالعه می‌توان برای درک بهتر اثر بارگذاری انفجار بر سازه‌های زیرزمینی و در صورت لزوم صحت سنجی نرم‌افزارهای عددی جهت مطالعات وسیع‌تر استفاده کرد [۸]. در پژوهشی قلی زاد و رجبی به ارزیابی خسارات وارده بر سازه مدفون در انفجار زیرسطحی و مقایسه آن با انفجار سطحی پرداختند. برای این منظور یک سازه بتن مسلح مدفون در عمق ۴ متری خاک که قبلاً تحت اثر انفجار سطحی قرار گرفته بود، تحت اثر انفجار مدفون با عمق ۶ متر بررسی شد و نتایج آن مانند فشار و خسارات وارده با یکدیگر مقایسه شد [۹]. در مطالعه اسماعیلی با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC2D، روند انتشار امواج فشاری ناشی از انفجار بمب GP2000 را مدل‌سازی و این اثرات را در قالب یک مطالعه موردی برای بخشی از خط ۷ متروی تهران بررسی نمود و بخش‌های مختلف سیستم پوشش تونل را مورد ارزیابی قرار داد. در قسمتی از این مطالعه، در خصوص تغییرات تلاش‌های برشی در پوشش تونل نسبت به پارامترهایی مانند ضریب فشار سکون خاک حساسیت سنجی صورت گرفت [۱۰]. خلیلی فر به بررسی تأثیر تزریق دوغاب سیمان و اصلاح خاک اطراف تونل بر کاهش اثرات ناشی از بار انفجار بر سازه تونل با استفاده از مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار FLAC2D پرداخت و در نهایت تأثیر حضور یک دال بتنی به‌عنوان لایه‌ی جداشونده در فاصله بین سطح زمین تا سقف تونل بررسی شد [۱۱]. نوری زاده به بررسی تأثیرات عمق و شکل سازه مدفون بر رفتار آن‌ها در اثر انفجارات زیرزمینی پرداخت. روش تحقیق بر مبنای مدل‌سازی عددی فرآیند انفجار زیرزمینی بر سازه‌های مذکور با کمک نرم‌افزار AUTODYN14 بود و ضرایب مدل‌های مادی مصالح از کتابخانه نرم‌افزار و از حلگر لاگرانژ استفاده شد. با بررسی نحوه انتشار موج انفجار در خاک بر روی سازه‌ها این نتیجه به دست آمد که با افزایش عمق دفن سازه، فشار کمتری بر روی المان‌های سازه ایجاد

می‌شود [۱۲]. قزوینیان و همکاران به بررسی اثر بمب‌های هوایی روی سازه‌های زیرزمینی پرداختند. پس از انتخاب پالس دینامیکی ناشی از انفجار یک بمب با وزن و میزان نفوذ معین در سطح زمین، و محاسبه شکل و ابعاد کراتر ایجادشده در اثر انفجار بمب، پالس دینامیکی به‌صورت شعاعی به مرز کراتر اعمال شد و نحوه انتشار و میرایی موج در محیط سنگی ناپیوسته مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. به‌منظور مدل‌سازی محیط ناپیوسته و انتشار موج دینامیکی در این محیط از نرم‌افزار المان مجزای UDEC که قابلیت تحلیل دینامیکی مدل ناپیوسته زمین را داراست، استفاده شد. مطالعات انجام‌شده نشان داد که برای یک بمب با وزن و میزان نفوذ معین با افزایش عمق سازه، احتمال ناپایداری سازه در اثر شوک انفجار در سطح زمین کاهش می‌یابد. همچنین وجود ناپیوستگی‌های مؤثر (با سختی و پارامترهای مقاومتی پایین) نیز این احتمال را کاهش می‌دهند. تحت شرایط یکسان چنانچه زاویه شیب ناپیوستگی نسبت به خط واصل مرکز انفجار و محل سازه حدود ۶۰ درجه باشد احتمال پایداری سازه نسبت به سایر زاویه‌ها افزایش می‌یابد [۱۳].

با توجه به موقعیت استراتژیک کشورمان در منطقه خاورمیانه و وجود این تهدیدات، لازم است این موضوع به‌صورت جدی مورد بررسی و توجه قرار گیرد. طراحی سازه در برابر بارهای انفجاری در گذشته فقط محدود به ساختمان‌های نظامی و ساختمان‌های مرتبط با فعالیت‌های هسته‌ای و سوختی می‌شد. اما در سالین اخیر، رشد روزافزون حملات تروریستی در سراسر دنیا و به دنبال آن اقدامات نظامی بازدارنده دولت‌ها، موجب توجه ویژه به بارهای انفجاری گشته و اهمیت طراحی سازه در مقابل بارهای ناشی از انفجار را افزایش داده است. از سوی دیگر با در نظر داشتن کاربرد پدافند غیرعامل در سازه‌های در معرض انفجار، مطالعه و بررسی حالات خاص از بارگذاری انفجاری (مانند انفجار چندمرحله‌ای و هم‌زمان) در طراحی و ایمن‌سازی این سازه‌ها در نظر، ضروری جلوه می‌کند.

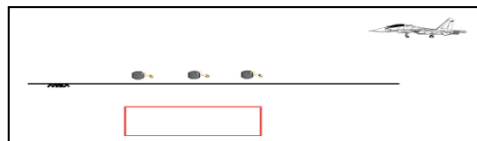
با توجه به این توضیحات در مطالعه‌ی حاضر به بررسی مقایسه‌ای اثر بمب‌های هم‌زمان و چندمرحله‌ای بر پاسخ سازه‌های امن مدفون در خاک با استفاده از روش اجزای محدود پرداخته شده است. نتایج این مطالعه در بخش طراحی سازه‌های مدفون با کاربری نظامی یا حتی سازه‌های در بخش‌های مختلف صنعت از جمله معادنی که با بحث ایمنی سازه‌های در معرض انفجار روبه‌رو می‌باشند، می‌تواند به‌صورت کاربردی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین بحث انفجارهای پی‌درپی در نقاط مختلف و بررسی پاسخ در یک سازه مدفون از جنبه‌های نوآوری این تحقیق هست.

۲- روش تحقیق

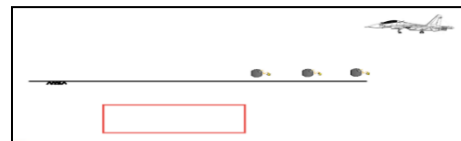
۲-۱- نحوه انجام مطالعه و معرفی مدل‌های مورد بررسی

با وجود پدافندهای راداری و سامانه‌های سپر دفاعی امکان حضور هواپیماهای نظامی بر روی سازه‌های هدف بسیار مخاطره‌آمیز خواهد بود. بدین سبب هواپیماهای نظامی از حضور بر روی سازه هدف بیشترین بهره را برده و هم‌زمان چندین بمب را بر روی هدف از پیش تعیین‌شده رها می‌نمایند که این امر موجب بروز این واقعه می‌گردد که یک سازه زیرزمینی هم‌زمان تحت اثر چند انفجار قرار گیرد. بنابراین احتمال دارد که بمب‌ها در یک‌زمان منفجر شوند، یا با یک‌فاصله چند میلی‌ثانیه نسبت به یکدیگر منفجر شوند و یا موقعیت قرارگیری آن‌ها متفاوت باشد. متغیرهای مورد بررسی شامل نوع بارگذاری انفجاری، و موقعیت قرارگیری انفجار نسبت به سازه مدفون هست که در ادامه هر کدام جداگانه معرفی شده است.

