

فصلنامه علمی-ترویجی پدافند غیرعامل

سال، ششم، شماره ۳، پائیز ۱۳۹۶، (پیاپی ۳۱): صص ۴۴-۳۵

تحلیل اثر بارگذاری انفجاری سطحی کناری در مدل عددی سه بعدی

سازه زیرزمینی بتن مسلح با مدل مقاومتی RHT

صفا پیمان^{۱*}، محمدحسین تقوی پارسا^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۲۴

چکیده

با توجه به روند ناامنی و افزایش حملات تروریستی، امروزه سازه‌های امن و زیرزمینی نقش مهمی در توسعه کشورها داشته و از جمله شریان‌های حیاتی در شهرهای مهم، به‌خصوص در مواقع بحرانی به حساب می‌آیند. آیین‌نامه‌ها و استانداردهای حاکم بر ساخت و یا شیوه‌های طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار بسیار نادر می‌باشند که اغلب به دلایل طبقه‌بندی‌های امنیتی فناوری‌های نظامی، مهندسان غیرنظامی به نتایج آزمایشات صحرایی انفجار، روش‌های طراحی و تکنیک‌های ساخت پیشرفته محافظت از اماکن نظامی و سازه‌های امن و آیین‌نامه‌های حاکم بر آن دسترسی ندارند. از این‌رو، تنها راه برای درک پاسخ سازه، روش‌های حل تحلیلی و در سطح بالاتر استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی عددی می‌باشد. در این مقاله، از روش شبیه‌سازی عددی برای تحلیل و شبیه‌سازی اثر انفجار سطحی بر روی سازه زیرزمینی استفاده شده است. کلیه مراحل شبیه‌سازی با استفاده از هیدروکد توانمند AUTODYN انجام شده است. به‌منظور ارزیابی پاسخ سازه، تحلیل پارامتریک شامل اثر وزن خرج انفجاری بر روی سازه مدفون انجام شده و با توجه به موج فشاری پیش‌رونده در خاک و معیار حداکثر سرعت ذرات حاصل از انفجار، خرابی سازه بررسی می‌گردد. نتایج عددی نیز با روابط ارائه شده در منابع معتبر علمی و استاندارد ارتش آمریکا مقایسه شده است.

کلیدواژه‌ها: سازه مدفون، پارامترهای شوک زمینی، انفجار سطحی، شبیه‌سازی عددی، اتوداین

۱- مربی و عضو هیئت علمی دانشگاه جامع امام حسین^(ع)، (speyman@ihu.ac.ir) - نویسنده مسئول

۲- کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه دانشگاه جامع امام حسین^(ع)

۱- مقدمه

ولی در مدل جدا نشده هر یک از مراحل سه‌گانه به‌طور مجزا و یا دوبه‌دو در یک نرم‌افزار انجام می‌گیرند. از اکثر نرم‌افزارهای المان محدود موجود، می‌توان برای حالت جداشده استفاده نمود ولی نرم‌افزارهایی که قابلیت مدل‌سازی حالت جداشده را دارا باشند بسیار کم بوده و می‌توان گفت به دو هیدروکد^۱ توانمند AUTODYN و LS-DYNA محدود می‌شوند. وانتومی و بورگرس [۲] در سال ۲۰۰۶ برای مدل‌سازی موج انفجار ایجادشده در خاک از نرم‌افزار اتوداین^۲ استفاده کردند. به‌علاوه، آمبروزینی و آنسیب [۳] در سال ۲۰۰۷ از یک مدل سه‌بعدی در نرم‌افزار اتوداین برای محاسبه پارامترهای فشار نهایی استفاده کردند و نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی را با فشار نهایی بیشینه به‌دست‌آمده از رابطه هنریچ مقایسه نمودند.

در این مقاله، اثرات انفجار سطحی کناری واقع بر یک سازه مدفون، تحلیل و با مطالعه پارامتری شامل اثر وزن خرج انفجاری، موج انفجاری پیش‌رونده در خاک، سرعت ذرات و هم‌چنین تغییر مکان دیواره سازه و ایمنی پوشش داخلی تونل بر مبنای معیارهای تخریب بررسی می‌گردد. به‌منظور صحت‌سنجی، نتایج عددی با روابط ارائه‌شده در آیین‌نامه (TM5-855-1) ارتش آمریکا و نیز روابط ارائه‌شده توسط آقایان اسمیت [۴] و بانگاش [۵] مقایسه شده‌اند.

۲- مدل‌سازی عددی

AUTODYN یک برنامه حل صریح برای مدل‌سازی دینامیکی غیرخطی جامدات، مایعات و گازها با قابلیت در نظر گرفتن اندرکنش میان محیط‌های مختلف موجود در مدل است. از نقاط قوت این برنامه، داشتن حالت گرافیکی می‌باشد که کاربر به‌راحتی می‌تواند مراحل مدل‌سازی و روند حل مسئله را مشاهده نماید. هم‌چنین این برنامه، دارای مصالح کتابخانه‌ای می‌باشد که بسیاری از مواد و معادلات رفتاری آن‌ها از جمله معادله حالت، مدل مقاومتی و مدل شکست را شامل می‌شود.

این نرم‌افزار روش‌های مختلفی برای حل مسائل دارد که دو نمونه مهم برای حل محیط‌های پیوسته حالت لاگرانژی^۳ و اویلرین^۴ می‌باشد. البته روش‌های پیشرفته‌تری مثل ALE^۵ و SPH^۶ نیز وجود دارد که با توجه به نوع مسئله می‌تواند به‌کار گرفته شود [۶].

در این بخش، مدل عددی سازه زیرزمینی با استفاده از هیدروکد AUTODYN به منظور ارزیابی پاسخ سازه در خاک تحت اثر موج انفجار ناشی از یک انفجار سطحی که نسبت به سازه دارای فاصله افقی و عمودی است، معرفی می‌شود.

با توجه به افزایش روند ناامنی در جهان به‌ویژه منطقه خاورمیانه و نیز تهدیدات کشور جمهوری اسلامی ایران توسط دشمنان متخاصم، پرداختن به مباحث مربوط به بارگذاری انفجاری سازه‌ها از یک سو و با توجه به رویکرد پدافند غیرعامل در زمینه انتقال سازه‌های حساس و مهم به زیر سطح زمین از سویی دیگر، تحلیل و طراحی سازه‌های مدفون از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. از این‌رو، امروزه بررسی سازه‌های مدفون تحت بارگذاری انفجاری یکی از موضوعات مورد بررسی در بین مهندسی سازه، مکانیک، خاک و معدن است. سازه‌های مدفون از زیرمجموعه‌های سازه‌های امن بوده که انواع آن نظیر پناهگاه‌ها و تونل‌ها و ... حین حملات نظامی و شرایط بحرانی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشند. هدف اصلی یک فضای امن، افزایش امکان حفظ جان افراد و امکانات و تجهیزات مهم در برابر بحران است.

