



تحلیل و بررسی بارگذاری انفجاری سازه‌های زیرزمینی بتن مسلح تحت اثر انفجار مدفون

محمدحسین تقوی پارسا^۱، صفا پیمان^{۲*}

^۱ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

^۲ دانشکده مهندسی و پدافند غیر عامل، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۴ اردیبهشت ۱۳۹۶
بازنگری: ۱۱ آبان ۱۳۹۶
پذیرش: ۲۶ آذر ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۱۳ اسفند ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

سازه زیرزمینی
بارگذاری انفجاری
انفجار مدفون
پارامترهای شوک زمینی
شبیه‌سازی عددی
اتوداین

چکیده: امروزه برای طراحی سازه‌های زیرزمینی افزون بر بارهای رایج نظیر زلزله، بارگذاری انفجاری نیز در نظر گرفته می‌شود. اغلب سازه‌های زیرزمینی در سراسر جهان در یک عمق ایمن در داخل خاک احداث می‌گردند. به عمقی از زمین که در آن سازه زیرزمینی تحت اثر نیروهای انفجار آسیب‌ی دریافت ننماید، ایمن اطلاق می‌شود. علت استفاده از عمق خاک در طراحی و احداث سازه‌های زیرزمینی بهره هرچه بیشتر از خاصیت تکیه‌گاهی خاک اطراف سازه و حداقل رساندن نیروی وزن سازه و همچنین استفاده از خاصیت میرایی خاک جهت کاهش دامنه موج شوک ناشی از انفجار سلاح‌های نفوذکننده دقیق می‌باشد. بارگذاری انفجاری این سازه‌ها معمولاً بر اساس روابط و آئین‌نامه‌های حاصل از پژوهش‌های نظری و تجربی انجام می‌گیرد. از طرفی روش‌های عددی و استفاده از نرم‌افزارهای اجزاء محدود نیز در محاسبه بار انفجاری وارد بر این سازه‌ها رواج پیدا کرده است. در این پژوهش اثرات انفجار مدفون بر روی یک سازه زیرزمینی بتن مسلح به روش عددی و تحلیلی بررسی شده است. شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود اتوداین انجام گرفته است. به منظور تحلیل نحوه بارگذاری انفجاری و پاسخ سازه زیرزمینی، اثر وزن ماده منفجره و عمق دفن سازه مورد بررسی قرار گرفته است. به علاوه نتایج عددی نیز با روابط ارائه شده در منابع معتبر علمی و دستورالعمل کشور آمریکا برای طراحی این نوع از سازه‌ها مقایسه گردیده است. در انتها با توجه به نتایج پژوهش انجام گرفته در راستای بهبود بارگذاری سازه‌های مذکور تحت اثر انفجار در داخل خاک در طراحی‌ها، پیشنهاد می‌گردد از اعمال ضریب افزایشی به چنین بارهایی اجتناب شود.

۱- مقدمه

امروزه با توجه به افزایش تهدیدات نظامی و تروریستی در جهان برای طراحی سازه‌های زیرزمینی علاوه بر بارهای رایجی نظیر زلزله، بارگذاری انفجاری نیز در نظر گرفته می‌شود. اغلب سازه‌های زیرزمینی در سراسر جهان در یک عمق ایمن در داخل خاک احداث می‌گردند. عمقی از خاک که به سازه زیرزمینی تحت اثر نیروهای انفجار آسیب‌ی وارد نگردد، ایمن اطلاق می‌شود. علت استفاده از عمق خاک در طراحی و احداث سازه‌های زیرزمینی بهره هرچه بیشتر از خاصیت تکیه‌گاهی خاک اطراف سازه و حداقل رساندن نیروی وزن سازه و همچنین استفاده از خاصیت میرایی خاک جهت کاهش دامنه موج شوک ناشی از انفجار سلاح‌های نفوذکننده دقیق می‌باشد. بارگذاری انفجاری این نوع از سازه‌ها معمولاً بر اساس روابط حاصل از پژوهش‌های نظری و تجربی انجام می‌گیرد. از آن جمله می‌توان به تحقیقات اسمیت و هترینگتون [۱] در اواخر قرن گذشته میلادی و نیز در ادامه بولسون [۲] اشاره نمود که، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه انفجار در خاک انجام داده‌اند. در این پژوهش نیز از نتایج تحقیقات آن‌ها برای به دست

آوردن پارامترهای شوک زمینی استفاده شده است.

در حال حاضر مهم‌ترین مراجع بارگذاری انفجاری قابل دسترس عموم مهندسين، آئین‌نامه‌های ارائه‌شده توسط ایالات متحده آمریکا نظیر (TM5-1300) در زمینه بارگذاری انفجاری کلیه سازه‌ها و (TM5-855-1) در حوزه بارگذاری انفجاری سازه‌های زیرزمینی و همچنین آئین‌نامه بارگذاری انفجارات هسته‌ای (ASCE) حاصل تحقیقات انجمن مهندسين عمران آمریکا است. در پژوهش حاضر نتایج به دست آمده از تحلیل عددی با روابط تجربی آئین‌نامه (TM5-855-1) مقایسه شده است [۳].

از سوی دیگر با استفاده از هیدروکدها و نرم‌افزارهای اجزاء محدود نیز می‌توان بارهای انفجاری وارد بر این سازه‌ها را محاسبه نمود. هیدروکد به نرم‌افزار رایانه‌های اطلاق می‌گردد که قابلیت محاسبه تنش، کرنش و پارامترهای مربوط به امواج دینامیکی را بر حسب مکان و زمان دارا باشد. اخیراً روش‌های حل عددی متنوعی با توجه به نوع سیستم سازه‌ای به کار گرفته شده است. برای دستیابی به رفتار واقع‌بینانه سازه‌های زیرزمینی در برابر پدیده انفجار، مبنای اغلب روش‌های عددی در یک طراحی جامع و دقیق از سازه با توجه به فرآیند شبیه‌سازی چهار مرحله‌ای صورت می‌پذیرد. این چهار مرحله شامل شکل‌گیری چاله انفجاری، انتشار موج شوک حاصل

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: speyman@mail.kntu.ac.ir

مصالح متخلخل در زیر این دال استفاده شود. در مورد انفجارات زیرسطحی نیز تعبیه چاهک‌هایی با فواصل متفاوت در اطراف سازه بررسی گردید و مشخص شد که این روش برای محافظت از سازه‌های مدفون در برابر انفجارات زیرسطحی کارآیی مناسبی خواهد داشت. رحیمی و بهادری [۱۵] به مقایسه تاثیر انفجار سطحی و مدفون بر مخازن بتنی مدفون پرداختند. نتایج این پژوهش نشان از افزایش اثر بار ناشی از انفجار مدفون نسبت به انفجار سطحی داشت.

بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد تحقیقات علمی در زمینه بارگذاری انفجاری مدفون و در داخل خاک برای سازه‌های زیرزمینی و نحوه اعمال بار انفجار بر روی این نوع از سازه‌ها و عملکرد آن‌ها کمتر مورد توجه محققین بوده است. اغلب تحقیقات انجام گرفته در حوزه بارگذاری انفجاری معطوف به انفجارهای سطحی است. در این پژوهش با توجه به روابط تحلیلی و تجربی موجود در زمینه بارگذاری انفجاری سازه‌های زیرزمینی با استفاده از شبیه‌سازی انفجار مدفون توسط نرم‌افزار اتوداین، ضمن بررسی پارامترهای شوک زمینی به روش عددی و مقایسه نتایج به دست آمده با روش‌های تحلیلی و تجربی، به مطالعه و بررسی بارگذاری سازه زیرزمینی طراحی شده، پرداخته شده است.

۲- کلیات

۲-۱- پارامترهای شوک زمینی

امواج ناشی از انفجار در خاک به دو صورت موج‌های حجمی (فشاری یا عرضی) و موج سطحی (رایلی) منتشر می‌شوند. خاطر نشان می‌سازد، برای سازه‌های مدفون نزدیک به محل انفجار، آثار امواج سطحی نسبت به امواج حجمی فشاری ناچیز می‌باشد. همچنین تاثیر انفجار در خاک به مشخصات خاک، وجود سنگ‌های سخت و نیمه سخت و میزان چسپندگی ذرات خاک بستگی دارد. در بررسی یک شوک زمینی معمولاً دو پارامتر سرعت ذره‌ای بیشینه و توزیع فشار موثر هستند. به دست آوردن این دو عامل حاصل از موج انفجار در محیط‌های پیوسته و آزاد رابطه‌های زیادی برای حالت‌های مختلف به صورت تجربی و نیمه تحلیلی پیشنهاد شده است. اساس این رابطه‌ها بر مبنای بیان روابط تغییر شکل و روابط بقاء اندازه حرکت و انرژی می‌باشد که با توجه به مشاهدات تجربی، ساده‌سازی‌های لازم بر آن‌ها اعمال شده است. اسمیت و هترینگتون جهت تعیین بیشینه پارامترهای شوک زمینی فشار و سرعت ذره‌ای به ترتیب روابط ۱ و ۲ را پیشنهاد داده‌اند [۱]:

$$P_o = \rho \times C \times u_o \quad (1)$$

از انفجار در خاک، اندرکنش خاک و سازه و پاسخ دینامیکی سازه است که باید هر چهار مرحله فوق در یک مدل شبیه‌سازی گردند [۴].