(۱) نوع بارگذاری انفجاری: تک‌مرحله‌ای (سه انفجار با مقدار و فواصل ثابت به صورت هم‌زمان)، چندمرحله‌ای یعنی سه انفجار با مقدار و فواصل ثابت به صورت متوالی و پی‌درپی (با یک فاصله‌ی زمانی مشخص).
(۲) موقعیت قرارگیری انفجار نسبت به سازه مدفون: انفجارهای مورد نظر در دو حالت مطابق تصویر شماتیک شکل (۱) اعمال خواهند شد.



ب- بالای سازه مدفون (موقعیت ۲)



الف- مجاورت سازه مدفون (موقعیت ۱)

شکل ۱ - تصویری شماتیک از موقعیت قرارگیری بمب‌ها

حال با توجه به متغیرهای اشاره‌شده در این مطالعه با استفاده از روش اجزای به کمک نرم‌افزار ABAQUS [۱۴] به تعیین پاسخ سازه‌های زیرزمینی تحت اثر انفجارهای چندمرحله‌ای در نقاط مختلف پرداخته می‌شود. روش تحلیل در این برنامه بر اساس تحلیل در فضای Explicit می‌باشد. برای این منظور پس از معرفی مدل‌های مورد بررسی و تشریح روند کامل روش شبیه‌سازی اجزای محدود مورد استفاده، خروجی‌های حاصل مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند.

ابعاد سازه‌ی زیرزمینی جعبه‌ای شکل مورد بررسی ثابت هست، بطوریکه عرض آن برابر ۹ متر، طول آن برابر ۳۰ متر و ارتفاع آن برابر ۷ متر در و ضخامت دیواره‌های تونل برابر ۷/۰ متر در نظر گرفته شده است (شکل ۲). همچنین عمق مدفون سازه زیرزمینی مورد بررسی، ۱۰ متر در نظر گرفته شده است. فواصل بمب‌ها از یکدیگر ثابت و برابر ۱۰ متر فرض شده است. لازم به توضیح است که ابعاد و اعماق اشاره‌شده بر اساس تونل جعبه‌ای شکل مورد بررسی در مطالعه‌ی مبارک و واقفی [۵] انتخاب شدند. در مطالعه‌ی مبارک و واقفی تونل‌ها با شکل‌های هندسی و اعماق مدفون مختلف در برابر بارگذاری انفجاری سطحی مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به متغیرهای اشاره‌شده مجموعاً ۴ مدل شبیه‌سازی شده که در جدول (۱) به آن‌ها اشاره شده است.

جدول ۱- معرفی حالت‌های مورد بررسی در مطالعه‌ی حاضر

حالت	نوع انفجار	عمق مدفون (m)	موقعیت قرارگیری ماده منفجره
۱	سه انفجار هم‌زمان	۱۰	بالای سازه مدفون
۲	سه انفجار هم‌زمان	۱۰	مجاورت سازه مدفون
۳	سه انفجار مرحله‌ای	۱۰	بالای سازه مدفون
۴	سه انفجار مرحله‌ای	۱۰	مجاورت سازه مدفون

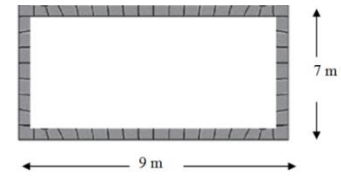
بخش الاستیک و پلاستیک می‌باشد، با استفاده از مدل موهر - کولمب تعریف شده در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS شبیه‌سازی گردید [۱۵]. این معیار گسیختگی در خاک زمانی که تنش برشی مؤثر خاک و تنش نرمال مؤثر خاک به صورت رابطه‌ی (۱) باشند، رخ خواهد داد.

$$(1) |\tau'_\alpha| = c' + \sigma'_\alpha \tan \phi'$$

که در آن τ'_α تنش برشی مؤثر در گسیختگی، c' چسبندگی مؤثر، ϕ' زاویه‌ی اصطکاک مؤثر و σ'_α تنش نرمال مؤثر در گسیختگی هست.

فصلنامه آنالیز سازه - زلزله

دوره ۱۹، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱



شکل ۲- ابعاد تونل مورد بررسی در مطالعه‌ی حاضر

۲-۲- شبیه‌سازی اجزای محدود

نرم‌افزار ABAQUS [۱۴] امکان مدل‌سازی جداگانه‌ی اجزای یک مدل و سپس مونتاژ اجزا برای تشکیل مدل کامل را فراهم آورده است. رفتار مکانیکی بخش خطی خاک به صورت الاستیک و با در نظر گرفتن دو نوع خاک شبیه‌سازی گردید. مشخصات این خاک‌ها در جدول (۲) ارائه گردیده است. همچنین رفتار مکانیکی بخش غیرخطی خاک که شامل دو

جدول ۲- معرفی خصوصیات مصالح [۱۶]

پارامترها مصالح	ρ (kg/m ³)	E (KPa)	μ	C (KPa)	ϕ
لایه خاک	۱۹۰۰	۴۰۰۰۰	۰/۳۰	۲	۴۰°
بتن	۲۴۰۰	۲۰۵۶۰۰	۰/۲۰	---	-----

بتن با حالت پلاستیسیته آسیب‌دیده، خصوصیات بتن در کشش و در فشار به طور جداگانه برای برنامه تعریف می‌شوند و این مدل قادر به در نظر گرفتن اثر کاهش سختی بتن می‌باشد، لذا مناسب‌ترین گزینه برای مدل‌سازی سازه‌های مدفون مورد نظر این مطالعه می‌باشد. مدل "بتن با پلاستیسیته آسیب‌دیده" بر پایه فرضیات آسیب‌دیدگی همسان است و برای حالت‌هایی که بتن تحت بارگذاری‌های دلخواه و از جمله چرخه‌ای قرار دارد، طراحی شده است. این مدل اثر کاهش سختی الاستیک در نتیجه کرنش‌های پلاستیک، هم در کشش و هم در فشار را در نظر می‌گیرد. یکی از مواردی که باید برای المان‌های تعریف شده مشخص گردد، ویژگی‌های مصالح آن‌ها می‌باشد. از آنجا که تهیه داده‌های دقیق مصالح، به‌ویژه در مورد مدل‌هایی که در آن‌ها از مصالحی با رفتار پیچیده استفاده شده سخت است، اعتبار نتایج ABAQUS به‌دقت و در دسترس بودن داده‌های مصالح وابسته است. در این تحقیق از مشخصات مصالح معتبر استفاده شده است. در استفاده از این مدل لازم است تنش - کرنش فشاری و کششی بتن، مقادیر زاویه اتساع، ضریب K و زاویه اصطکاک تعریف شود (جدول ۳).