اخیراً اثرات انواع انفجار محتمل بر این نوع سازه‌ها با روش‌های عددی و تجربی و براساس نتایج آزمایشگاهی، توسعه و گسترش یافته است. ابعاد و اندازه حفره ایجادشده در خاک ناشی از انفجار تابع عوامل خاصی از جمله نوع و مشخصات خاک، شکل انفجار، جرم ماده منفجره، مشخصات دینامیکی خاک و هوا و عمق انفجار است. برای طراحی سازه با هدف مقاومت در برابر آثار جنگ‌افزارهای متعارف، دستورالعمل‌های فنی بسیاری تهیه شده است. ارتش ایالات‌متحده آمریکا از سال ۱۸۷۰ میلادی، مطالعات خود را بر روی پارامترهای شوک زمینی آغاز نمود که نتیجه این مطالعات منجر به آئین‌نامه دپارتمان مهندسی ارتش آمریکا (TM5-855-1) گردید [۱] که یکی از پرکاربردترین راهنماهای طراحی سازه در برابر آثار ناشی از انفجار است.

از طرف دیگر، امروزه شبیه‌سازی‌های عددی جایگزین آزمایش‌ها در این حوزه شده است و از داده‌های آزمایشگاهی برای اعتبارسنجی برنامه‌های رایانه‌ای مختلف استفاده می‌شود. اغلب برنامه‌های عددی بر مبنای دستورالعمل‌های طراحی موجود نوشته شده‌اند. مزیت شبیه‌سازی‌های عددی اعمال بارگذاری دقیق بر سازه و نیز امکان در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه مورد نظر می‌باشد. یک شبیه‌سازی عددی از پدیده انفجار که نتایج نزدیک به واقعیت از این پدیده ارائه دهد شامل سه مرحله زیر می‌باشد:

- آغاز فرآیند انفجار و شکل‌گیری چاله انفجاری
- انتشار موج انفجار در محیط
- محاسبه پاسخ‌های سازه

به‌طور کلی، فرآیند انفجار به دو صورت جداشده و جدا نشده مدل‌سازی می‌شود. در مدل جداشده سه مرحله انفجار، انتشار و اثر آن بر سازه به‌طور کامل در یک نرم‌افزار و در یک مرحله انجام می‌گیرد

1- hydrocode

2- AUTODYN

3- Lagrangian

4- Eulerian

5- Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE)

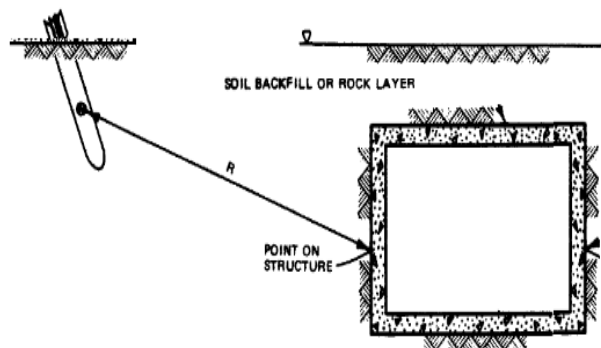
6- Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

۱-۲-۲- مدل هندسی

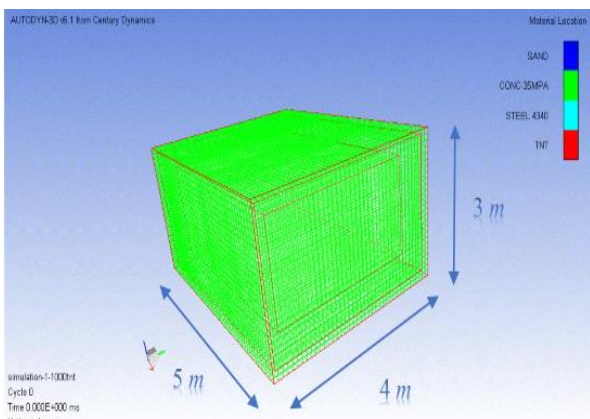
در این مدل هندسی، المان‌های مورد بررسی شامل خرج انفجاری، خاک و سازه زیرزمینی است. نمای شماتیکی از مسئله در شکل (۱) نشان داده شده است. مسئله به صورت سه بعدی و با ابعاد اصلی (m, ms و Kg) مدل سازی شده است. سازه مورد نظر دارای سطح مقطع مستطیلی با دهانه ۴ m و ارتفاع ۳ m با طول ۵ m است. تحت شرایط بارگذاری به صورت کناری فاصله خرج تا سازه برابر با مجذور مجموع مربعات فواصل افقی و عمودی خرج تا سازه مورد نظر بیان کننده فاصله خرج تا سازه است که در شکل (۱) با R نشان داده شده است. فاصله خرج تا سازه مورد بررسی در این مسئله، برابر ۵ m در نظر گرفته شده است. خرج انفجاری در فاصله افقی ۴ m و عمودی ۳ m نسبت به سازه در سطح زمین قرار گرفته است. ضخامت کلیه دیوارها در تمامی وجوه برابر ۵۰ cm بوده و همچنین مسلح کننده‌هایی به صورت صفحاتی با ضخامت ۷۵ mm در داخل دیوار قرار داده شده است. طوری که نسبت به سطوح داخلی و خارجی دیوار دارای فاصله ۱۰ cm باشند.

در هیدروکد اتوداین المان بندی ریزساختارها به صورت چهاروجهی و با قابلیت تراکم در نواحی همراه با تمرکز تنش انجام می‌گیرد. با توجه به وزن خرج و محدوده چاله انفجاری با انجام مطالعات عددی متعدد برای دستیابی به المان بندی مناسب و جواب‌هایی با دقت بالاتر، محدوده المان بندی ۲۵ cm تا ۶۵ cm انتخاب گردیده است. شکل (۲) نمایی از مدل هندسی سازه و المان بندی انجام شده در اتوداین را نشان می‌دهد.

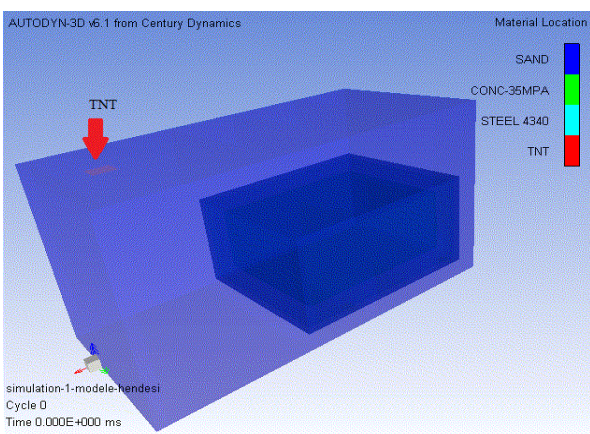
مدل هندسی به صورت نامتقارن و با ابعاد کلی ۱۰ m × ۶ m × ۴ m در نظر گرفته شده است. شکل (۳) نیز نمایی از مدل کلی در هیدروکد اتوداین با مشخص نمودن مکان قرارگیری سازه و خرج انفجاری را نشان داده است.