در همین زمینه پژوهش‌هایی توسط محقق انجام گرفته است. کلاتر و استال [۵] از هیدروکد اتوداین برای مدل کردن موج انفجار استفاده کردند و توانستند فشار نهایی بیشینه را در برخی از نقاط سازه‌های طراحی شده محاسبه کنند. به علاوه لوسیونی و آمبروزینی [۶] از مدل سه‌بعدی نرم‌افزار اتوداین برای محاسبه پارامترهای فشار نهایی استفاده کردند و توانستند نتایج فشار نهایی بیشینه را با رابطه بیان شده توسط هنریچ [۷] مقایسه کند.

بورگرس و واتنومی [۸] نیز برای مدل‌سازی موج انفجار ایجادشده در خاک از نرم‌افزار اتوداین استفاده کردند. مطالعات آن‌ها نشان داد که 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.

همچنین لاکسونی و همکاران [۹] برای اطمینان از صحت نتایج عددی مبنی بر حفره ایجادشده ناشی از انفجار در خاک، در آزمایشگاه یک انفجار بر روی سطح خاک را انجام داده و نتایج آن را با هر یک از دو مدل لاگرانژی و اولبری خود مقایسه کرده و مقدار تخریب را در سه حالت باهم مقایسه کردند. آئیربان [۱۰] نیز حفره به وجود آمده ناشی از انفجار بر روی سطح زمین و اثرات آن بر روی تونل را در حالت عددی، در دو حالت دوبعدی و سه‌بعدی به‌دست آورد. وی از نتایج مدل دوبعدی خود برای تخمین ابعاد حفره به وجود آمده ناشی از انفجار و از نتایج مدل سه‌بعدی خود برای بررسی اثر انفجار بر روی تونل استفاده کرد و در انتها نتایج خود را با آزمایش لاکسونی [۸] ارزیابی کرد.

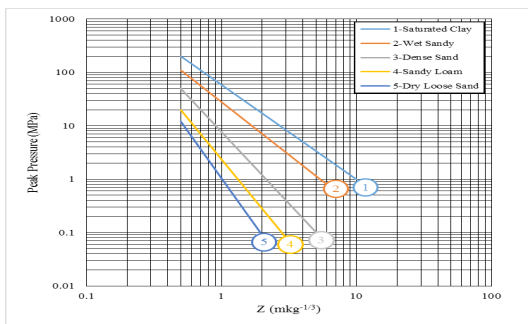
یوینگ یانگ با همکاری ژو و وانگ [۱۱] ضمن بررسی نتایج یک مطالعه تجربی بر روی یک سازه مترو، پاسخ دینامیکی تونل زیر زمینی شبیه‌سازی شده تحت اثر انفجار را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با مدل‌سازی عددی، اثر تغییرات عمق دفن سازه تحت انفجار را مطالعه نمودند.

مازک و المانی [۱۲] با انجام یک مطالعه عددی بر روی خط سه متروی شهر قاهره مصر عملکرد سازه تونل مترو را در مقیاس یک دهم با استفاده از مدل دو بعدی المان محدود مدل‌سازی و بررسی نموده و مقادیر بارهای وارده در اعماق مختلف زمین در اطراف تونل زیرزمینی را مورد بررسی قرار دادند. روهیت تیواری و همکاران [۱۳] به بررسی آنالیز دینامیکی یک تونل زیرزمینی بتن مسلح تحت اثر انفجار با استفاده از مدل‌سازی عددی سه‌بعدی و در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه پرداختند. عمده توجه آن‌ها میزان جابجایی سقف سازه تونل تحت اثر انفجار ماده منفجره در فواصل مختلف نسبت به سازه زیرزمینی معطوف شده بود.

قلی‌زاد و رجبی [۱۴] به بررسی نحوه ایمن‌سازی سازه بتنی مدفون در برابر بار انفجار پرداختند. نتایج تحلیل‌های آن‌ها گویای این مطلب است که استفاده از دال ضد انفجار کارآیی چندانی در کاهش انتقال موج انفجار به سازه مدفون نخواهد داشت، مگر این‌که از یک فضای خالی یا لایه‌ای از

همچنین (n) ضریب تضعیف خاک است که وابسته به نوع خاک بوده و مقدار آن با استفاده از جدول ۱ به دست می‌آید. در این پژوهش برای ضریب تضعیف نیز با توجه به نوع خاک مفروض از مقدار سطر سوم جدول ۱ استفاده شده‌است.

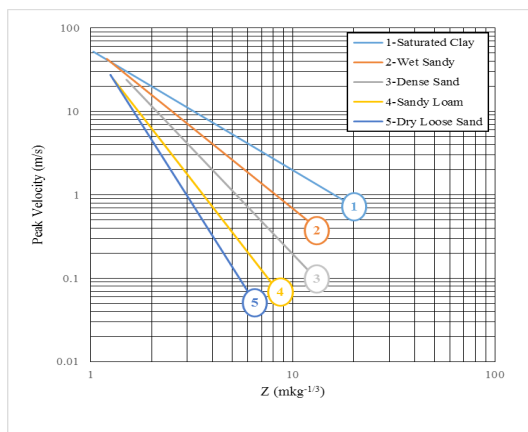
از طرفی با استفاده از آئین‌نامه (TM5-855-1) امریکا می‌توان به ترتیب مقادیر فشار و سرعت ذره‌ای بیشینه را با توجه به نوع خاک و مشخصات آن‌ها در جدول ۲ و به وسیله گراف‌های ارائه شده در شکل‌های ۲ و ۳ بر حسب فاصله مقیاس شده (Z) تعیین نمود. مطابق تعریف فاصله مقیاس شده (Z=R/W^(1/3)) در هر انفجار دارای رابطه مستقیم با فاصله از مرکز انفجار (R) و همچنین رابطه معکوس با وزن خرج انفجار (W) است.



شکل ۲. نمودار تعیین بیشینه فشار در آئین‌نامه (TM5-855-1)

[۳]

Fig. 2. maximum pressure in TM5-855-1 the



شکل ۳. نمودار تعیین بیشینه سرعت ذره‌ای در آئین‌نامه (TM5-855-1)

[۳]

Fig. 2. the particle velocity in TM5-855-1

$$u_o = 48.8f \left(\frac{2.52R}{W^{1/3}} \right)^{-n} \quad (2)$$

در رابطه‌های فوق فشار بیشینه با (P_o) و سرعت ذره‌ای بیشینه با (u_o) نشان داده شده‌است. (W) وزن ماده منفجره بر حسب کیلوگرم و (R) فاصله از محل انفجار به متر، (C) سرعت انتشار موج انفجار بر حسب متر بر ثانیه و (ρ) چگالی خاک بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. (f) ضریب جفت‌شدگی زمین و ماده منفجره است که میزان پیوستگی ماده منفجره با زمین را نشان می‌دهد. مقدار این ضریب با توجه به نمودار شکل ۱ بر حسب رابطه عمق نفوذ خرج در داخل زمین (d) با وزن آن تعیین می‌گردد. در این پژوهش با توجه به نوع انفجار تقریباً برابر با یک در نظر گرفته شده‌است.

جدول ۱. مقادیر ضریب تضعیف برای انواع خاک [۱]

Table. 1. Attenuation coefficient of any soil type

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

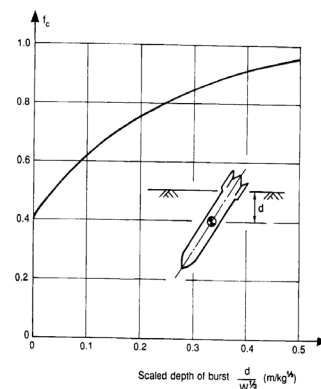


Figure 7.10 Dependence of coupling factor on scaled depth of burst

شکل ۱. نمودار تعیین ضریب جفت‌شدگی زمین بر حسب عمق نفوذ خرج مقیاس شده [۱]

Fig. 1. Characteristic of determining the coupling coefficient of the earth and explosive in terms of the scaled depth

جدول ۲. تعیین مشخصات خاک برای محاسبه پارامترهای شوک زمینی در آئین نامه (TM5-855-1) [۳]

Table. 2. Soil characteristics to calculate the earth's shock parameters in TM5-855-1

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

$$P_o = 0.407 f(\rho c) \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right)^n \quad (3)$$

طبق رابطه ۳ (P_o) حداکثر فشار خاک در فاصله (R) از منبع انفجار است. (f) همان ضریب جفت‌شدگی است. هم‌چنین ضریب تضعیف (n) و مقاومت آکوستیک خاک (ρc) که با توجه به مشخصات خاک مورد آزمایش تعیین می‌گردند.