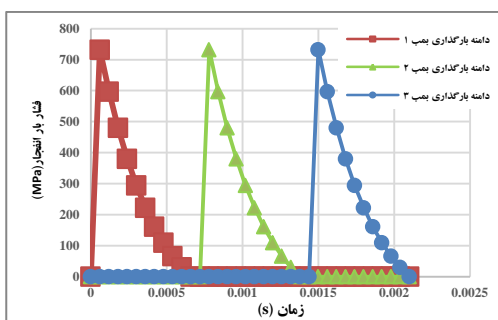
خاک‌های دانه‌ای مانند شن، ماسه (خاک‌های درشت‌دانه بندی شده)، لای با مقادیر کم رس یا بدون رس، چسبندگی مؤثر از خود نشان نمی‌دهند (یا به عبارتی پارامتر C' حدود صفر است)، ولی در عوض زاویه اصطکاک مؤثر بالایی دارند. از مشخصه خاک‌های دانه‌ای می‌توان به امکان تفکیک دانه‌های خاک در زمانی که خاک خشک است، اشاره کرد. خاک چسبنده مانند رس (خاک ریزدانه بندی شده)، یا لای با میزان دانه‌های رسی زیاد، چسبندگی مؤثر زیادی از خود نشان می‌دهد، ولی در عوض زاویه‌ی اصطکاک مؤثر کمی دارد. از مشخصه‌ی خاک‌های چسبنده می‌توان به قابلیت خمیری بالای این خاک‌ها برای حالت مرطوب اشاره کرد. معیار موهر - کولمب معیاری است که بر مبنای آن سطح گسیختگی در خاک‌ها با توجه به پارامترهای مقاومت برشی تعریف می‌گردد.

برای مدل‌سازی بتن با توجه به سه‌بعدی بودن مدل‌های مورد بررسی در این مطالعه، از المان سه‌بعدی هشت گره‌ای C3D8 استفاده شده است [۵]. سه مدل ساختاری در ABAQUS برای آنالیز بتن تحت فشار پیشنهاد شده است که عبارت‌اند از مدل ترک پوششی، مدل ترک خوردگی ترد و مدل بتن با حالت پلاستیسیته آسیب‌دیده. با توجه به اینکه در مدل

جدول ۳- مشخصات مصالح بتنی معرفی شده به نرم افزار [۱۷ و ۱۸]

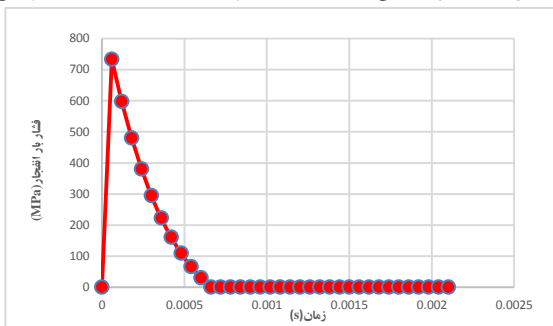
Eccentricity	ضریب k	V ضریب
0.1	0.666	0.001
(N/mm ²) Mass.D	ضریب پواسن R	D.Angle
2.40E-06	0.2	30.5 °

هست. حل معادله فریدلندر به کمک نرم افزار Maple صورت پذیرفت و به این ترتیب تاریخچه زمانی بارگذاری انفجاری وارد بر سازه به دست آمد و در نرم افزار ABAQUS به مدل ها اعمال گردید. نمودارهای تاریخچه زمانی بارهای انفجاری نیز در اشکال (۳) و (۴) نشان داده شده است.



شکل ۳- تاریخچه زمانی بارهای انفجاری برای حالت های سه انفجار چندمرحله ای

شکل ۴- تاریخچه زمانی بارهای انفجاری برای حالت های سه انفجار هم زمان



برای تحلیل مدل های مورد بررسی از تحلیل دینامیکی صریح استفاده می گردید [۵]. به منظور اعمال بارهای انفجاری و شبیه سازی مستقیم آن ها بر روی سازه، مواد منفجره حاصل بمبها به وزن ۱۰۰ هرکدام تن کیلوگرم TNT معادل، در سطح زمین اعمال شدند و فشارهای ناشی از آن ها در قالب حالت های بارگذاری مختلف به سازه تونل، اعمال و پاسخ سازه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. این مقدار TNT می تواند انفجار یک بمب موشک MK82 را شبیه سازی کند. از این رو دارای اهمیت فنی و کاربردی بالایی است. در بیشتر آیین نامه های طراحی به ویژه TM5-1300 برای تعیین پارامترهای امواج انفجار از قانون مقیاس استفاده می شود. این قانون بر پایه تشابه هندسی و قانون بقای مومنتوم بوده و از رابطه تجربی که توسط هاپکینسون و کرانز ارائه گردیده، محاسبه می شود:

$$Z = \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}} \quad (2)$$

که در آن R فاصله ماده منفجره تا محل مورد نظر بر حسب متر و W وزن معادل ماده منفجره بر حسب TNT معادل (کیلوگرم) و Z فاصله مقیاس شده بر حسب $\frac{m}{kg^{\frac{1}{3}}}$ می باشد.

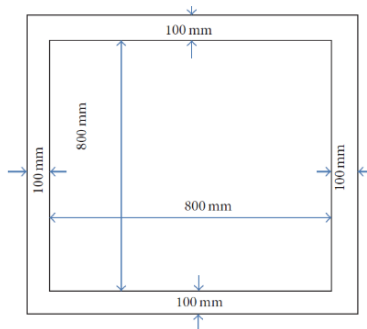
در این مطالعه به منظور پیش بینی اثرات انفجار از یک برنامه به نام ATBlast استفاده گردیده که بر پایه روابط تجربی TM5-1300 طراحی شده است [۱۹]. به منظور تعیین تاریخچه زمانی بارگذاری انفجاری بر روی اعضای مورد نظر سازه ها، ابتدا مقادیر وزن ماده منفجره (w)، زاویه برخورد (α) و فاصله مرکز انفجار (R) تا قسمت های مورد نظر به نرم افزار ATBlast داده شد و به دنبال آن مقادیر فشار حداکثر و زمان تداوم انفجار برای حالت های مختلف از این نرم افزار استخراج گردید و در معادله ی بار انفجار فریدلندر [۲۰] که یکی از دقیق ترین و کامل ترین نمونه ی حل عددی موج انفجار است، قرار گرفت:

$$P(t) = P_{SO} e^{-\frac{t}{t^*}} \left(1 - \frac{t}{t^*}\right) \quad (3)$$

که در آن P_{SO} حداکثر فشار ناشی از انفجار، $P(t)$ مقدار فشار در زمان t و t^* زمان تداوم انفجار (زمانی است که در آن فشار به صفر می رسد)

نظیر شتاب ایجاد شده در تونل را ثبت نمودند. همچنین در مطالعه اشاره شده، علاوه بر مطالعه تجربی، مدل ساخته شده در آزمایش با استفاده از نرم افزار ABAQUS و روش اجزای محدود شبیه سازی گردید. بنابراین تکنیک شبیه سازی بکار رفته در مطالعه حاضر هم نسبت به یک مطالعه آزمایشگاهی و هم نسبت به یک مطالعه عددی صحت سنجی شده است.