شکل (۱): نمای شماتیکی از مسئله



شکل (۲): مدل هندسی سازه در هیدروکد AUTODYN



شکل (۳): مدل کلی در هیدروکد AUTODYN و مکان قرارگیری سازه و خرج انفجاری

۲-۲- معادلات رفتاری مواد

در این بخش، مدل‌های رفتاری مواد برای هر یک از قسمت‌ها معرفی می‌شود. مواد در این مسئله شامل خرج انفجاری، خاک و سازه می‌باشد که به تفکیک همراه مشخصات و مدل‌های رفتاری در نرم‌افزار عددی معرفی می‌گردند.

۱-۲-۲-۱- مدل سازی خاک

خاک مورد مطالعه از جنس ماسه متراکم با مشخصات آورده شده در جدول (۱) می‌باشد. برای مدل کردن خاک، معادله حالت تراکم^۱ مطابق رابطه (۱) استفاده شده است. در این معادله حالت که برای مواد متخلخلی نظیر شن و ماسه کاربرد دارد و شکل خاصی از معادله حالت می-گرونیسن^۲ می‌باشد که جزئیات آن در مرجع آورده شده است [۷].

$$\frac{\partial P}{\partial \rho} = C^2(\rho) \quad (1)$$

1- Compaction
2- Mie-Gruneisen

هم چنین برای حذف المان‌های بسیار اعوجاج‌یافته از روش فرسایش ناگهانی نرم‌افزار استفاده شده است.

جدول (۲): مشخصات پارامترهای معادله حالت خاک در اتوداین

چگالی (kg/m ³)	فشار (MPa)									
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀
۱/۶۷	۰	۴/۶	۱۵	۲۹/۱۵	۵۹/۱۷	۹۸/۱	۱۷۹/۴۴	۲۸۹/۴۴	۴۵۰/۲	۶۵۰/۶۶
چگالی (kg/m ³)	سرعت صوت (m/ms)									
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀
۱/۶۷	۰/۲۶	۰/۸۵	۱/۷۲	۱/۸۷	۲/۲۶	۲/۹۶	۳/۱۱	۴/۶	۴/۶۳	۴/۶۳

جدول (۲): مشخصات پارامترهای مدل مقاومتی خاک در اتوداین

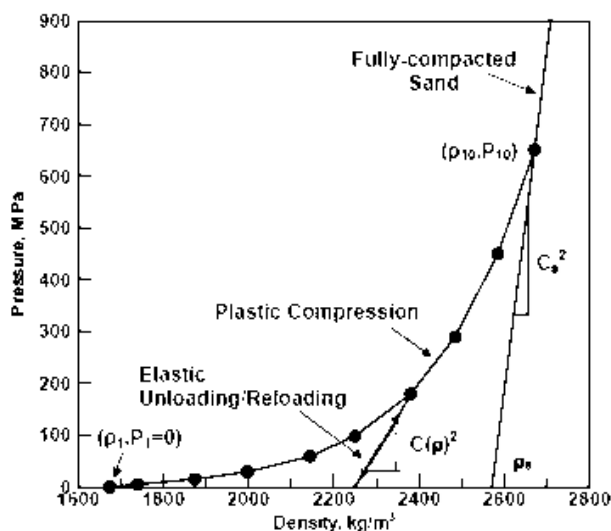
فشار (MPa)	تنش تسلیم (MPa)									
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀
۰	Q _{y1}	Q _{y2}	Q _{y3}	Q _{y4}	Q _{y5}	Q _{y6}	Q _{y7}	Q _{y8}	Q _{y9}	Q _{y10}
چگالی (kg/m ³)	مدول برشی (m/ms)									
	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	G ₆	G ₇	G ₈	G ₉	G ₁₀
۱/۶۷	۰	۴/۲۳	۴۴/۶۹	۱۲۴/۰۳	۲۷۶	۲۲۶	۰	۰	۰	۰
۱/۶۷	۷/۶۹	۱/۷۴	۱/۲	۲/۱۴	۲/۳	۲/۵۷	۲/۶	۲/۶۳	۲/۶۴	۲/۸
۱/۶۷	۷/۶۹	۸۶/۹/۴	۴۰۳/۱/۷	۴۹۰/۶/۹	۷۷/۶/۹	۱۴۸۰/۱	۱۶۵/۷/۱	۳۶۷/۱/۸	۳۷۳/۴/۷	۳۷۳/۴/۷

که در آن، (C) سرعت صوت در ماده متخلخل و (ρ) چگالی آن است.

معادله حالت تراکم کنترل بیشتری روی بارگذاری و باربرداری مواد متخلخل دارد و در آن سرعت صوت برحسب دانسیته تعریف می‌گردد. به کمک معادله حالت فوق در اتوداین وابستگی سرعت صوت به چگالی ماسه به کمک ده نقطه (ρ, C) که ایجاد رابطه چندتکه‌ای می‌کند، تعریف می‌شود. هم چنین شکل (۴)، معادله حالت تراکم برای ماسه، براساس رابطه تکه‌ای چندخطی بین فشار و چگالی را نشان می‌دهد. براساس این نمودار در بارگذاری و باربرداری الاستیک، رابطه فشار و چگالی به صورت خطی نیست. این موضوع نشان‌دهنده آن است که سرعت صوت در ماسه تابعی از چگالی آن می‌باشد. پارامترهای معادله حالت خاک در جدول (۲) ذکر شده است.

جدول (۱): مشخصات خاک

مدول الاستیسیته E _r (N/m ²)	دانسیته ρ (kg/m ³)	سرعت لرزه‌ای c (m/s)	ضریب پواسون (ν_r)	ضریب تضعیف (n)	نوع
۶/۲۵ × ۱۰ ^۸	۲۶۴۱	۴۷۸/۶۸	۰/۲۵	۲/۵	Dense Sand



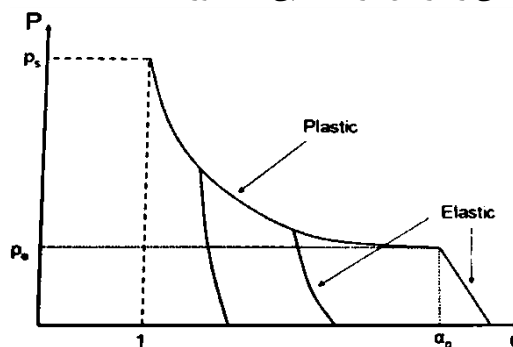
شکل (۴): رابطه بین چگالی و فشار در معادله حالت تراکم برای ماسه [۷]

به‌عنوان مدل مقاومتی، از مدل (MO-Granular) استفاده شده است. این مدل بسط مدل دراکر-پراگر^۱ می‌باشد به نحوی که اثرات مرتبط با مواد دانه‌ای را در نظر می‌گیرد. در این مدل اثر کار سختی، دانسیته سختی و مدول برشی متغیر در نظر گرفته می‌شوند [۶]. مشخصات مدل مقاومتی مورد استفاده در جدول (۳) آمده است.