۲-۳- تاریخچه زمانی فشار وارد بر سازه‌های زیرزمینی

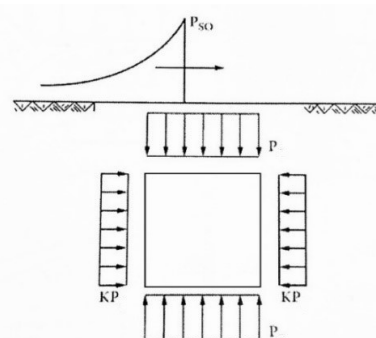
تاریخچه زمانی بار ناشی از انفجار بر سقف یا دیوار یک سازه زیرزمینی با توجه به بار معادل و فشار میدان آزاد تعیین می‌گردد. فشار میدان آزاد، فشار اعماق خاک بدون در نظر گرفتن سازه است. شکل ۵ نمودار تاریخچه زمانی بار حاصل از انفجار را مطابق با آئین نامه (TM5-855-1) نشان می‌دهد. در این شکل تاریخچه زمانی به دو روش مثلث معادل و به صورت نمودار خطی و نیز به صورت تابع نمایی $P(t)$ با معادله ۴ ترسیم شده‌است.

$$P(t) = P_o e^{-t/t_a} \quad (4)$$

در نمودار ۵ و رابطه ۳ (P_o) فشار اتمسفر محیط و (P_r) فشار وارد بر پوشش سازه زیرزمینی است. (t_a) زمان رسیدن موج انفجاری به سازه بر حسب فاصله از انفجار (R) و سرعت لرزه‌ای (c) است. (t_o) زمان رسیدن به فشار حداکثر و (t_r) زمان تداوم فشار وارد بر سازه با توجه به ضخامت (T) پوشش دیوار یا سقف سازه است. هم‌چنین برای یک سازه زیرزمینی تحت اثر یک انفجار (t_d) مدت زمان تداوم انفجار بر حسب ضربه و فشار حداکثر

۲-۲- بارگذاری انفجاری سازه‌های زیرزمینی

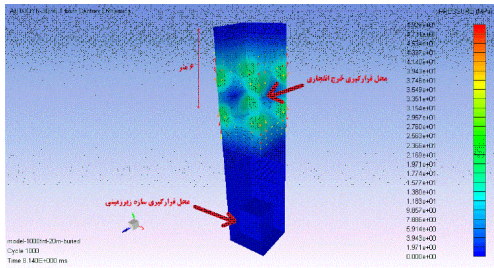
روش‌های مختلفی برای اعمال بار ناشی از انفجار بر روی پوشش بتنی سازه‌های زیرزمینی وجود دارد. روش‌های موجود طراحی برای حالات با محدوده مقیاس شده ($Z > 1/0$) به کار می‌روند. هم‌چنین برای حالات ($Z \leq 1/0$) آزمایش‌های متعددی انجام شده، اما شدت بارگذاری در این شرایط مقاومت در برابر بارهای وارده را بسیار دشوار کرده است. یک روش معمول در برآوردها مطابق با آئین نامه امریکا استفاده از فشار بازتابی (P_r) با فرمول تقریبی ($P_r = 1/5 P_o$) است. در این روش پس از تعیین فشار در عمق مورد نظر با استفاده از رابطه ۳ و نیز اعمال ضریب ۱/۵ برابری مطابق با آئین نامه، فشار وارده بر پوشش بتنی سازه مشابه با آنچه در شکل ۴ نشان داده شده‌است، تعیین می‌گردد.



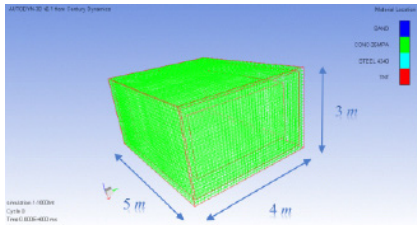
شکل ۴. نحوه اعمال بار به سازه زیرزمینی در آئین نامه (TM5-855-1)

[۳]

Fig. 4. load of the underground structure in TM5-855-1



الف: پروفیل خاک شامل سازه مدفون و ماده منفجره



ب: ابعاد سازه مدفون

شکل ۶. تصویری از سازه زیرزمینی بتن مسلح مدل سازی شده در اتوداین

Fig. 6. A: The soil profile includes buried structures and explosives/ B: Dimensions of Buried Structures

در این پژوهش با توجه به آنکه موج شوک ناشی از انفجار در محیط خاک منتشر شده و به پوشش سازه زیرزمینی برخورد می کند، برهم کنش سازه بتن مسلح و خاک اطراف آن از نوع لاگرانژی تعریف شده است. هم چنین به لحاظ شرایط مرزی، سازه زیرزمینی در یک محیط نیمه متناهی فرض شده است. در نرم افزار اتوداین برای اعمال چنین شرایط مرزی در مدل های لاگرانژی از شرایط مرزی ترنس میت استفاده می شود.

۳-۲- مدل سازی خاک

خاک مورد مطالعه از جنس ماسه متراکم است. مشخصات این نوع خاک در جدول ۳ ذکر شده است.

برای مدل کردن خاک، معادله حالت تراکم (Compaction) مطابق رابطه ۶ استفاده شده است. در این معادله حالت (C) سرعت صوت و (ρ) چگالی آن است [۱۶].

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

(۶)

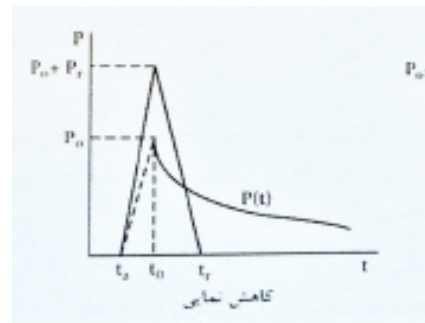
جدول ۳. مشخصات خاک مدل سازی شده

Table 3. Modeled soil Properties

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

وارد بر سازه است. کلیه پارامترهای یاد شده مطابق روابط ۵ تعیین می گردند.

$$\begin{cases} t_a = R / c \\ t_o = 1.1t_a \\ t_r = 12T / 3048 \text{ (m/s)} \\ t_d = 2I_o / P_o \end{cases} \quad (۵)$$



شکل ۵. نمودار تاریخچه زمانی بار انفجار در آئین نامه (TM5-855-1)

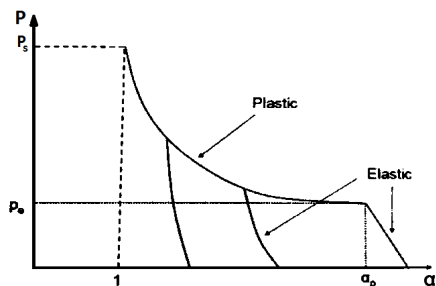
[۳]

Fig. 5. The time history of the explosion in TM5-855-1

۳-۲- مدل سازی عددی

۳-۱- مدل سازی هندسی

در این پژوهش سازه زیرزمینی تحت اثر انفجار در داخل خاک با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود اتوداین و به صورت سه بعدی مدل سازی گردیده است. مدل هندسی شامل سازه زیرزمینی بتن مسلح، خاک ماسه ای به عنوان محیط انتشار موج انفجار و هم چنین ماده منفجره از جنس TNT به صورت خرج های انفجاری بدون پوشش می باشد. سازه دارای ارتفاع ۳ متر، دهانه ۴ متر و طول ۵ متر با دیوارهایی به ضخامت ۰/۵ متری است که با استفاده از دو لایه صفحه فولادی به ضخامت ۰/۱ متری مسلح شده اند. خرج انفجاری با توجه به مشخصات بمب های نفوذکننده دارای عمق دفن ثابت ۶ متر بوده و نیز در وزن های متفاوت برحسب کیلوگرم در نظر گرفته شده است. در شکل ۶ تصویری از مدل هندسی سازه مدل سازی شده در نرم افزار اتوداین نشان داده شده است.



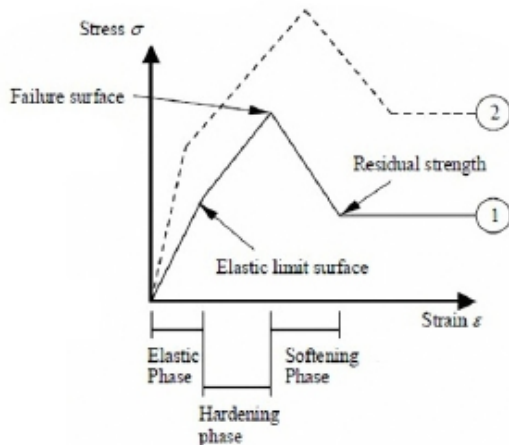
شکل ۸. منحنی رفتار بتن در حالت p - α [۱۷]

Fig. 8. Concrete behavior curve in p - α state

با توجه به معادله ۷ در نرم افزار اتوداین رابطه بین تنش با کرنش، نرخ کرنش، انرژی داخلی و خسارت برای بتن با استفاده از معیار RHT بیان می گردد.

$$\sigma_{ij} = f(\varepsilon_{ij}, \dot{\varepsilon}_{ij}, E, D) \quad (7)$$

این مدل مقاومتی توسط رمپلینگ [۱۸] ارائه شده است و رابطه بین سختی فشاری، سختی کرنشی و نرخ آن و سه ثابت وابسته (محصول تنش اصلی) و همچنین شاخص آسیب را به یکدیگر توصیف می کند. این ثوابت وابسته نیز مشتمل بر سطح شکست، حد الاستیک و مقاومت باقیمانده می باشند.