تونل مورد بررسی سهیلی و همکاران [۲۰] جعبه ای شکل و از نوع بتن مسلح بود. ارتفاع و عرض دیوارهای تونل برابر ۸۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد و ضخامت سقف، کف و دیوارهای این تونل جعبه ای شکل برابر ۱۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد.



شکل ۶- مقطع عرضی تونل جعبه ای شکل مورد بررسی در مطالعه ی سهیلی و همکاران [۲۰]

مقاومت فشاری میانگین ۲۸ روزه ی ۳ نمونه بتن مورد استفاده در ساخت تونل برابر ۱۹ مگا پاسکال بود و مقاومت کششی آن برابر ۱/۹۰ مگا پاسکال به دست آمد. همچنین مقاومت فشاری میانگین ۴۲ روزه ی ۳ نمونه بتن مورد استفاده در ساخت تونل برابر ۱۹ مگا پاسکال بود و مقاومت کششی آن برابر ۱/۹۰ مگا پاسکال به دست آمد. مدخل الاستیسته بتن ۳۰ گیگا پاسکال و وزن مخصوص آن ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب بود.



شکل ۷- تونل جعبه ای شکل مورد بررسی مدفون در خاک در مطالعه ی سهیلی و همکاران [۲۰]

شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه سازی مدل های مورد بررسی با این هدف می باشد که بتوان شرایط مربوط به رفتار محل ساختگاه را در شبیه سازی عددی برآورده نماید. به همین منظور در طول بی نهایت از مدل با اعمال تکیه گاه مفصلی شرایط نزدیک به واقعیت را برای مدل های مورد بررسی اعمال می نماییم [۱۵]. به عبارتی می توان بیان نمود که با تغییر در ابعاد مدل، می بایست شرایطی را فراهم نمود که با بزرگ شدن بیشتر ابعاد مدل تغییری در جواب های مربوط به خروجی ها حاصل نگردد. یکی از مهم ترین قسمت های نرم افزار ABAQUS تعریف یا همان نسبت دادن مش بر روی هندسه تعریف شده است. در واقع می توان این قسمت را مهم ترین قسمت نرم افزار نامید، قسمتی که مدل هندسی ساده یا پیچیده را برای نرم افزار تبدیل به یک مدل گره و مش می کند. در واقع مدل هندسی را تبدیل به اجزا محدودی کرده که برای نرم افزار به منظور تحلیل در فرآیندهای پیش رو قابل فهم باشند. در تحلیل اجزای محدود این مطالعه ابتدا مدل ها را با المان های درشت (تعداد کم المان ها) تحلیل کرده و یکی از کمیت های خروجی مثلاً مقدار ماکزیمم تنش ایجاد شده در یک نقطه دلخواه از مدل را یادداشت می کنیم. سپس المان ها را ریزتر کرده و مسئله را مجدداً تحلیل می کنیم. فرایند ریزتر کردن المان ها را تا جایی ادامه می دهیم که اختلاف میان نتایج بسیار کم شود. مش بندی یا شبکه بندی که به نمایندگی از مدل مورد مطالعه قرار می گیرد، به اندازه کافی خوب می باشد به طوری که این اطمینان را به وجود می آورد که نیروهای اعمال شده به طور دقیق محاسبه شوند.



شکل ۵- نمایش مش بندی یکی از مدل های مورد مطالعه

۳-۲- اعتبارسنجی

در تحقیق حاضر، اعتبارسنجی روش المان محدود به کار رفته، با استفاده از شبیه سازی عددی یک تونل زیرزمینی که در معرض بارگذاری انفجاری قرار گرفت، صورت پذیرفت که در ادامه توضیحات لازم پیرامون آن ها به طور کامل ارائه خواهد شد. مطالعه ی تجربی اشاره شده توسط سهیلی و همکاران [۲۰] انجام شد. که در ادامه توضیحات لازم پیرامون آن به طور کامل ارائه خواهد شد.

در مطالعه ی اشاره شده یک تونل زیرزمینی در جریان یک آزمایش با مقیاس واقعی تحت دو انفجار سطحی قرار گرفت. شتاب سنجی های افقی و عمودی بر روی دیوارهای قائم تونل نصب شدند و اطلاعاتی

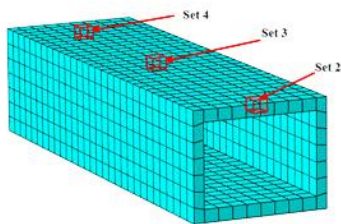
عددی و آزمایشگاهی زیر ۱ درصد می‌باشد. در نتیجه نتایج حاصل از روش مورد استفاده در این پژوهش که با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS انجام می‌گیرد، نسبت به نتایج آزمایشگاهی از تطابق نسبتاً خوبی برخوردار می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی خروجی حاصل از تحلیل اجزاء محدود

مدل‌های مورد بررسی در مطالعه حاضر

پس از شبیه‌سازی و تحلیل سازه‌های مدفون مورد بررسی در حالت‌های مختلف، در این بخش خروجی‌های حاصل که به ترتیب شامل کرنش سازه مدفون و تاریخچه‌ی تنش کل سازه مدفون هست، ارائه می‌گردد و بیشینه مقادیر حاصل استخراج می‌شود و در انتها با استفاده از جدول مقایسه‌ای، هر یک از پارامترهای متغیر مورد بررسی ارزیابی می‌شوند. لازم به توضیح می‌باشد که در خروجی‌های مربوط به تنش‌ها منظور از علائم Set2، Set3 و Set4 شماره المان‌های موجود بر روی سطح فوقانی سازه مدفون می‌باشند که به ترتیب در راستای طول سازه ناحیه‌ی کناری دور از انفجار، ناحیه میانی سازه مدفون و ناحیه کناری نزدیک به انفجار قرار گرفته‌اند. این نقاط در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۹- نام‌گذاری محل خروجی‌های مورد نظر

۳-۲- حالت سه انفجار هم‌زمان، عمق مدفون ۱۰ متر و

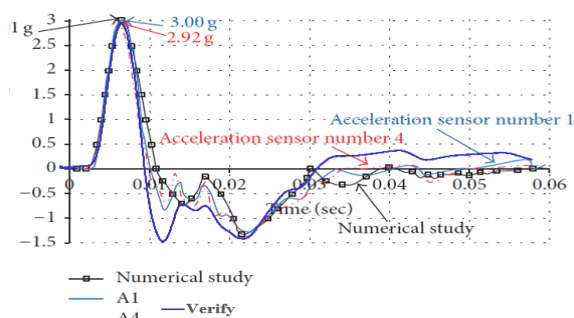
اعمال بار انفجار در بالای سازه مدفون

در این قسمت خروجی‌های مربوط به حالتی که شامل سه انفجار هم‌زمان، عمق مدفون ۱۰ متر و اعمال بار انفجار در بالای سازه مدفون می‌باشد، ارائه شده است. این خروجی‌ها شامل کرنش سازه مدفون و تاریخچه‌ی تنش ایجاد شده در سطح فوقانی سازه مدفون و جابجایی کل سازه مدفون می‌باشند که به ترتیب در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشینه کرنش ایجاد شده برابر ۵-۵/۹۱۳×۱۰ و بیشینه مقادیر تنش ایجاد شده در المان‌های Set2، Set3 و Set4 (نواحی میانی و کناری از سازه مدفون) به ترتیب برابر ۳۸۵۰۰، ۳۸۴۵۰ و ۳۸۰۰۰ پاسکال شده است.