1- Drucker-Prager

۲-۲-۲- مدل سازی پوشش بتنی

پوشش بتنی سازه زیرزمینی از نوع Conc35 با معادله حالت پی-آلفا^۱ و مدل مقاومتی و شکست RHTConcrete در اتوداین تعریف شده است. معادله حالت پی-آلفا دسته دیگری از معادلات حالت تراکم می باشد. هرچند معادلات حالت تراکم و تکه ای خطی برای مواد متخلخل نظیر شن و ماسه در فشارهای کم نتایج خوبی دارند ولی برای بررسی مدل ها در تنش های بالا از معادله حالت پی-آلفا که برحسب فشار و دمای مشخص استفاده می شود. در شکل (۵) منحنی رفتار بتن در حالت پی-آلفا آورده شده است [۶].



شکل (۵): منحنی رفتار بتن در حالت p-alpha [۶]

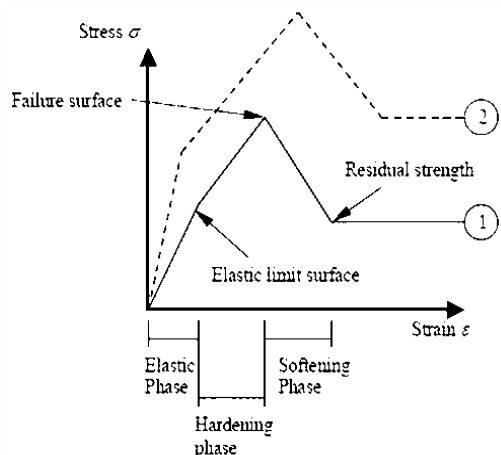
با توجه به رابطه (۲) در نرم افزار اتوداین، رابطه بین تنش با کرنش، نرخ کرنش، انرژی داخلی و خسارت را برای بتن با استفاده از معیار RHT ارائه شده توسط رمپلینگ [۸] مشتمل بر سختی فشاری، سختی کرنشی و نرخ آن و سه ثابت وابسته (محصول تنش اصلی) و شاخص آسیب بیان می گردد. این ثوابت وابسته نیز به صورت سطح شکست، حد الاستیک و مقاومت باقی مانده توصیف می شوند.

$$\sigma_{ij} = f(\epsilon_{ij}, \dot{\epsilon}_{ij}, E, D) \quad (2)$$

شکل (۶) نمایشی از این مدل و نمودارهای مختلف مربوط به رفتار غیرخطی بتن شامل سطوح نرم شدگی و ترک، سطوح تغییر شکل الاستیک و نیز سطح شکست ارائه می دهد. مطابق شکل، تنش تسلیم در برابر فشار ارائه شده است که در آن، فشار به صورت میانگین حاصل از سه تنش اصلی تعریف می گردد. هنگامی که عضو در معرض یک فشار خطی (خط ۱ و ۲) باشد، ابتدا کرنش همراه با تنش افزایش می یابد. این وضعیت بیان کننده رابطه الاستیک بین تنش و کرنش بوده و شیب خطوط متناظر با مدول الاستیسیته ادامه پیدا می کند تا به مرز حد الاستیک برسد. مرحله بعدی فاز سخت شدگی نامیده می شود. در این مرحله شیب خطوط به کمک پارامتر مدول برشی الاستیک و پلاستیک تعیین می گردد و رفتار غیرخطی به صورت یک رفتار خطی تقریب زده می شود. سطح شکست در پایان همین مرحله قرار دارد. مرحله بعدی آغاز نرم شدگی است. در مرحله نرم شدگی مقاومت و فشار، روند کاهشی خواهند داشت تا به سطح مقاومت

1- p-alpha equation

باقی مانده برسند [۸].



شکل (۶): نمایش مدل مقاومتی RHT-Concrete [۸]

در جدول های (۴-۵) مشخصات پوشش بتنی مدل آورده شده است.

جدول (۳): پارامترهای معادله حالت پی-آلفا برای پوشش بتنی

چگالی تخلخل (kg/m ³)	چگالی مرجع (kg/m ³)	سرعت صوت (m/ms)	فشار اولیه (Mpa)	فشار تراکم (Mpa)	توان تراکم	پارامتر A1 (Mpa)	پارامتر A2 (Mpa)	پارامتر A3 (Mpa)	پارامتر B0, B1 (Mpa)
۲۳۱۴	۲۷۵۰۰	۲/۹۲	۲۳/۳	۶۰۰۰	۳	۳۵۲۷۰	۳۹۵۸۰	۹۰۴۰	۱/۲۲

جدول (۴): پارامترهای مدل مقاومتی RHT-Concrete برای پوشش بتنی

مدول برشی (Mpa)	مقاومت فشاری (Mpa)	f _i /f _c	f _s /f _c	پارامتر A	پارامتر N	پارامتر Q	شکل پذیری
۱۶۷۰۰	۳۵	۰/۸	۰/۸۸	۱/۶	۰/۶۱	۰/۶۸	۰/۸
کرنش نهایی	F ₀ /f _c	F ₀ /f _c	پارامتر B	پارامتر M	توان نرخ کرنش فشاری	توان نرخ کرنش کششی	C ₀ /C _p
۰/۰۰۱	۰/۷	۰/۵۳	۱/۶	۰/۶۱	۰/۰۲۲	۰/۰۲۶	۲

جدول (۵): پارامترهای معادله حالت و مقاومت مسلح‌کننده

نوع	نرخ کرنش مرجع	نرخ نرم شدگی	ثابت نرخ کرنش	نرخ سخت شدگی	ثابت سختی	تنش تسلیم (Mpa)	مدول برشی (Mpa)	چگالی مرجع (kg/m ³)	مدول بالک (Mpa)
STEEL4340	۱	۱/۰۳	۰/۰۱۴	۰/۲۶	۵۱۰	۷۹۲	۸۱۸۰۰	۷۸۳۰۰	۱۵۹۰۰۰

۲-۲-۴- مدل سازی خرج انفجاری

برای مدل سازی ماده منفجره از خرج انفجاری از جنس TNT با معادله حالت JWL استفاده شده است. معادله حالت جونز ویکنز-لی (JWL) به صورت گسترده برای محاسبه فشار ناشی از یک انفجار کامل در هیدروکدها و مدل سازی‌ها به کار می‌رود [۶]. این معادله حالت به صورت رابطه (۳) بیان می‌شود. پارامترهای مدل سازی ماده منفجره در جدول (۷) آمده است.

$$P = A \left(1 - \frac{\omega \rho}{R_1 \rho_0} \right) \times e^{\left(-\frac{R_1 \rho_0}{\rho} \right)} + B \left(1 - \frac{\omega \rho}{R_2 \rho_0} \right) \times e^{\left(-\frac{R_2 \rho_0}{\rho} \right)} + \frac{\omega \rho^2}{\rho_0} E_{m_0} \quad (3)$$

در رابطه فوق، w, R_1, R_2, A, B ثابت مصالح و ρ_0 چگالی اولیه ماده منفجره و ρ چگالی ناشی از محصولات انفجار می‌باشد و نسبت آن‌ها برابر یک در نظر گرفته می‌شود. E_{m_0} نیز انرژی اولیه ماده منفجره است.