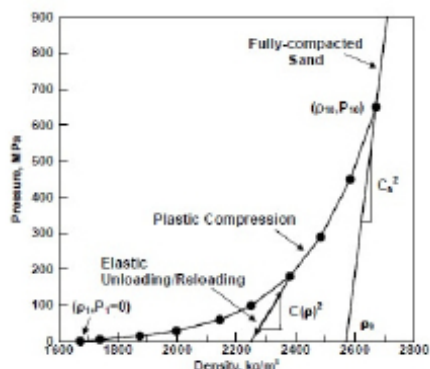
شکل ۹. مدل مقاومتی بتن در حالت RHT-Concrete

Fig. 9. Concrete Resistance Model in RHT-Concrete

معادله حالت تراکم روی بارگذاری و باربرداری مواد متخلخل تمرکز دارد. در این معادله حالت سرعت صوت بر حسب دانسیته تعریف می گردد. همچنین به کمک معادله حالت فوق در اتوداین وابستگی سرعت صوت به چگالی ماسه به کمک ده نقطه (C, p) که ایجاد رابطه چندتکه ای می کند، تعریف می شود.

شکل ۷ معادله حالت تراکم برای ماسه، بر اساس رابطه تکه ای چندخطی بین فشار و چگالی را نشان می دهد. بر اساس این نمودار در بارگذاری و باربرداری الاستیک، رابطه فشار و چگالی به صورت خطی نیست. این موضوع نشان دهنده آن است که سرعت صوت در ماسه تابعی از چگالی آن می باشد. پارامترهای معادله حالت خاک در جدول ۴ ذکر شده است.

برای تعریف مدل مقاومتی خاک مورد مطالعه از مدل (MO-Granular) استفاده شده است. این مدل بسط مدل دراگر-پراگر است، به نحوی که اثرات مرتبط با مواد دان های را در نظر می گیرد. در این مدل اثر کار سختی، دانسیته سختی و مدول برشی متغیر در نظر گرفته می شود [۱۷]. مشخصات مدل مقاومتی مورد استفاده در جدول ۵ آمده است. همچنین برای حذف المان های بسیار اعوجاج یافته از روش فرسایش ناگهانی نرم افزار استفاده شده است.



شکل ۷. رابطه بین چگالی و فشار در معادله حالت تراکم برای ماسه [۱۶]

Fig. 7. The relationship between density and pressure in the density equation for sand

۳-۳ - مدل سازی پوشش بتنی سازه

پوشش بتنی سازه زیرزمینی از نوع Conc35 با معادله حالت پی-آلفا و مدل مقاومتی و شکست RHTConcrete در نرم افزار اتوداین تعریف شده است. معادله حالت پی-آلفا دسته دیگری از معادلات حالت تراکم است. با وجود آنکه 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 بسیار زیاد از معادله حالت پی-آلفا بر حسب فشار و دمای مشخص استفاده می شود [۱۷]. در شکل ۸ منحنی رفتار بتن با معادله حالت پی-آلفا آورده شده است.

جدول ۴. مشخصات پارامترهای معادله حالت خاک در اتوداین [۱۷]

Table. 4. The parameters of the equation of state of the soil in Autodyn

چگالی (gr/cm ³)	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	ρ_7	ρ_8	ρ_9	ρ_{10}
	۱/۶۷	۱/۷۴	۱/۸۷	۲	۲/۱۴	۲/۲۵	۲/۳۸	۲/۴۸	۲/۵۸	۲/۶۷
فشار (MPa)	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}
	۰	۴/۶	۱۵	۲۹/۱۵	۵۹/۱۷	۹۸/۱	۱۷۹/۴۴	۲۸۹/۴۴	۴۵۰/۲	۶۵۰/۶۶
چگالی (gr/cm ³)	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	ρ_7	ρ_8	ρ_9	ρ_{10}
	۱/۶۷	۱/۷۴	۲/۱	۲/۱۴	۲/۳	۲/۵۷	۲/۶	۲/۶۳	۲/۶۴	۲/۸
سرعت صوت (m/ms)	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}
	۰/۲۶	۰/۸۵	۱/۷۲	۱/۸۷	۲/۲۶	۲/۹۶	۳/۱۱	۴/۶	۴/۶۳	۴/۶۳

جدول ۵. مشخصات پارامترهای مدل مقاومتی خاک در اتوداین [۱۵]

Table. 5. Soil resistance parameters in Autodyn

فشار (MPa)	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}
	۰	۳/۴	۳۴/۹	۱۰۱/۳۲	۱۸۴/۶۴	۵۰۰	۰	۰	۰	۰
تنش تسلیم (MPa)	σ_{y1}	σ_{y2}	σ_{y3}	σ_{y4}	σ_{y5}	σ_{y6}	σ_{y7}	σ_{y8}	σ_{y9}	σ_{y10}
	۰	۴/۲۳	۴۴/۶۹	۱۲۴/۰۳	۲۲۶	۲۲۶	۰	۰	۰	۰
چگالی (gr/cm ³)	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	ρ_7	ρ_8	ρ_9	ρ_{10}
	۱/۶۷	۱/۷۴	۲/۱	۲/۱۴	۲/۳	۲/۵۷	۲/۶	۲/۶۳	۲/۶۴	۲/۸
مدول برشی (m/ms)	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6	G_7	G_8	G_9	G_{10}
	۷۶/۹	۸۶۹/۴	۴۰۳۱/۷	۴۹۰۶/۹	۷۷۶۹	۱۴۸۰۱	۱۶۵۷۱	۳۶۷۱۸	۳۷۳۴۷	۳۷۳۴۷

قرار دارد. مرحله بعدی مربوط به آغاز نرم‌شدگی است. در مرحله نرم‌شدگی مقاومت و فشار روند کاهشی خواهند داشت تا به سطح مقاومت باقیمانده برسند [۱۸]. مشخصات پوشش بتنی سازه مدل‌سازی شده در جداول ۶ و ۷ آمده است.

۳-۴- مدل‌سازی مسلح‌کننده

مسلح‌کننده‌ها از جنس فولاد است که برای تعریف آن در کتابخانه نرم‌افزار اتوداین از ماده Steel4340 با معادله حالت خطی و مدل مقاومتی جانسون-کوک با در نظر گرفتن شکست ناشی از کرنش پلاستیک استفاده شده است. در جدول ۸ پارامترهای مدل‌سازی مسلح‌کننده‌ها مشخص شده است.

شکل ۹ نمایشی از این مدل بوده و نمودارهای مختلف مربوط به رفتار غیرخطی بتن شامل سطوح نرم‌شدگی و ترک، سطوح تغییر شکل الاستیک و نیز سطح شکست را ارائه می‌دهد. مطابق شکل تنش تسلیم در برابر فشار ارائه شده است که در آن فشار به صورت میانگین حاصل از سه تنش اصلی تعریف می‌گردد. هنگامی که عضو در معرض یک فشار خطی (خط ۱ و ۲) باشد، ابتدا کرنش همراه با تنش افزایش می‌یابد. این وضعیت بیان‌کننده رابطه الاستیک بین تنش و کرنش بوده و شیب خطوط متناظر با مدول الاستیسیته ادامه پیدا می‌کند تا به مرز حد الاستیک برسد. مرحله بعدی فاز سخت‌شدگی نامیده می‌شود. در این مرحله شیب خطوط به کمک پارامتر مدول برشی الاستیک و پلاستیک تعیین می‌گردد و رفتار غیرخطی به صورت یک رفتار خطی تقریب زده می‌شود. سطح شکست در پایان همین مرحله

جدول ۶. پارامترهای معادله حالت پی-آلفا برای پوشش بتنی سازه [۱۷]

Table. 6. Parameters of the P-Alpha Equation for Concrete in Autodyn

چگالی تخلخل (kg/m ³)	چگالی مرجع (kg/m ³)	سرعت صوت (m/ms)	فشار اولیه (Mpa)	فشار تراکم (Mpa)	توان تراکم	پارامتر A ₁ (Mpa)	پارامتر A ₂ (Mpa)	پارامتر A ₃ (Mpa)	پارامتر B ₀ , B ₁ (Mpa)
۲۳۱۴	۲۷۵۰۰	۲/۹۲	۲۳/۳	۶۰۰۰	۳	۳۵۲۷۰	۳۹۵۸۰	۹۰۴۰	۱/۲۲

جدول ۷. پارامترهای مدل مقاومتی RHT-Concrete برای پوشش بتنی سازه [۱۷]

Table. 7. Parameters of the RHT-Concrete Resistance Model for Concrete in Autodyn

مدول برشی (Mpa)	مقاومت فشاری (Mpa)	f _t /f _c	f _s /f _c	پارامتر A	پارامتر N	پارامتر Q	شکل پذیری
۱۶۷۰۰	۳۵	۰/۱	۰/۱۸	۱/۶	۰/۶۱	۰/۶۸	۰/۱
کرنش نهایی	F _e /f _c	F _e /f _c	پارامتر B	پارامتر M	توان نرخ کرنش فشاری	توان نرخ کرنش کششی	Ge/Gp
۰/۰۰۱	۰/۷	۰/۵۳	۱/۶	۰/۶۱	۰/۰۳۲	۰/۰۳۶	۲