تمامی اجزای بتنی تونل مورد بررسی با استفاده از یک مش بندی فولادی با قطر ۸ میلی‌متر که به فاصله‌ی ۱۰۰ میلی‌متر از یکدیگر قرار گرفتند، مسلح شدند. تنش تسلیم میلگردها برابر ۳۴۰ مگا پاسکال در نظر گرفته شد. همچنین درصد فولاد مورد استفاده برابر ۰/۱۸ درصد بود (شکل‌های ۶ و ۷).

سازه‌ی تونل ۱/۵۰ متر پایین‌تر از زمین دفن شد. وزن مخصوص خاک ۱۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و درصد رطوبت آن ۲۳ درصد اندازه‌گیری شد. هنگامی که تونل در داخل خاک قرار گرفت، دو انتهای آن باز بود، اما دهانه با کیسه‌های شن و ماسه برای حفظ خاک سرپار در خارج از جعبه بسته شد، مواد منفجره ۲ متر در زیر سطح زمین و در فاصله‌ی ۴ متری از خط مرکزی دیوار جلویی قرار گرفتند.

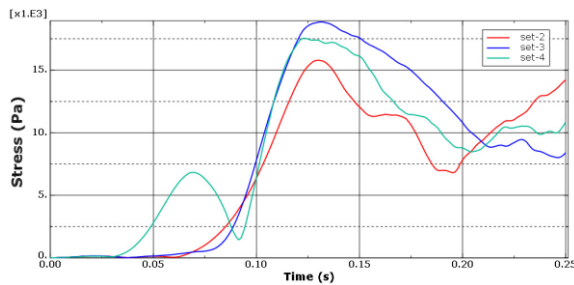
آزمایش در دو مرحله انجام شد؛ در مرحله اول انفجاری معادل ۱/۶۹ کیلوگرم و در مرحله دوم انفجاری معادل ۲/۷۶ کیلوگرم ایجاد شد. حس‌گرهای تعبیه شده بر روی دیواره‌ی تونل توانایی ثبت شتاب ایجاد شده در تونل را در دو جهت داشتند فرکانس رزونانس آن‌ها برابر ۵/۵۰ هرتز بود. دستگاهی که به منشور ثبت اطلاعات و سیگنال‌های حاصل مورد استفاده قرار گرفت دارای چهار کانال بود. کانال‌های مورد استفاده نیز دارای طول ۴۰ متر بود و هیچ تغییر ولتاژی در آن‌ها ایجاد نمی‌شد. لازم به توضیح است که در این آزمایش از دو نوع حس‌گر استفاده شد. حس‌گر نوع دو با نام‌های A2 و A4 می‌باشند که محدوده‌ی شتاب آن‌ها بین ۵۰۰ g و ۵۰۰۰ g هست و حس‌گر نوع یک با نام‌های A1 و A3 می‌باشند که محدوده‌ی شتاب آن‌ها بین ۲۰ g و ۲۰۰۰ g می‌باشند. همان‌طور که اشاره شده دو نوع حس‌گر بکار رفته در فاصله ۴۰ سانتیمتری از پایین سقف و در مرکز وجه بیرونی تونل نصب شدند.



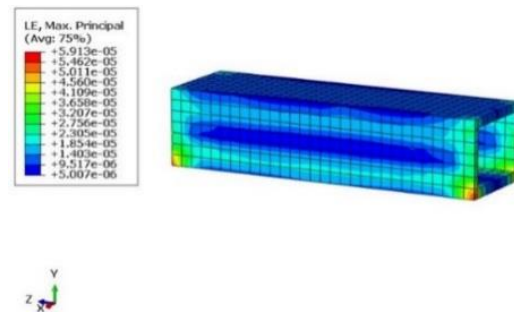
شکل ۸- مقایسه‌ی نمودارهای شتاب - زمان مدل‌های عددی و

آزمایشگاهی تونل مورد بررسی در مطالعه آزمایشگاهی سهیلی و همکاران [۲۰] با مدل شبیه‌سازی شده در مطالعه‌ی حاضر

با توجه به منحنی‌های شتاب- زمان نشان داده شده در شکل ۸ و مقایسه مدل آزمایشگاهی و مدل عددی شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار ABAQUS، مشاهده می‌شود که نقاط \max ، \min نمودار استخراج شده از نرم‌افزار نزدیک به پوش نتایج آزمایشگاهی هست؛ بطوریکه در نقطه‌ی بحرانی حداکثر اختلاف بین مطالعه



شکل ۱۳- تاریخچه‌ی تنش کل سازه مدفون

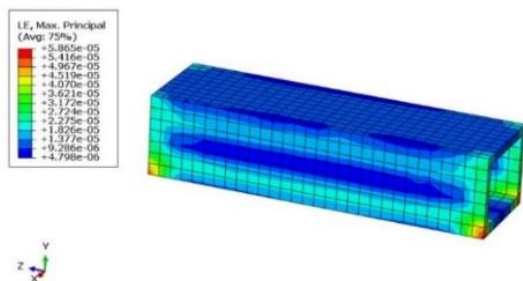


شکل ۱۰- کرنش ایجاد در سازه مدفون شبیه‌سازی شده

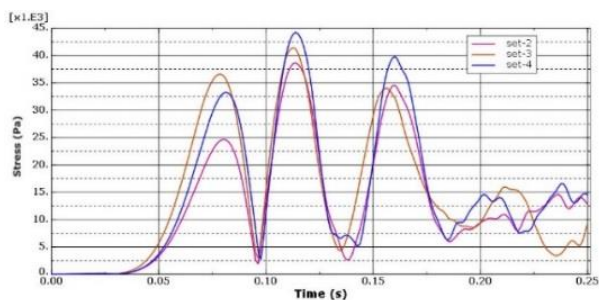
۴-۳- حالت سه انفجار چندمرحله‌ای، عمق مدفون ۱۰