جدول (۶): پارامترهای مدل سازی ماده منفجره

نوع	چگالی مرجع (kg/m ³)	انرژی واحد حجم (MJ/m ³)	فشار انفجار (Mpa)	سرعت انفجار (m/ms)	پارامتر w	پارامتر R ₂	پارامتر R ₁	پارامتر B (Mpa)	پارامتر A (Mpa)
TNT	۱۶۳۰۰	۱/۰۳	۲۱۰۰۰	۶/۹۳	۰/۳۵	۰/۹	۴/۱۵	۳۷۴۷/۱	۳۷۳۷۰

۳- روش‌های تحلیل

در این مقاله، علاوه بر روش عددی از گراف‌های تجربی موجود در آئین‌نامه (TM5-855-1) و نیز روش تحلیلی با استفاده از روابط موجود در منابع معتبر علمی که مورد تایید و استفاده ارتش امریکا

همان‌طور که اشاره شد در این مقاله از مدل مقاومتی فوق برای مدل سازی پوشش بتنی استفاده شده است که در ادامه به برخی مزایا و معایب آن اشاره می‌شود. مزایای آن عبارتند از:

- این مدل بارهای وارد بر بتن را مدل می‌کند و برای بررسی پدیده‌هایی از جمله فشار و کرنش سختی، نرخ کرنش سختی، اثرات تخریب، ترک‌های نرم‌شدگی، فشردگی حجمی و ثابت سوم وابستگی به کانال‌های انرژی کششی و فشاری نیز کاربرد دارد.
 - در این مدل سطح مقاومت شکست غیروابسته‌ای به منظور مدل سازی مناسب رفتار نرم‌شدگی بتن ارائه شده است.
 - مقاومت کششی و فشاری بتن در این مدل وابسته به نرخ آن‌ها در نظر گرفته می‌شود.
- معایب آن عبارتند از:

- این مدل اثر نرخ کرنش را به صورت خطی در نظر می‌گیرد، در حالی که مطالعات صورت گرفته حاکی از آن می‌باشد که وابستگی مقاومت کششی و فشاری به نرخ کرنش به صورت دوخطی است.
- خطی در نظر گرفتن رابطه بین لگاریتم ضریب افزایش دینامیکی و لگاریتم نرخ کرنش توسط این مدل سبب می‌شود که در نرخ کرنش‌های بالاتر از $\frac{1}{s}$ ضریب افزایش دینامیکی کم‌تر از مقدار واقعی در نظر گرفته شود.

- در مورد رفتار پس از شکست تک‌محوره و دومحوره بتن در این مدل، ایراداتی توسط لو و لو [۹] ارائه شده که برای اصلاح آن کاهش سطح پس از شکست پیشنهاد گردیده است. در این شبیه‌سازی این اصلاحات اعمال شده است.
- کرنش نهایی به‌طور پیش‌فرض برای بتن، ۰/۰۱ در نظر گرفته می‌شود در حالی که مقدار آن در برابر بار انفجار، ۰/۰۰۰۵ تا ۰/۰۰۲ است. در این مقاله، مقدار کرنش نهایی ۰/۰۰۱ پیشنهاد شده است [۶].

۲-۲-۳- مدل سازی مسلح‌کننده‌ها

برای مسلح‌کننده‌ها از فولاد نوع Steel4340 با معادله حالت خطی و مدل مقاومتی جانسون-کوک با در نظر گرفتن شکست ناشی از کرنش پلاستیک استفاده شده است [۶]. پارامترهای مدل سازی مسلح‌کننده در جدول (۶) آمده است.

جدول (۷): مشخصات خاک در آئین‌نامه (TM5-855-1) برای محاسبه مقادیر حداکثر فشار و سرعت ذرات [۱]

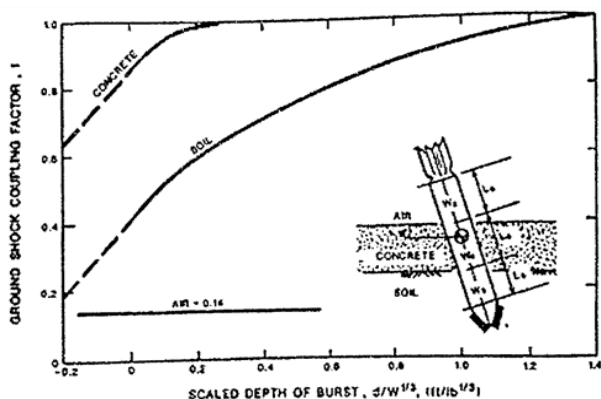
ضریب تضعیف	متوسط سرعت لرزه‌ای (m/s)	متوسط چگالی (Kg/m ³)	نوع خاک
۱/۵	<۱۵۲۴	۲۰۲۸-۱۹۲۲	۱ خاک رس به شدت اشباع/ خاک رس نرم
۲/۵-۲/۲۵	۱۵۲۴	۱۹۸۴-۱۷۶۰	- خاک رس شنی اشباع‌شده (درجه اشباع > ۱)
۲/۵	۵۴۸/۶۴	۱۷۶۴	۲ خاک رس شنی بسیار مرطوب (< ۴٪ درجه اشباع < ۱)
۲/۵	۴۸۷/۶۸	۲۰۰۲-۱۹۲۲	۳ شن و ماسه متراکم/ شن و ماسه رسی مرطوب (درجه اشباع < ۴)
۲/۷۵	۳۰۴/۸	۱۹۸۶	۴ خاک شنی/ شن و ماسه خشک با تراکم متوسط
۲/۲۵-۳	۱۸۲/۸۸	۱۶۰۱-۱۴۸۹	۵ شن و ماسه خشک با تراکم پایین

در روش تحلیلی برای تعیین مقادیر حداکثر سرعت ذرات و فشار حاصل از انفجار از روابط (۴-۵) که توسط اسمیت و بانگاش ارائه شده‌اند [۴-۵] استفاده می‌گردد.