جدول ۸. پارامترهای معادله حالت و مقاومت ماده مسلح کننده در اتوداین [۱۷]

Table. 8. Parameters of the state equation and the model of the reinforcing material in Autodyn

مدول بالک (Mpa)	چگالی مرجع (kg/m ³)	مدول برشی (Mpa)	تنش تسلیم (Mpa)	ثابت سختی	توان سخت شدگی	ثابت نرخ کرنش	توان نرم شدگی	نرخ کرنش مرجع	نوع
۱۵۹۰۰۰	۷۸۳۰	۸۱۸۰۰	۷۹۲	۵۱۰	۰/۲۶	۰/۰۱۴	۱/۰۳	۱	STEEL4340

در معادله ۸ ω , R_1 , R_2 , A , B , R_1 , R_2 , ω ثوابت مصالح و (ρ_0) چگالی اولیه ماده منفجره و (ρ) چگالی ناشی از محصولات انفجار است و نسبت آن‌ها در اینجا برابر یک در نظر گرفته می‌شود. (E_{m0}) نیز انرژی اولیه ماده منفجره است. پارامترهای مدل سازی ماده منفجره در جدول ۹ آمده است.

۳-۵- مدل سازی ماده منفجره

برای مدل سازی ماده منفجره از خرج انفجاری TNT با معادله حالت JWL استفاده شده است. رابطه ۸ معادله حالت جونز-ویکنزلی (JWL) نامیده می‌شود که به صورت گسترده برای محاسبه فشار ناشی از یک انفجار کامل در هیدروکدها و مدل سازی‌ها به کار برده می‌شود [۱۷].

$$P = A \left(1 - \frac{\omega \rho}{R_1 \rho_0} \right) \times e^{\left(-\frac{R_1 \rho_0}{\rho} \right)} + B \left(1 - \frac{\omega \rho}{R_2 \rho_0} \right) \times e^{\left(-\frac{R_2 \rho_0}{\rho} \right)} + \left(\frac{\omega \rho^2}{\rho_0} \right) E_{m0} \quad (\lambda)$$

جدول ۹. پارامترهای مدل سازی ماده منفجره [۱۷]

Table. 9. Modeling parameters of explosives

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	۳۷۳۷۷۰

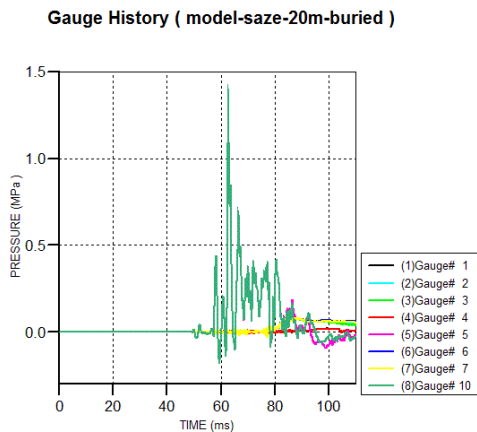
۴- صحت سنجی

در این بخش، به منظور بررسی صحت نتایج عددی حاصل از اتوداین، مقادیر حداکثر فشار و سرعت لحظه‌ای ثبت شده توسط سنجه‌ها در نرم‌افزار با نتایج آئین نامه (TM5-855-1) و نیز نتایج روابط اسمیت و همکاران مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۱- صحت‌سنجی فشار وارد بر پوشش بتنی سازه

در شکل ۱۰ نمونه‌ای از خروجی نرم‌افزار اتوداین برای فشار وارد بر پوشش سازه زیرزمینی بتن مسلح در عمق ۲۰ متری زمین را نشان داده شده‌است. با استفاده از چهار مدل عددی، مقادیر حداکثر فشار وارده بر سازه در اعماق ۱۰ تا ۴۰ متری زمین تحت اثر وزن خرج ۵۰۰ کیلوگرم از ماده منفجره TNT با عمق دفن ۶ متری توسط نرم‌افزار اتوداین تعیین گردید و نتایج حاصل در جدول ۱۰ آمده است.

مقایسه بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و نتایج روابط اسمیت و آئین نامه (TM5-855-1) نشان دهنده آن است که تطابق میان نتایج همراه با افزایش عمق افزایش می‌یابد. نمودار شکل ۱۱ بر حسب نتایج هر سه روش ترسیم شده‌است.



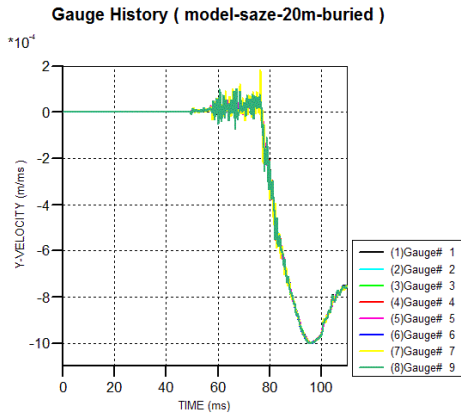
شکل ۱۰. نتیجه عددی فشار وارد بر سازه زیرزمینی بتن مسلح در عمق ۲۰ متری زمین تحت اثر انفجار مدفون ۵۰۰ کیلوگرم TNT

Fig. 10. The results of the explosion pressure on the underground structure modeling under the buried explosion for 500 kg TNT in 20m

جدول ۱۰. نتایج حداکثر فشار تحت انفجار مدفون به روش عددی، آئین‌نامه (TM5-855-1) و اسمیت با خرج ۵۰۰ کیلوگرم TNT

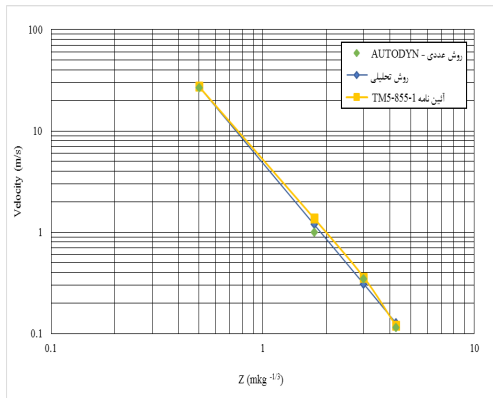
Table. 10. The maximum buried explosion pressure results in simulation, TM5-855-1 and Smith method for 500 kg TNT

حداکثر مقدار فشار P ₀ (MPa)			C (m/s)	ضریب جفت‌شدگی (f)	فاصله مقیاس شده Z (m/kg ^{1/3})	فاصله محل انفجار تا سازه R (m)	عمق نفوذ خرج d (m)	ارتفاع روباره خاکی سازه H (m)	وزن خرج W(kg)	مدل شبیه‌سازی شده
روش عددی	روش اسمیت	پیش‌بینی TM5-855-1								
۲۶	۴۸/۴	۲۸	۶۹۷/۳۶		۰/۵	۴		۱۰		۱
۱/۴۵	۱/۵۶	۱/۵	۴۹۶/۰۴	۱	۱/۷۵	۱۴	۶	۲۰	۵۰۰	۲
۰/۳۷	۰/۳۸	۰/۳۵	۴۸۹/۸۵		۳	۲۴		۳۰		۳
۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۱۵	۴۸۸/۵۸		۴/۲۵	۳۴		۴۰		۴



شکل ۱۲. نتیجه عددی (PPV) وارد بر سازه زیرزمینی بتن مسلح در عمق ۲۰ متری زمین تحت اثر انفجار مدفون ۵۰۰ کیلوگرم TNT

Fig. 12. The pick particle velocity results in simulation, TM5-855-1 and Smith method for 500 kg TNT in 20m



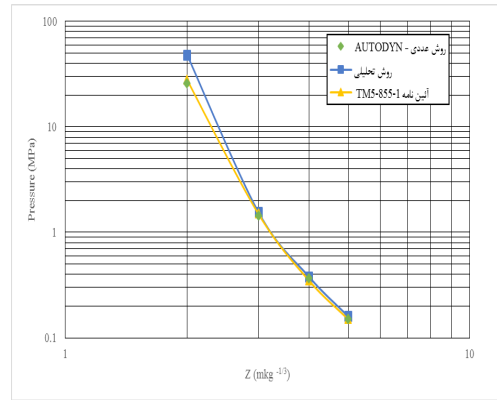
شکل ۱۳. مقایسه (PPV) به روش عددی، اسمیت و تجربی آئین نامه (TM5-855-1) برای انفجار مدفون با خرج ۵۰۰ کیلوگرم TNT

Fig. 13. The pick particle velocity results in simulation, TM5-855-1 and Smith method for 500 kg TNT

جدول (۱). نتایج (PPV) وارد بر سازه تحت انفجار مدفون به روش عددی، آئین نامه و اسمیت با خرج ۵۰۰ کیلوگرم TNT

Table. 11. The pick particle velocity results in simulation, TM5-855-1 and Smith method for 500 kg TNT