متر و اعمال بار انفجار در بالای سازه مدفون

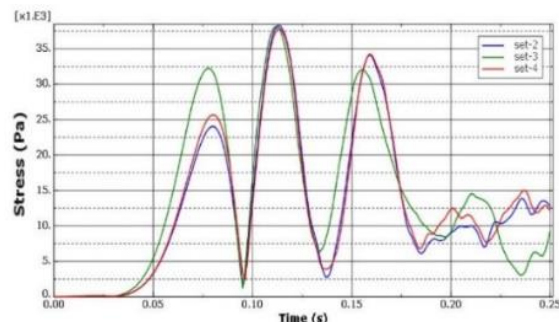
در این قسمت خروجی‌های مربوط به حالتی که شامل سه انفجار هم‌زمان، عمق مدفون ۱۰ متر و اعمال بار انفجار در بالای سازه مدفون می‌باشد، ارائه شده است. این خروجی‌ها شامل کرنش سازه مدفون و تاریخچه‌ی تنش ایجادشده در سطح فوقانی سازه مدفون و جابجایی کل سازه مدفون می‌باشند که به ترتیب در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشینه کرنش ایجادشده برابر $5-8 \times 10^{-5}$ و بیشینه مقادیر تنش ایجادشده در المان‌های Set2، Set3، Set4 (نواحی میانی و کناری از سازه مدفون) به ترتیب برابر ۳۸۵۰۰، ۴۱۲۵۰ و ۴۴۰۰۰ پاسکال شده است.



شکل ۱۴ - تاریخچه‌ی تنش کل سازه مدفون



شکل ۱۵- تاریخچه‌ی تنش کل سازه مدفون

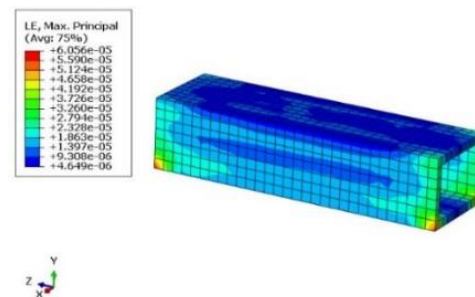


شکل ۱۱ - تاریخچه‌ی تنش کل سازه مدفون

۳-۳- حالت سه انفجار هم‌زمان، عمق مدفون ۱۰ متر و اعمال

بار انفجار در مجاورت سازه مدفون

در این قسمت خروجی‌های مربوط به حالتی که شامل سه انفجار هم‌زمان، عمق مدفون ۱۰ متر و اعمال بار انفجار در مجاورت سازه مدفون می‌باشد، ارائه شده است. این خروجی‌ها شامل کرنش سازه مدفون و تاریخچه‌ی تنش ایجادشده در سطح فوقانی سازه مدفون و جابجایی کل سازه مدفون می‌باشند که به ترتیب در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشینه کرنش ایجادشده برابر $6-5 \times 10^{-5}$ و بیشینه مقادیر تنش ایجادشده در المان‌های Set2، Set3، Set4 (نواحی میانی و کناری از سازه مدفون) به ترتیب برابر ۱۶۰۰۰، ۱۹۰۰۰ و ۱۷۵۰۰ پاسکال شده است.



شکل ۱۲- کرنش ایجاد در سازه مدفون شبیه‌سازی شده

ایجادشده در سازه‌ی زیرزمینی برای سه نقطه مختلف از سطح بالایی تونل در قالب جدول ۴ با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول ۴ - مقادیر بیشینه تنش‌ها در سازه مدفون با توجه به موقعیت قرارگیری انفجار در انفجارهای هم‌زمان و چندمرحله‌ای در عمق ۱۰ متری

نقاط	موقعیت	انفجار هم‌زمان (KPa)	انفجار چندمرحله‌ای (KPa)
Set2	۱	۱۶	۱۶/۲۵
	۲	۳۸/۵	۳۸/۵
Set3	۱	۱۹	۱۸/۵
	۲	۳۸/۴۵	۴۱/۲۵
Set4	۱	۱۷/۵	۱۷/۵
	۲	۳۸	۴۴

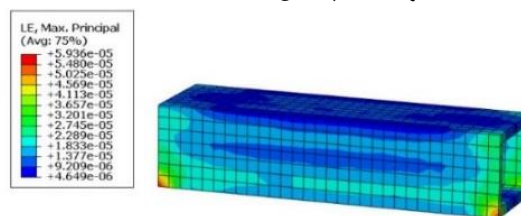
همان‌طور که در جدول مقایسه‌ای مشاهده می‌گردد، بیشینه تنش ایجادشده در نقطه چهارم نشان داده شده که در فاصله‌ی نزدیک‌تری نسبت به پرتاب بمب‌ها و در ناحیه‌ی کناری سازه قرار دارد، در حالت‌های اعمال بارهای ناشی از پرتاب بمب هم‌زمان، به‌مراتب متحمل تنش‌های کمتری نسبت به حالت بارگذاری انفجاری مرحله‌ای شده است. بطوریکه نسبت بیشینه تنش‌های ایجادشده در حالت اعمال بار انفجار چندمرحله‌ای به بیشینه تنش‌های ایجادشده در حالت اعمال بار انفجار هم‌زمان برای حالت پرتاب بمب روی سطح زمین در بالای سازه‌ی زیرزمینی ۱/۱۶ برابر و برای حالت پرتاب بمب روی سطح زمین مجاور سازه‌ی زیرزمینی برابر ۱ شده است.

با بررسی بیشینه تنش‌های ایجادشده در نقطه سوم ملاحظه می‌گردد، حالت‌های اعمال بارهای ناشی از بمب‌گذاری چندمرحله‌ای بر روی سازه‌ی زیرزمینی موردبررسی در موقعیت‌های مختلف در نظر گرفته شده، نسبت به مقادیر متناظر با انفجار هم‌زمان در همه حالات بیشتر شده است. بطوریکه نسبت بیشینه تنش‌های ایجادشده در حالت اعمال بار انفجار چندمرحله‌ای به بیشینه تنش‌های ایجادشده در حالت اعمال بار انفجار هم‌زمان، برای حالت پرتاب بمب روی سطح زمین بالای سازه‌ی زیرزمینی، ۱/۰۷ برابر و برای حالت پرتاب بمب روی سطح زمین مجاور سازه‌ی زیرزمینی، ۰/۹۷ برابر شده است.

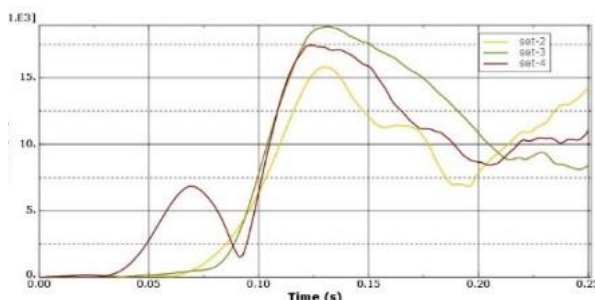
در نهایت بیشینه تنش‌های ایجادشده در نقطه دوم که در ناحیه‌ی گوشه‌ی تونل قرار گرفته است، مقایسه می‌گردد. همان‌طور که در این حالت نیز مشاهده می‌گردد، در حالت اعمال بارهای ناشی از بمب‌گذاری هم‌زمان، سازه‌های زیرزمینی موردبررسی، در تمامی موقعیت و اعماق مدفون در نظر گرفته شده، متحمل تنش‌های بیشتری نسبت به حالت بارگذاری انفجاری چندمرحله‌ای شده است.