$$P_0 = \rho \times C \times u \quad (4)$$

$$u = 48.8 f_c \left(\frac{2.52R}{W^{1/3}} \right)^{-n} \quad (5)$$

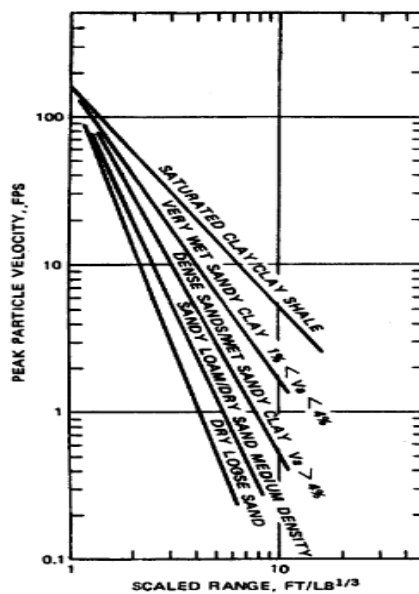
در رابطه‌های فوق، (f_c) ضریب جفت‌شدگی زمین و ماده منفجره (میزان پیوستگی ماده منفجره با زمین) است که مقدار آن با استفاده از شکل (۹) به دست می‌آید. W وزن ماده منفجره برحسب کیلوگرم، R فاصله از محل انفجار برحسب متر، C سرعت انتشار موج انفجار، u سرعت ذره‌ای بیشینه، P_0 فشار در خاک برحسب کیلوگرم بر مترمربع در فاصله R ، ρ چگالی خاک و n ضریب تضعیف خاک است که به نوع خاک وابسته است و مقدار آن با استفاده از جدول (۹) به دست می‌آید.



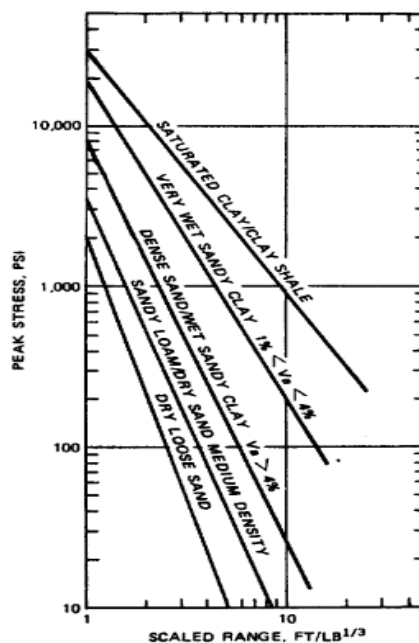
شکل (۹): نمودار تعیین ضریب جفت‌شدگی زمین با عمق نفوذ مقیاس شده در آئین‌نامه (TM5-855-1) [۱]

نیز قرار گرفته است، استفاده می‌شود.

در این راستا، طبق آئین‌نامه ارتش آمریکا، با توجه به نوع مشخصات خاک مورد مطالعه، ارائه‌شده در جدول (۸)، می‌توان مقادیر حداکثر سرعت ذرات و فشار انفجار را برحسب فاصله مقیاس شده $Z (R/W^{1/3})$ با توجه به شکل‌های (۷-۸) تعیین نمود [۱].



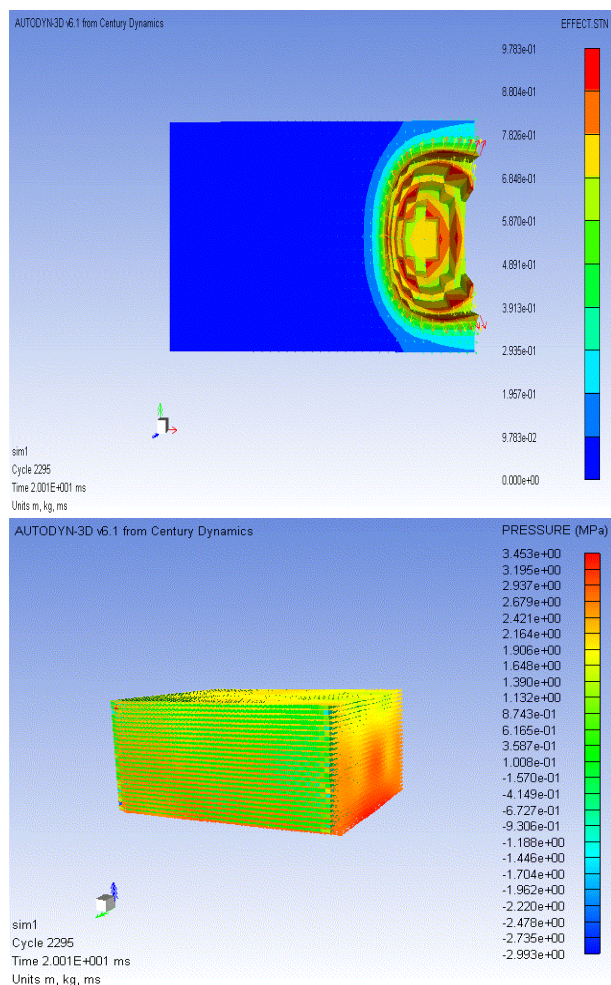
شکل (۷): نمودار تعیین حداکثر سرعت ذرات در آئین‌نامه (TM5-855-1) [۱]



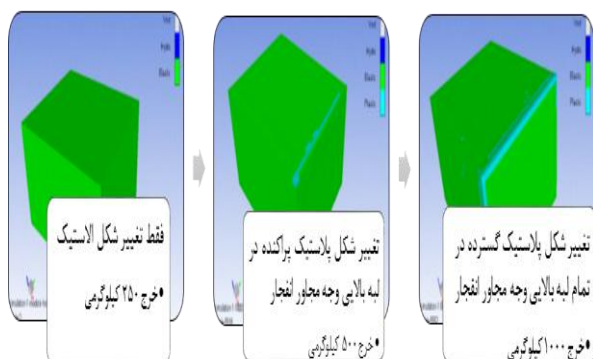
شکل (۸): نمودار تعیین حداکثر فشار در آئین‌نامه (TM5-855-1)

[۱]

توسط سنجه‌های قرار گرفته در وجوه مجاور با انفجار از سازه ثبت گردید. در شکل (۱۱) تغییر شکل سازه زیرزمینی تحت انفجار با وزن خرج‌های مختلف، نشان داده شده است.