حداکثر مقدار سرعت ذره‌ای PPV (m/s)			فاصله مقیاس شده Z (m/kg ^{1/3})	فاصله محل انفجار تا سازه R (m)	وزن خرج W(kg)	نوع انفجار	شماره مدل شبه‌سازی شده
روش عددی	روش اسمیت	پیش‌بینی TM5-855-1					
۲۶/۷	۲۷/۳۸	۲۷/۴۳	۰/۵	۴	۵۰۰	مدفون	۱
۱	۱/۲	۱/۳	۱/۷۵	۱۴			۲
۰/۳۵	۰/۳۱	۰/۳۶	۳	۲۴			۳
۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۴	۴/۲۵	۳۴			۴



شکل ۱۱. مقایسه حداکثر فشار به روش عددی، اسمیت و تجربی آئین نامه (TM5-855-1) برای انفجار مدفون با خرج ۵۰۰ کیلوگرم TNT

Fig. 11. The maximum buried explosion pressure results in simulation, TM5-855-1 and Smith method for 500 kg TNT

۴-۲- صحت سنجی بیشینه سرعت ذره‌ای (PPV) جهت بررسی صحت نتایج عددی، مقادیر سرعت ذره‌ای امواج وارد بر سازه بتن مسلح در اعماق ۱۰ تا ۴۰ متری زمین تحت اثر انفجار وزن خرج ۵۰۰ کیلوگرمی از ماده منفجره TNT با عمق نفوذ ۶ متری توسط چهار مدل عددی در نرم‌افزار اتوداین بررسی گردید. در جدول ۱۱ نتایج حاصل از بررسی عددی و مقایسه آن‌ها با منابع تحلیلی و تجربی آمده‌است. همچنین شکل ۱۲ نمونه‌ای از سرعت ذره‌ای وارد بر پوشش بتنی سازه در مدل عددی مربوط به عمق متری زمین است. بررسی بیشینه تغییرات سرعت ذره‌ای در راستای قائم نشان می‌دهد، همراه با افزایش عمق دفن سازه میان نتایج به دست آمده از روش عددی و نیز نتایج روابط آئین نامه و اسمیت تطابق وجود دارد که در نمودار نتایج در شکل ۱۳ نشان داده شده‌است.

۵- شبیه‌سازی و تحلیل عددی

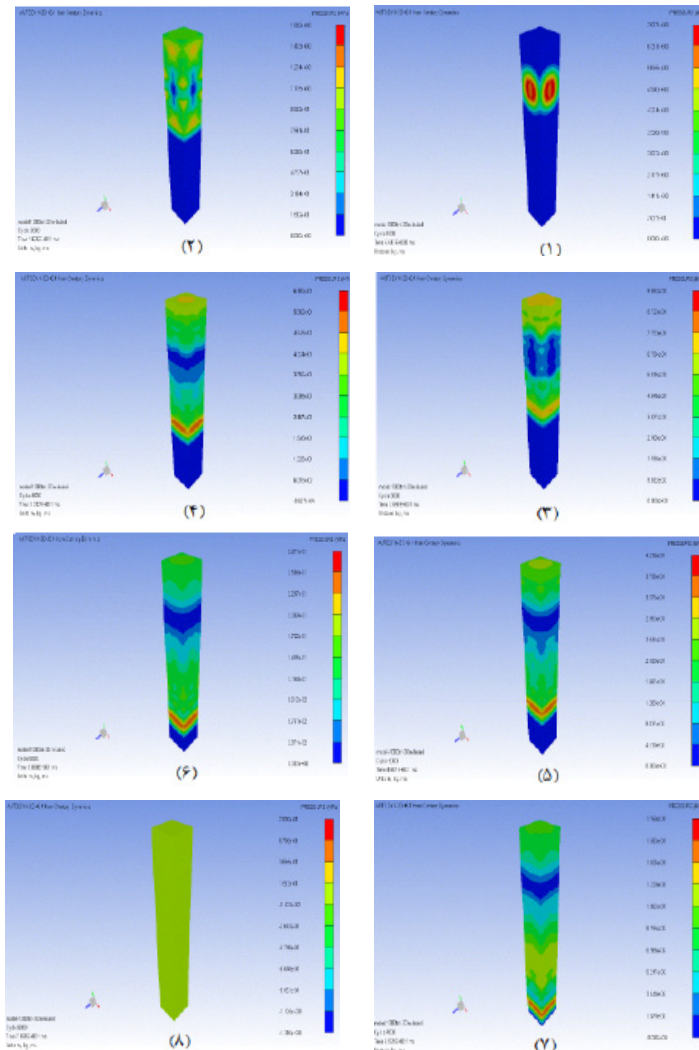
۵-۱- بررسی عددی اثر انفجار روی سازه زیرزمینی بتن مسلح شبیه‌سازی شده

تغییرات فشار محیط اطراف سازه زیرزمینی بتن مسلح در شکل ۱۴ نشان داده شده‌است. این شکل شامل تصاویری از مراحل انفجار و اثر آن بر روی سازه زیرزمینی شبیه‌سازی شده با گذشت زمان در نرم‌افزار اتوداین است. با توجه به شکل مشاهده می‌گردد که هم‌زمان با آغاز انفجار در موج شوک حاصل از انفجار ماده منفجره به صورت امواج کروی در محیط اطراف پراکنده گردیده و در راستای عمودی به سمت سطح زمین و نیز لایه‌های درونی خاک منتقل می‌گردد.

۵-۲- بررسی بارگذاری عددی

در این بخش با استفاده از نتایج حاصل از سنجه‌هایی که در مدل‌های عددی بر روی سقف و دیوارهای خارجی سازه قرار گرفته‌اند، بار وارده بر

سازه زیرزمینی مدنظر تحت اثر انفجار مدفون بررسی می‌شود. برای این منظور نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی، در اعماق ۱۰ تا ۴۰ متری زمین و با عمق نفوذ خرج انفجاری ثابت ۶ متری به وزن ۵۰۰ کیلوگرم از ماده منفجره TNT با نتایج حاصل از آئین‌نامه (TM5-855-1) امریکا مقایسه می‌گردد. نتایج حاصل از روش عددی مربوط به المانی از سازه می‌باشد که در آن سقف و دیوارها بیشترین مقادیر بار را دریافت می‌کنند. بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی سازه در اعماق مختلف نشان می‌دهد، مقطعی از سازه که شامل نقطه مرکز سطح سقف سازه و دیوارهای کناری آن می‌باشد، بیشترین مقدار بار را توسط سنجه‌های تعبیه‌شده در مدل عددی دریافت می‌نمایند. از این رو این المان در تمامی اعماق با توجه به شرایط بحرانی اعمال بار در نتایج در نظر گرفته شده‌است. در جدول ۱۲ نیز نتایج بار معادل حاصل از میانگین بارهای وارده بر طول وجوه سازه در هر سانتی متر مربع به هر دو روش عددی و آئین‌نامه آمده است.



شکل ۱۴. تغییرات فشار خاک مدل شبیه‌سازی شده از سازه زیرزمینی بتن مسلح تحت انفجار مدفون در زمان‌های مختلف در اتوداین

Fig. 14. The pressure Counter of modeling underground structures in Autodyn

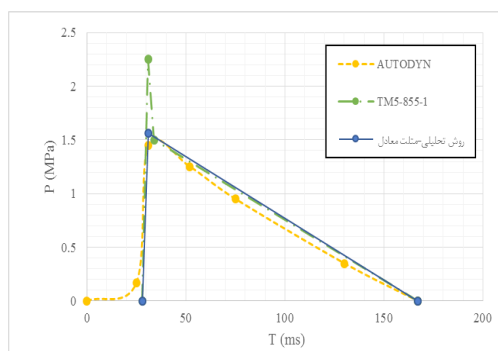
جدول ۱۲. مقایسه نتایج اعمال بارگذاری سازه زیرزمینی تحت انفجار مدفون با خرج ۵۰۰ کیلوگرم TNT

Table. 12. Loading of underground structures in buried explosion with 500 kg TNT

بارگذاری TM5-855-1			بارگذاری عددی AUTODYN			فاصله سازه تا خرج R (m)	نوع انفجار	وزن خرج W(kg)	مورد محاسباتی
آئین نامه K	بار وجوه (N)	اعمال ضریب افزایشی ۱/۵ برابری آئین نامه	بار سقف (N)	K عددی	بار وجوه (N)				
۰/۶۳	۱۷۷۲	۴۲۰۰	۲۸۰۰	۰/۶۱	۱۶۰۰	۲۶۰۰	۶	مدفون ۵۰۰	۱
۰/۶۷	۱۰۰	۲۲۵	۱۵۰	۰/۶۴	۹۴	۱۴۵	۱۴		۲
۰/۷۸	۲۷/۵	۵۲	۳۵	۰/۷۱	۲۵/۹	۳۶/۵	۲۴		۳
۰/۸۴	۱۲/۶	۲۲	۱۵	۰/۷۸	۱۱/۹	۱۵/۲	۳۴		۴

۵-۳- بررسی تاریخیچه زمانی بار سقف سازه
نتایج تاریخیچه زمانی بار وارده به ازای هر سانتی متر مربع از پوشش
بتنی سقف سازه زیرزمینی در اعماق ۱۰ تا ۴۰ متری با توجه به روش‌های
عددی و مثلث معادل و نیز آئین نامه امریکا در جدول ۱۳ آمده است. همچنین
در شکل ۱۶ به صورت نمونه نمودار مقایسه‌ای میان نتایج به دست آمده
به روش‌های بیان شده، برای سازه زیرزمینی در عمق ۲۰ متری ترسیم
شده است.