۳-۵- حالت سه انفجار چندمرحله‌ای، عمق مدفون ۱۰ متر و اعمال بار انفجار در مجاورت سازه مدفون

در این قسمت خروجی‌های مربوط به حالتی که شامل سه انفجار مرحله‌ای، عمق مدفون ۱۰ متر و اعمال بار انفجار در مجاورت سازه مدفون هست، ارائه شده است. این خروجی‌ها شامل کرنش سازه مدفون و تاریخچه‌ی تنش ایجادشده در سطح فوقانی سازه مدفون می‌باشند که به ترتیب در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشینه کرنش ایجادشده برابر ۵- $10 \times 5/936$ و بیشینه مقادیر ایجادشده در المان‌های Set2، Set3 و Set4 (نواحی میانی و کناری از سازه مدفون) به ترتیب برابر ۱۶۲۵۰، ۱۸۵۰۰ و ۱۷۵۰۰ پاسکال شده است.



شکل ۱۶- کرنش ایجاد در سازه مدفون شبیه‌سازی شده



شکل ۱۷- تاریخچه‌ی تنش کل سازه مدفون

۳-۶- تجزیه و تحلیل نتایج

پس از ارائه‌ی خروجی‌های حاصل از تحلیل سازه‌های زیرزمینی شبیه‌سازی شده، در این بخش به تجزیه و تحلیل نتایج حاصل پرداخته می‌شود. همان‌طور که اشاره شد متغیرهای موردبررسی، شامل نوع بارگذاری انفجاری به لحاظ هم‌زمان یا چندمرحله‌ای بودن، عمق سازه‌ی مدفون از سطح زمین و موقعیت قرارگیری انفجار نسبت به سازه مدفون می‌باشند. به‌منظور تجزیه و تحلیل خروجی‌ها و بررسی تأثیر هر کدام از پارامترهای اشاره شده، بیشینه مقادیر تنش ایجادشده در هر مدل با ارائه جدول (با توجه به آنالیزهای صورت گرفته عددی) ستونی به‌صورت جداگانه با یکدیگر مورد مقایسه قرار خواهند گرفت و بدین ترتیب پاسخ سازه‌های زیرزمینی موردبررسی که تحت اثر انفجارهای سطحی هم‌زمان و چندمرحله‌ای در نقاط مختلف قرار گرفته‌اند، مشخص خواهد شد. برای این منظور بیشینه تنش

حالت شبیه‌سازی پرتاب بمبها به صورت چندمرحله‌ای، بیشینه تنش‌های ایجادشده در سازه‌ی تونل به مراتب بیشتر از مقادیر متناظر با حالت اعمال هم‌زمان بار انفجار شده است. این شرایط بخصوص در حالتی که بار انفجار دقیقاً در بالای سطح خاک سازه زیرزمینی اعمال گردیده، بیشتر مشاهده شد. با توجه به این موضوع و تفاوت نسبتاً قابل توجه بیشینه تنش‌های ایجادشده در حالت‌های اعمال بار هم‌زمان و اعمال بار چندمرحله‌ای، توصیه می‌شود که در تحلیل و طراحی سازه‌های زیرزمینی حساس، بارهای انفجاری سطحی ناشی از پرتاب بمبها به صورت چندمرحله‌ای بر روی سازه مدفون موردنظر شبیه‌سازی شوند؛ زیرا در این حالت تنش‌های بیشتری در دیواره‌های سازه مدفون ایجاد می‌شود و بدین ترتیب قابلیت اطمینان سازه از جنبه داشتن مقاومت لازم و مقابله با بارهای انفجاری، بالاتر خواهد شد.

۵- منابع

- [1] De A, Morgante AN, Zimmie TF. Numerical and Physical Modeling of Geofoam Barriers as Protection Against Effects of Surface Blast on Underground Tunnels. *Geotextiles and Geomembranes*. 2016; 44(1): 1-12.
- [۲] پروینی ثانی، حسین؛ شهرام، محمدی. بررسی رفتار دیوارهای برشی فولادی مرکب با ستونهای پر شده با بتن تحت بار انفجار. فصلنامه آنالیز سازه-زلزله، دوره ۱۷ شماره ۴ زمستان ۱۳۹۹: ۴۳-۳۱.
- [3] Poursil MB, Mohammadi Y, Gholizad A. A Proposed Procedure for Progressive Collapse Analysis of Common Steel Building Structures to Blast Loading. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2017; 21(6): 2186-2194.
- [4] Mussa MH, Mutalib AA, Hamid R, Naidu SR, Radzi NAM, Abedini M. Assessment of Damage to an Underground Box Tunnel by a Surface Explosion. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2017; 66: 64-76.
- [5] Mobaraki B, Vaghefi M. Numerical Study of the Depth and Cross-Sectional Shape of Tunnel under Surface Explosion. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2015; 47: 114-122.
- [6] Feldgun VR, Karinski YS, Yankelevsky DZ. The Effect of an Explosion in a Tunnel on a Neighboring Buried Structure. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2014; 44: 42-55.
- [7] Li X, Huang J, Luo Y, Dong Q, Li Y, Wan Y, Liu T. Numerical Simulation of Blast Vibration and Crack Forming Effect of Rock-Anchored Beam Excavation in Deep

بطوریکه نسبت بیشینه تنش‌های ایجادشده در حالت اعمال بار انفجار چندمرحله‌ای به بیشینه تنش‌های ایجادشده برای حالت پرتاب بمب روی سطح زمین بالای سازه‌ی زیرزمینی ۱ برابر و برای حالت پرتاب بمب روی سطح زمین مجاور سازه‌ی زیرزمینی ۱/۰۱ برابر شده است. با توجه به توضیحات اشاره شده و نحوه تغییرات بیشینه تنش ایجادشده در سازه‌های زیرزمینی موردبررسی و همچنین با توجه به تغییر در الگوی اعمال بارهای انفجاری ناشی از پرتاب بمبها به صورت مرحله‌ای و هم‌زمان می‌توان به این نتیجه دست‌یافت که در حالت شبیه‌سازی پرتاب بمبها به صورت چندمرحله‌ای، بیشینه تنش‌های ایجادشده در سازه‌ی تونل به مراتب بیشتر از مقادیر متناظر با حالت اعمال هم‌زمان بار انفجار شده است. این شرایط بخصوص در حالتی که بار انفجار دقیقاً در بالای سطح خاک سازه زیرزمینی اعمال گردیده، بیشتر مشاهده شده است.