شکل (۱۰): تصویر مدل شبیه‌سازی شده و مراحل شکل‌گیری چاله انفجاری و کانتور فشار سازه در حال آنالیز



شکل (۱۱): تغییر شکل سازه شبیه‌سازی شده پس از تحلیل عددی برای وزن خرج‌های ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرمی TNT

جدول (۸): مقادیر ضریب تضعیف برای انواع مصالح [۱]

نوع خاک	ضریب تضعیف
رس اشباع	۱/۵
سیلت و رس تا حدودی اشباع	۲/۵
ماسه بسیار متراکم	۲/۵
ماسه متراکم	۲/۷۵
ماسه ضعیف	۳/۰
ماسه بسیار ضعیف	۳/۲۵

تلاش‌های زیادی برای بررسی خرابی انجام شده است و به‌طور کلی تحلیل‌ها براساس دو روش اصلی تجربی و شبیه‌سازی عددی توصیف پذیرند. معیار خرابی تجربی، معمولاً براساس سرعت اوج ذره، از مشاهدات و اندازه‌گیری‌ها به‌دست آمده است. بخش مهندسی ارتش آمریکا، چند آزمایش بزرگ انفجار در سال‌های ۱۹۴۸ تا ۱۹۵۲ در نزدیکی تونل بدون پوششی در ماسه‌سنگ انجام داد. براساس مشاهدات، این آزمایش‌ها و مطالعات جامعی که صورت پذیرفت، خرابی برپایه PPV به چهار ناحیه دسته‌بندی شد که تنها گزارشی از آن در اختیار عموم مهندسان قرار گرفت. مطابق جدول (۱۰)، در این گزارش نواحی خرابی شامل چهار بخش؛ گسیختگی متناوب، گسیختگی محلی، گسیختگی کلی و بسته‌شدن دهانه تقسیم‌بندی شده است [۱۰].

جدول (۹): محدود معیار خرابی PPV [۱۰]

نوع خرابی	PPV(m/s)
بسته شدن دهانه	-
گسیختگی کلی	۱۲
گسیختگی موضعی	۴
گسیختگی متناوب	۰/۹-۱/۸

۴- تحلیل عددی

برای بررسی عددی سه مدل از سازه زیرزمینی تحت اثر وزن خرج‌های انفجاری ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرمی از ماده منفجره TNT در اتوداین شبیه‌سازی گردید. بلافاصله پس از شروع تحلیل توسط نرم‌افزار با گذشت زمان یک چاله انفجاری در لبه مدل شبیه‌سازی شده به عمق ۲/۲، ۲/۵۶ و ۳/۲ متر و قطر ۳، ۳/۲ و ۳/۵ متر به ترتیب برای وزن خرج‌های ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرمی تشکیل می‌گردد که مراحل شکل‌گیری چاله انفجاری و کانتور فشار سازه در حال آنالیز در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

هم‌چنین به‌منظور بررسی مدل عددی، سنجه‌هایی در تمامی وجوه سازه قرار داده شد که در تمامی مدل‌سازی‌ها بیش‌ترین مقادیر

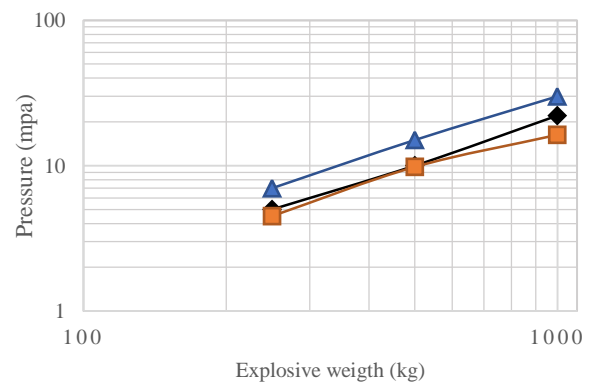
۵- نتایج تحلیل عددی

نتایج کلیه محاسبات حداکثر فشار و سرعت ذرات برای هر سه مدل مورد مطالعه به سه روش حل عددی و استفاده از گراف‌های تجربی و نیز روابط تحلیلی در جدول (۱۱) ذکر شده است.

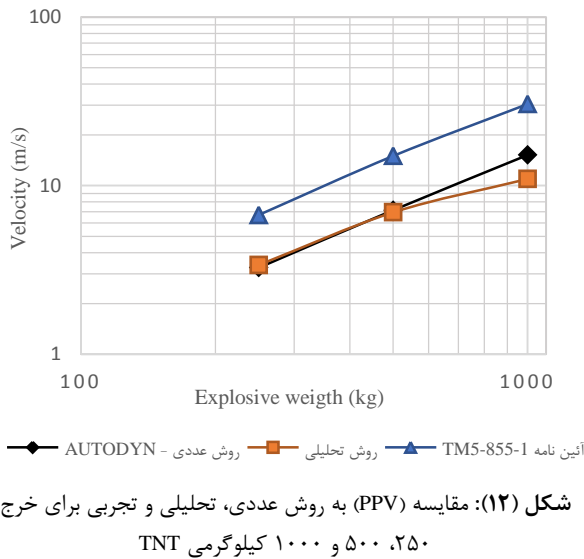
جدول (۱۰): نتایج محاسبات عددی، تجربی و تحلیلی برای سازه زیرزمینی تحت انفجار خرج‌های ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرمی از ماده منفجره TNT

شماره مدل شیشه‌سازی شده	وزن خرج W(kg)	فاصله محل انفجار تا سازه R (m)	ضریب جفت‌شدگی (f)	C (m/s)	حداکثر فشار P _o (MPa)			PPV (m/s)		
					پیش‌بینی TM5-855-1	روش تحلیلی	روش عددی	پیش‌بینی TM5-855-1	روش تحلیلی	روش عددی
۱	۲۵۰	۵	۰/۸	۵۱۹/۳۵	۷	۴/۵۷	۴/۷۸	۶/۷	۳/۳۸	۳/۲۵
					۱۵	۹/۸۳	۱۰	۶/۹۴	۷/۱۵	
					۲۸	۱۶/۳۳	۲۲/۱۱	۳۰/۴۸	۱۵/۲	
۲	۵۰۰	۵	۰/۶	۵۳۶/۲۸	۱۵	۹/۸۳	۱۰	۲۲/۸۶	۶/۹۴	۷/۱۵
					۲۸	۱۶/۳۳	۲۲/۱۱	۳۰/۴۸	۱۵/۲	
					۲۸	۱۶/۳۳	۲۲/۱۱	۳۰/۴۸	۱۵/۲	
۳	۱۰۰۰	۵	۰/۵	۵۶۴/۳۵	۲۸	۱۶/۳۳	۲۲/۱۱	۳۰/۴۸	۱۵/۲	۱۵/۲
					۲۸	۱۶/۳۳	۲۲/۱۱	۳۰/۴۸	۱۵/۲	
					۲۸	۱۶/۳۳	۲۲/۱۱	۳۰/۴۸	۱۵/۲	

هم‌چنین در اشکال (۱۱-۱۲) به ترتیب نمودارهایی جهت مقایسه نتایج حداکثر فشار و سرعت ذرات حاصل از جدول فوق ترسیم شده است.