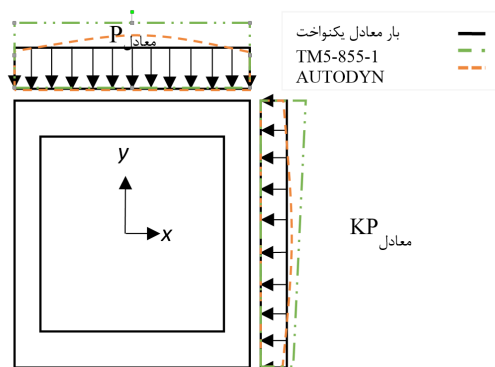
با توجه به شکل و جدول ۱۳ می‌توان مشاهده نمود که مقادیر بار
اعمال شده به سازه زیرزمینی تحت انفجار مدفون با افزایش عمق کاهش
می‌یابد. همچنین نتایج آئین نامه بدون اعمال ضریب ۱/۵ برابری بیان شده
برای طراحی سازه‌های زیرزمینی، محافظه کارانه می‌باشد. به همین دلیل
پیشنهاد می‌گردد در طراحی‌ها این ضریب افزایشی در محاسبه بار وارد به
سازه زیرزمینی اعمال نگردد.



شکل ۱۶. تاریخیچه زمانی بار سقف سازه زیرزمینی در عمق ۲۰ متر تحت انفجار مدفون به روش مثلث معادل اسمیت عددی و آئین نامه (TM5-855-1)

Fig. 16. The time history of the underground structure roof loading with Smith equivalence triangle method, TM5-855-1 and numerical simulation

از نتایج جدول ۱۲ مشاهده می‌گردد که مقادیر آئین نامه نسبت به روش عددی بزرگ‌تر بوده و با افزایش عمق دفن سازه با یکدیگر تطابق پیدا می‌کنند. در شکل ۱۵ بارگذاری وارد بر یک المان از سازه زیرزمینی بتن مسلح مورد مطالعه با توجه به نتایج جدول ۱۲ به سه روش بار معادل یکنواخت حاصل از میانگین بارهای اعمال شده و روش‌های عددی و آئین نامه به صورت شماتیک ترسیم شده است.



شکل ۱۵. مقایسه بارگذاری سازه زیرزمینی بتن مسلح به روش عددی و آئین نامه (TM5-855-1)

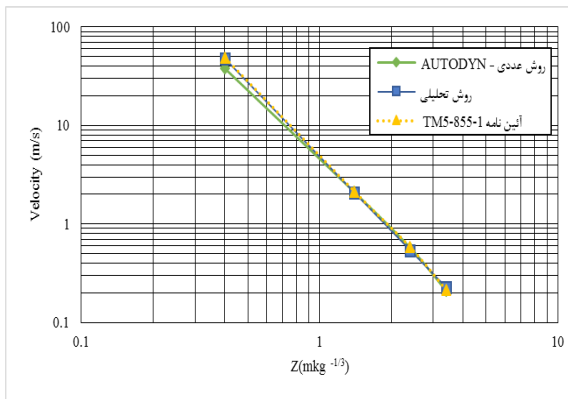
Fig. 15. The explosion Loading Method of underground structures in Tm5-855-1 and Numerical Simulation

با توجه به شکل ۱۵ به وضوح می‌توان مشاهده نمود که نتایج آئین نامه برای بار اعمالی به سازه، محافظه کارانه می‌باشد. همچنین آنکه در مدل سازی عددی بار وارد بر نقاط میانی سقف و دیوارهای کناری سازه نسبت به نتایج بار معادل یکنواخت مقادیر بزرگ‌تری را شامل می‌شود.

جدول ۱۳. نتایج تاریخچه زمانی بارگذاری سقف سازه زیرزمینی تحت انفجار با خرج ۵۰۰ کیلوگرم TNT

Table. 13. The results of buried explosion Loading of underground structures roof with 500 kg TNT

بارگذاری سقف (N)										
شماره مدل	وزن خرج (kg)	نوع انفجار	فاصله سازه تا خرج R (m)	زمان رسیدن	زمان	زمان	روش TM5-855-1		شماره مدل	
				به فشار حداکثر t_0 (ms)	تداوم فشار برخوردی t_f (ms)	تداوم انفجار t_d (ms)	روش عددی AUTODYN	فشار حداکثر P_0 (MPa)		
۱			۶	۱۲	۱۳	۱۴	۲۶۰۰	۴۲۰۰	۲۸	۴۸۴۰۰
۲	۵۰۰	مدفون	۱۴	۲۸	۳۱	۳۴	۱۴۵۰	۲۲۵۰	۱/۵	۱۵۶۰
۳			۲۴	۴۹	۵۴	۵۹	۳۰۳	۳۶۵	۰/۳۵	۳۸۰
۴			۳۴	۶۹	۷۶	۸۳	۴۳۷	۱۵۲	۰/۱۵	۱۶۰



شکل ۱۸. مقایسه نتایج (PPV) به روش عددی، تحلیلی اسمیت و تجربی آئین نامه (TM5-855-1) تحت انفجار مدفون ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT

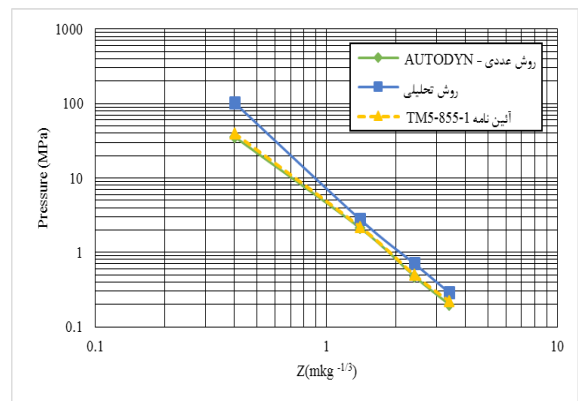
Fig. 18. The pick particle velocity of buried explosion of underground structures by numerical simulation, Smith, TM5-855-1 with 1000 kg TNT

در اشکال فوق می‌توان مشاهده نمود که با افزایش وزن خرج مقادیر فشار به روش اسمیت نسبت به حالت قبل مقادیر بیشتری نسبت به دو روش دیگر به دست داد ولی در مورد سرعت ذره‌ای با افزایش وزن خرج، مقادیر هر سه روش تطابق دارند.

در شکل ۱۹ نیز نمونه‌ای از تاریخچه زمانی بار تحت انفجار خرج ۱۰۰۰ کیلوگرمی را نشان داده شده‌است. با توجه به شکل مشاهده می‌گردد که در این حالت بار وارده افزایش یافته، هم‌چنین نتایج مربوط به بار مثلث معادل و آئین نامه (TM5-855-1) آمریکا با یکدیگر تطابق بیشتری داشته ولی نتایج عددی همانند نتایج قسمت قبل محافظه کارانه می‌باشد.

۵-۴- بررسی اثر تغییرات وزن خرج انفجاری

در ادامه پژوهش صورت گرفته، به منظور بررسی اثر وزن خرج انفجاری، کلیه مراحل قبلی با افزایش وزن خرج انجام گرفت. به این ترتیب سازه زیرزمینی تحت اثر انفجار ماده منفجره TNT با وزن ۱۰۰۰ کیلوگرم در اعماق ۱۰ تا ۴۰ متری مدل‌سازی گردید. در ادامه مقادیر فشار، سرعت ذره‌ای و بار وارده به سقف در این حالت مورد بررسی قرار گرفت. اشکال ۱۷ و ۱۸ اثر این افزایش وزن خرج را بر روی نتایج نشان می‌دهد.