همچنین با توجه به توضیحات اشاره شده و نحوه تغییرات بیشینه تنش ایجادشده در سازه‌های زیرزمینی موردبررسی و همچنین با توجه به تغییر در موقعیت اعمال بارهای انفجاری ناشی از پرتاب بمبها، می‌توان به این نتیجه دست‌یافت، هنگامی که بمبها دقیقاً بر روی سطح فوقانی خاک بالای سازه مدفون هدف پرتاب می‌شوند، مقادیر بیشینه تنش‌های ایجادشده بر روی سطوح تونل نسبت به حالت‌هایی که بمبها در مجاورت سازه مدفون هدف قرار می‌گیرند، به مراتب بیشتر می‌باشد. یکی از دلایل این موضوع می‌تواند شدت بالای موج ورودی انفجار و برخورد آن به نزدیک‌ترین ناحیه سازه مدفون باشد، بطوریکه در مدت‌زمان کوتاه اعمال موج انفجار، خاک فرصتی مناسبی جهت میرا نمودن موج انفجار نداشته و بدین ترتیب نواحی از سازه‌ی مدفون که در نزدیکی بمب‌های پرتاب شده با موقعیت مجاور به سازه مدفون قرار گرفته‌اند، متحمل تنش‌های بیشتری می‌شوند.

از نکات قابل توجه دیگر عدم وقوع گسیختگی به علت عمق زیاد سازه با توجه به شدت انفجار می‌باشد. که البته انجام مطالعات جدیدتر با عمق مدفون و شدت انفجار متفاوت پیشنهاد می‌گردد.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق به تعیین پاسخ سازه‌های زیرزمینی تحت اثر انفجارهای ناشی از پرتاب بمب‌های چندمرحله‌ای و هم‌زمان در نقاط مختلف یک سازه‌ی مدفون با ابعاد ثابت به روش اجزای محدود و با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS پرداخته شد. برای این منظور متغیرهایی نظیر نوع بارگذاری انفجاری و موقعیت قرارگیری انفجار نسبت به سازه مدفون، به صورت جداگانه در سازه‌های مدفون موردبررسی قرار گرفتند.

با توجه به توضیحات اشاره شده و نحوه تغییرات بیشینه تنش ایجادشده در سازه‌های زیرزمینی موردبررسی و همچنین با توجه به تغییر در الگوی اعمال بارهای انفجاری ناشی از پرتاب بمبها به صورت مرحله‌ای و هم‌زمان می‌توان به این نتیجه دست‌یافت که در

and Numerical Study of Blast Acceleration Created by Close-In Buried Explosion on Underground Tunnel Lining. Shock and Vibration. 2016;3:1-9.

Underground Caverns. Shock and Vibration. 2017:1-13.

[۸] بازیار، محمدحسن؛ صالح زاده، حسین؛ کاظمی ورنامخواستی، محمد؛ رابطی مقدم، مسعود. نحوه مدل سازی اثر انفجار بر سازه های زیرزمینی در دستگاه سانتریفیوژ. علوم و فناوری های پدافند نوین، دوره ۵ شماره ۱، ۱۳۹۳: ۳۱-۴۱.

[۹] قلی زاد، امین؛ رجبی، محسن. ارزیابی خسارات وارده بر سازه مدفون در انفجار زیرسطحی و مقایسه آن با انفجار سطحی. دومین کنفرانس ملی مدیریت بحران، تهران، ایران، خرداد ۱۳۹۱.

[۱۰] اسماعیلی، مرتضی؛ فلاح زاده، پوران. بررسی رفتار سازه های زیرزمینی تحت اثر بارهای انفجاری (مطالعه موردی - خط ۷ متروی تهران). هشتمین کنفرانس تونل، تهران، ایران، اردیبهشت ۱۳۸۸.

[۱۱] خلیلی، مجتبی. ارزیابی تأثیر وجود دال بتنی در حد فاصل زمین تا سقف تونل. نشریه علمی مطالعات مهندسی، شماره ۲۴، ۱۳۹۳: ۱-۲۲.

[۱۲] نوری زاده، مؤده. بررسی تأثیرات عمق و شکل سازه مدفون بر رفتار آن ها در اثر انفجارات زیرزمینی. همایش ملی مهندسی عمران کاربردی و دستاوردهای نوین، کرج، ایران، اسفند ۱۳۹۲.

[۱۳] قزوینیان، عبدالهادی؛ رحمتی پور، شهیما. اثر بمب های هوایی روی سازه های زیرزمینی. مجله علمی- پژوهشی مواد پراثری، دوره ۶ شماره ۲، ۱۳۹۰: ۱۶-۳.

[14] ABAQUS Theory Manual, Version 6.11., Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket, 2016.

[15] Moghadam MR, Baziar MH. Seismic Ground Motion Amplification Pattern Induced by a Subway Tunnel: Shaking Table Testing and Numerical Simulation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2016;83: 81-97.

[۱۶] سروش نیا، سهیل؛ نجفیان، هادی؛ ممقانی، محمد حسین؛ مهوروند، مرتضی. کامل مرجع کاربردی آباکوس. انتشارات نگارنده دانش. ۱۳۹۲.

[17] Mahini SS, Ronagh HR, Smith ST. CFRP-Retrofitted RC Exterior Beam-Column Connections under Cyclic Loads. Proceeding of the second international conference on FRP composites in civil engineering; 2004; Adelaide, Australia.

[۱۸] یزدان پرست، معین. بررسی محصورشدگی ستون های بتنی مسلح L شکل با استفاده از الیاف پلیمری. پایان نامه کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیری شهید رجایی، ۱۳۹۲.

[19] Larcher M. Pressure-Time Functions for the Description of Air Blast Waves. JRC Technical notes. 2008.

[20] Soheyli M R, Akhaveissy A H, Mirhosseini SM. Large-Scale Experimental

The Effect of Simultaneous and Multi-Stage Explosions on the Response of Structures Buried in Soil

Saeid Firouzabadi

Department of Civil Engineering, Bushehr Branch, Islamic Azad University, Bushehr, Iran

Hadi Dashti

Department of Civil Engineering, Bushehr Branch, Islamic Azad University, Bushehr, Iran

Alireza Fiouz

School of Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran

Abstract

Underground structures are the best options to build command posts, shelters, weapons depots, important equipment, and defense industries. The manner in which a loading is caused by launch of airplane bombs on buried underground structures is among major issues on which relatively few studies have been carried out, and may not be considered in design of such structures. The simultaneous and Multi-step explosions of missile launches from aircraft and drones also affect the buried structural response. Therefore, in the present study, after verifying the validity of the numerical model with a real model, a comparative study on the effect of simultaneous and multi-stage bombs on response of secure buried structures in soil was carried out using finite element method. This issue has been investigated in four cases with constant burial depth and different explosion location. The results of maximum stresses presented that, in the case of multiple-stage bombing loads, underground structures under study, in all considered situations, experienced more stress than the simultaneous explosive loading mode. The difference of these changes has been observed in some places up to about 15%.

Keywords: Finite Elements, Buried Structures, Multi-Stage Blast, Simultaneous Explosion.



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license:

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)