شکل (۱۱): مقایسه نتایج حداکثر فشار به روش عددی، تحلیلی و تجربی برای وزن خرج ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرمی TNT



۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، اثرات انفجار سطحی که نسبت به یک سازه زیرزمینی دارای فاصله افقی و قائم بود با استفاده از هیدروکند توانمند AUTODYN تحلیل و با مطالعه پارامتری، شامل اثر وزن شارژ انفجاری توسط مدل‌های عددی، فشار موج انفجار در خاک و هم‌چنین سرعت ذرات حاصل، بررسی و ایمنی پوشش دیواره سازه بر مبنای معیار تخریب (PPV) ارتش آمریکا تعیین گردید. هم‌چنین، به‌منظور صحت‌سنجی، نتایج عددی با گراف‌های تجربی ارائه‌شده در آیین‌نامه (TM5-855-1) ارتش آمریکا و نیز روابط تحلیلی آقایان اسمیت و بانگاش مقایسه شد. از مجموع مباحث مطرح‌شده و با توجه به نتایج جدول (۱۱) و اشکال (۱۱-۱۲) می‌توان نتایج زیر را بیان نمود:

- با توجه به نتایج حاصل برای سازه زیرزمینی تحت بارگذاری انفجاری سطحی کناری، روش‌های عددی و تحلیلی با یکدیگر تطابق خوبی دارند ولی نتایج حاصل از گراف‌های تجربی (TM5-855-1) برای این حالت از وقوع انفجار کمی محافظه‌کارانه به‌دست آمد. علت این امر نیز به‌دلیل فرض وقوع انفجار کامل در ترسیم گراف‌های آیین‌نامه و ضریب جفت‌شدگی یک می‌باشد، درحالی‌که در انفجار سطحی بخش زیادی از انرژی انفجار به محیط اطراف خرج منتقل شده و نیز ضریب جفت‌شدگی در این حالت برابر ۰/۴ در محاسبات عددی و تحلیلی در نظر گرفته می‌شود.
- بررسی تأثیر وزن خرج بر روی پاسخ سازه زیرزمینی با عمق دفن ثابت و تحت انفجار سطحی کناری نشان می‌دهد که با افزایش

9. T. Zhenguo and L. Yong, "Evaluation of typical concrete material models used in hydrocodes for high dynamic response simulations," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 36, pp. 132-146, 2009.
10. A. J. Hendron, "Engineering of rock blasting on civil projects", *Structural and Geometrical Echanics, A Valume Honoring NM Newmark Prentice Hall*. In Hall: W.J. (ED.), New Jersey, 1977.

وزن خرج انفجاری برای سازه، مقادیر حداکثر فشار روی سازه و نیز (PPV) در هر سه روش حل عددی و تجربی و تحلیلی افزایش می‌یابد.

- از میان سنجه‌های نصب‌شده در روی سازه، بیش‌ترین مقادیر توسط سنجه‌هایی که در وجه مجاور انفجار قرار داشتند ثبت گردید. به‌عبارت دیگر، در این حالت وجهی از سازه که در راستای عمود بین خرج انفجاری و سازه قرار دارد، بیشترین تأثیر را از انفجار دریافت می‌نماید.

- با توجه به نتایج (PPV)، مشاهده می‌شود که نتایج برای خرج‌های ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرمی حاصل از روش‌های عددی و تحلیلی با یکدیگر تطابق خوبی دارند، ولی نتایج روش تجربی نسبت به دو روش دیگر در این حالت بسیار محافظه‌کارانه است.

با توجه به بررسی معیار خرابی برای وجه مجاور انفجار، مطابق معیار (PPV) ارتش آمریکا در وزن خرج‌های ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرمی وجه مجاور دچار گسیختگی و خرابی کلی می‌شود ولی در مدل شبیه‌سازی شده فقط لبه بالایی وجه مجاور انفجار دچار تغییر شکل پلاستیک شده و در سایر نقاط فقط تغییرشکل الاستیک مشاهده می‌گردد. لذا می‌توان گفت معیار مذکور برای این حالت محافظه‌کارانه می‌باشد. ضمناً مطابق با این معیار برای وزن خرج ۲۵۰ کیلوگرمی گسیختگی موضعی به‌دست آمد.

۷- مراجع

1. TM5-855-1, "Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapon," Washington, DC: Department of US Army Security Engineering, Nov. 1986.
2. J. B. W. Borgers and J. Vantomme, "Towards a Parametric Model of a Planar Blast Wave Created with Detonating Cord," 2006.
3. D. Ambrosini and R. D. Anesib, "Blast Load Assessment Using Hydrocods," vol. 2, no. 10, 2006.
4. P. D. Smith, J. G. Hetherington, Hetherington, and J. Hill, "Blast and Ballistic Loading of Structures," Oxford OX2: Butterworth-Heinemann Ltd, Linacre House, 1994.
5. M. Y. H. Bangash, "Impact and Explosive Analysis and design," Press: C. R. C., 1993.
6. Autodyn, "Theory Manual," Century Dynamics INS: Revision, 2005.
7. B. Pandurangan, "Development, Parameterization and Validation of Dynamic Material Models for Soil and Transparent Armor Glass," Ph.D. Thesis, Graduate School of Clemson Univ., 2009.
8. R. Rempling, "Concrete Wall Subjected to Fragment Impacts, Numerical Analyses of Perforation and Scabbing," M. Sc. Thesis Dep't of Structural Eng. Concrete Structures, Chalmers Univ. of Tech., Goteborg, Sweden, 2004.

Analysis of the Lateral Surface Blast Loading in 3-Dimensional Numerical Model of Reinforced Concrete Underground Structure with RHT Resistance

S. Peyman^{*}, M. H. Taghavi Parsa

Abstract

Due to the insecurity caused by terrorist attacks, nowadays assured and underground structures play an important role in the development of the country, and are considered as vital arteries in major cities, Especially in crises . The Regulations and standards of constructing or procedures designing of blast-resistant structures are very scarce. Because of security reasons of classified military technologies, civil engineers do not have access to the results of field experiments explosion and Design procedures and advanced construction techniques for protecting military sites and assured structures as well as its regulations. So the only way to understand the structural response is analytical methods and at a higher level using numerical simulations with software. In this paper, numerical simulation methods is used for the analysis and simulation of surface explosions on the underground structure. All the simulations and modeling presented are using AUTODYN hydro code. In order to evaluate the structure response, parametric analysis is used that includes the effect of the explosive charge weight on the buried structure. Owing to the progression of pressure wave in the soil and the standard of peak particle velocity of explosion, the Failure of structure are examined. In the end, the numerical results are compared to relations presented at the scientific source and the US Army Corps of Engineers Manual (TM5-855-1).assets.

Key Words: *Underground Structure, Shock Ground Parameters, Surface Explosion, Numerical Simulation, AUTODYN*

* Imam Hussein Comprehensive University of Technology (speyman@ihu.ac.ir) - Writer-in-Charge