شکل ۱۷. مقایسه حداکثر فشار به روش عددی، تحلیلی اسمیت و تجربی آئین نامه (TM5-855-1) تحت انفجار مدفون ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT

Fig. 17. The Maximum of buried explosion pressure of underground structures by numerical simulation, Smith, TM5-855-1 with 1000 kg TNT

۶- نتیجه گیری

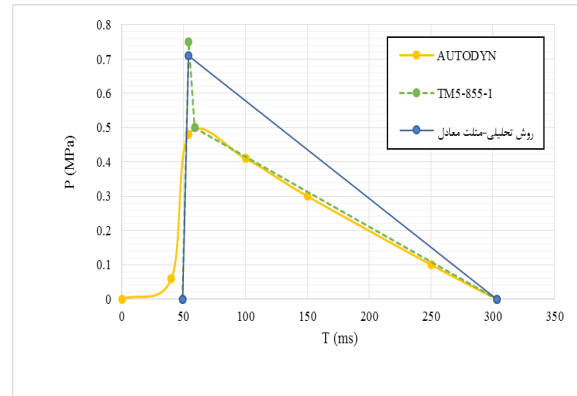
در این پژوهش اثرات انفجار مدفون بر روی سازه زیرزمینی بتن مسلح با استفاده از هیدروکد توانمند اتوداین و روش های تحلیلی مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، با استفاده از شبیه سازی عددی اثر پارامتری وزن خرج انفجاری بر مقادیر شوک زمینی، فشار موج انفجار، بیشینه سرعت ذرات خاک و بار وارد بر پوشش بتنی سازه زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین نتایج عددی با نمودارهای تجربی ارائه شده در آیین نامه (TM5-855-1) آمریکا و نیز روابط تحلیلی اسمیت و همکارانش مقایسه شد. از مجموع مباحث مطرح شده می توان نتایج زیر را بیان نمود:

- با توجه به بررسی پارامتری نتایج عددی با نتایج تحلیلی و آیین نامه مشاهده می گردد که هیدروکد استفاده شده در تحلیل و بررسی پدیده انفجار در سازه های زیرزمینی نتایج قابل قبولی به دست می دهد.
- با توجه به نتایج حاصل برای سازه زیرزمینی تحت بارگذاری انفجاری روش های عددی و تحلیلی و نیز نتایج حاصل از گراف های تجربی (TM5-855-1) با افزایش عمق دفن سازه با یکدیگر تطابق خوبی دارند.

- بررسی تأثیر وزن خرج بر روی پاسخ سازه زیرزمینی در اعماق مختلف، تحت انفجار مدفون نشان می دهد که با افزایش وزن خرج انفجاری برای سازه، مقادیر حداکثر فشار روی سازه و نیز (PPV) در هر سه روش حل عددی و تجربی و تحلیلی افزایش می یابد.

- با توجه به بررسی عددی صورت گرفته، از میان سنجه های نصب شده در روی سازه زیرزمینی بیشترین مقادیر توسط سنجه هایی که در مرکز سطح سقف سازه قرار داشتند ثبت گردید. همچنین پس از مرکز سقف، نقاط مربوط به رئوس سقف و دیوارها بیشترین تأثیر را از انفجار دریافت می نماید.

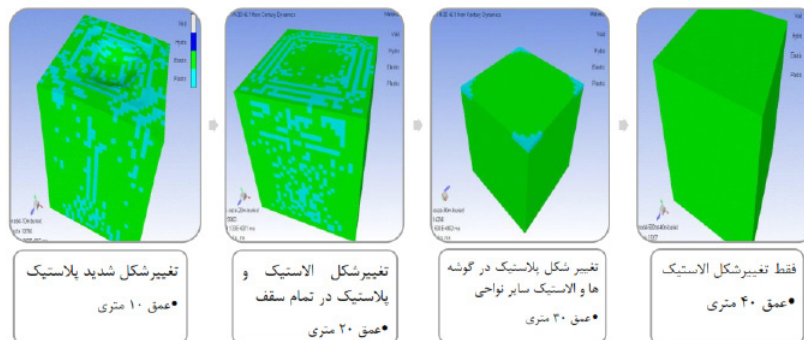
- با توجه به نتایج به دست آمده در رابطه با بار وارده بر روی سقف سازه مشاهده شد که مقادیر آیین نامه نسبت به دو روش دیگر محافظه کارانه بوده و به همین دلیل پیشنهاد می گردد در طراحی های مطابق با دستور العمل (TM5-855-1) آمریکا ضریب افزایشی ۱/۵ برای بار وارده بر سازه اعمال نگردد.



شکل ۱۹. تاریخچه زمانی بار سقف سازه زیرزمینی در عمق ۲۰ متر تحت انفجار مدفون ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT به روش مثلث معادل اسمیت و آیین نامه (TM5-855-1)

Fig. 19. The explosion Loading Method of underground structures in Tm5-855-1 and Numerical Simulation with 1000 kg TNT

۵-۵- بررسی آسیب وارد بر سازه ناشی از انفجار
شکل ۲۰ اثر رسیدن امواج شوک انفجار مدفون و آسیب حاصل از آن را بر روی سازه زیرزمینی بتن مسلح در اعماق ۱۰ تا ۴۰ متری زمین نشان می دهد. با توجه به شکل، سازه در عمق ۱۰ متری دچار آسیب بسیار زیادی در مرکز سطح خود شده است. هم زمان با افزایش عمق از میزان آسیب کاسته و خرابی در سطح پراکنده و به سمت رئوس منتقل شده است، به طوری که در عمق ۴۰ متری آسیب چندانی به سقف سازه وارد نشده است. با توجه به نتایج به دست آمده می توان این عمق را به عنوان عمق ایمن برای این سازه زیرزمینی مورد مطالعه با توجه به وزن خرج به کار رفته بیان نمود



شکل ۲۰. میزان آسیب سقف سازه شبیه سازی شده در اتوداین تحت انفجار مدفون با خرج ۵۰۰ کیلوگرم TNT در اعماق ۱۰ تا ۴۰ متری

Fig. 20. The underground structure is modeled roof damage by 500 kg TNT in (10-40)m

علائم انگلیسی

P_o	بیشینه فشار (MPa)
u_o	بیشینه سرعت ذره‌ای (m/s)
C	سرعت انتشار موج انفجار در خاک (m/s)
c	سرعت لرزه‌ای (m/s)
R	فاصله از مرکز انفجار (m)
d	عمق نفوذ خرج انفجاری (m)
W	وزن ماده منفجره (kg)
f	ضریب جفت شدگی (نمودار مرجع)
n	ضریب تضعیف خاک (نوع خاک)
E	مدول الاستیسیته (N/m^2)
t_a	زمان رسیدن موج انفجار به سازه (s)
t_o	زمان رسیدن به بیشینه فشار (s)
t_d	زمان تداوم انفجار (s)

علائم یونانی

ρ	چگالی (kg/m^3)
--------	--------------------

مراجع

- [6] B. Luccioni, D. Ambrosini, R. Danesi, Blast load assessment using hydrocodes, *Engineering Structures*, 28.12 (2006) 1736-1744.
- [7] J. Henrych, R. Major, *The dynamics of explosion and its use*, Elsevier Amsterdam, 1979.
- [8] J. Borgers, J. Vantomme, Towards a parametric model of a planar blast wave created with detonating cord, in: 19th International Symposium on the Military Aspects of Blast and Shock, Calgary, Canada, 2006.
- [9] Lucksony, Numerical Results-Based Review of the Hole Created by the Explosion in the Soil, *Impact engineering*, 35.12 (2008) 17-24.
- [10] Anirban, The Tunnel in Soil Subjected to Blast Load Using 2D and 3D Numerical Simulations, *Structure and Infrastructure Engineering*, 18.3 (2011) 917-924.
- [11] Y. Yang, X. Xie, R. Wang, Numerical simulation of dynamic response of operating metro tunnel induced by ground explosion, *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering*, 2.4 (2010) 373-384.
- [12] S. Mazek, H. Almannaei, Finite element model of Cairo metro tunnel-Line 3 performance, *Ain Shams Engineering Journal*, 4.4 (2013) 709-716.
- [13] R. Tiwari, T. Chakraborty, V. Matsagar, Dynamic analysis of underground tunnels subjected to internal blast loading, in: *World Congress of Computational Mechanics (WCCM XI)*, Barcelona, 2014.
- [14] A. Gholizad, M. Rajabi, Buried concrete structure under blast loading, *ADST Journal*, 4.3 (2014) 167-179. (In Persian)
- [15] R. Pezhman, B. Hadi, Analyzing the impact of the explosion on the surface of concrete tanks buried, 4th International Congress of Civil Engineering, Architecture and Urban Development, 2017.
- [16] B. Pandurangan, Development, parameterization and validation of dynamic material models for soil and transparent armor glass, (2009).
- [17] I. ANSYS, ANSYS Autodyn User's Manual, USA.
- [18] R. Rempling, Concrete wall subjected to fragment impacts-Numerical analyses of perforation and scabbing, (2004).
- [1] P. Smith, J. Hetherington, *Blast and ballistic loading of structures* Butterworth, in: Heinemann Ltd, 1994.
- [2] P.S. Bulson, *Explosive Loading of Engineering Structures*, 1 edition ed., CRC Press, London ; New York, 1997.
- [3] TM5-855-1, *Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapon*, in: Department of U.S Army Security Engineering, Washington, DC.
- [4] Taghavi Parsa, M.H. Analysis of the Effects of Surface and Buried Explosions on Underground Structures by Using Numerical Simulation and Semi-Analytical Methods, MS Thesis, Imam Hossein University, Tehran, Iran, 2016. (In Persian)
- [5] J.K. Clutter, M. Stahl, Hydrocode simulations of air and water shocks for facility vulnerability assessments, *Journal of hazardous materials*, 106(1) (2004) 9-24.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. H. Taghavi Parsa, S. Peyman, Analysis of the Effect of Buried Explosive Loading on Underground Reinforced Concrete Structures, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(1) (2019) 3-18.

DOI: 10.22060/ceej.2018.12858.5288



