

تحلیل و بررسی بار ناشی از انفجار سطحی روی سازه زیرزمینی

محمدحسین تقوی پارسا^۱، صفا پیمان^{۲*}

۱ - دکتری سازه، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، گروه عمران،

۲ - استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، گروه عمران،

mh.taghavi@stu.qom.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۸/۲/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۸/۹/۱۴

چکیده

پدیده انفجار از نوع مسائل با نرخ کرنش بالا است که برای حل آن نیاز به تحلیل دینامیکی هست. همچنین با توجه به اندرکنش بین سازه‌های زیرزمینی و خاک تحلیل این سازه‌ها تحت اثر هر نوع بار از نوع تحلیل غیرخطی است. به این ترتیب تحلیل سازه‌های زیرزمینی تحت اثر انفجار از نوع مسائل با نرخ کرنش بالا است که برای حل آن نیاز به تحلیل دینامیکی غیرخطی می‌باشد. دو روش حل ضمنی و صریح برای تحلیل دینامیکی وجود دارد که با توجه به شرایط مسائل انفجار تحلیل آنها به صورت حل انتگرالی صریح است. روش‌های شبیه‌سازی عددی به عنوان یک روش نوین در محاسبه بارهای دینامیکی غیرخطی کاربرد وسیعی یافته‌اند. بر اساس نتایج پژوهشگران از میان نرم‌افزارهای صریح موجود نرم‌افزار اتوداین به دلیل قدرت زیاد در حل مسائل با نرخ کرنش بسیار بالا نتایج مناسبی از شبیه‌سازی و تحلیل مسائل انفجار به دست می‌دهد. از طرفی بارگذاری انفجاری سازه‌های زیرزمینی غالباً بر اساس رابطه‌های حاصل از پژوهش‌های نظری و تجربی انجام می‌شود. در این پژوهش از روش شبیه‌سازی عددی برای تحلیل و شبیه‌سازی اثر انفجار سطحی روی سازه زیرزمینی استفاده شده است. همچنین کلیه مراحل شبیه‌سازی با استفاده از هیدروکد AUTODYN انجام شده است. به منظور تحلیل چگونگی بارگذاری، پاسخ سازه زیرزمینی در اعماق متفاوت بررسی شده و نتایج عددی با روابط ارائه شده در دستورالعمل ارتش آمریکا و نیز منابع معتبر علمی مقایسه شده است. در نهایت پیشنهاداتی در راستای بهبود بارگذاری سازه‌های مذکور در طراحی‌ها ارائه شده است.

واژگان کلیدی: سازه زیرزمینی، بارگذاری انفجاری، انفجار سطحی، پارامترهای شوک زمینی، نرم‌افزار اتوداین.

۱- مقدمه

اغلب سازه‌های زیرزمینی با هدف مقاومت در برابر آثار سلاح‌های نفوذکننده دقیق و بمب‌های سنگین طراحی و در خاک احداث می‌شوند. معمولاً عمق سازه‌های مزبور زیاد است و امکان برخورد موشک به سازه اصلی وجود ندارد. بر این اساس، طراحی این سازه‌ها برای بارهای ناشی از انفجار انجام می‌گیرد.

بارگذاری سازه‌های زیرزمینی بیشتر بر اساس رابطه‌های حاصل از پژوهش‌های نظری و تجربی انجام می‌گیرد. از جمله می‌توان به پژوهش‌های آقایان اسمیت و هترینگتون [1] در اواخر دهه ۹۰ میلادی و نیز در ادامه آقای بولسون [2] اشاره نمود که پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه انفجار در خاک انجام داده‌اند. در این پژوهش نیز از نتایج پژوهش‌های آنها برای به دست آوردن پارامترهای شوک زمینی استفاده شده است.

در حال حاضر مهم‌ترین مرجع بارگذاری انفجاری در زمینه سازه‌های زیرزمینی، آئین‌نامه (TM5-855-1) امریکا است که توسط ارتش ایالات متحده امریکا ارائه شده است [۳]. همچنین آئین‌نامه انجمن مهندسين عمران امریکا (ASCE) در زمینه بارهای حاصل از انفجارهای هسته‌ای قابل دسترس برای عموم مهندسان است [4]. در این پژوهش نتایج به دست آمده از تحلیل عددی در نرم‌افزار اتوداین با روابط تجربی آئین‌نامه (TM5-855-1) مقایسه شده است.

علاوه بر روش‌های تحلیلی، به تازگی روش‌های حل عددی متنوعی با توجه به نوع سیستم سازه‌ای به کار گرفته شده است. از این رو با استفاده از هیدروکدها و نرم‌افزارهای اجزاء محدود نیز می‌توان بارهای انفجاری وارد بر این سازه‌ها را محاسبه نمود. هیدروکد به نرم‌افزار رایانه‌ای گفته می‌شود که قابلیت محاسبه تنش، کرنش و پارامترهای مربوط به امواج دینامیکی را بر حسب مکان و زمان داشته باشد [5].

مبنای اغلب روش‌های عددی در یک طراحی جامع و دقیق از سازه زیرزمینی برای دستیابی به رفتار واقع‌بینانه سازه در برابر انفجار، شبیه‌سازی پدیده انفجار در یک فرآیند چهار مرحله‌ای است. بر طبق این فرآیند یک شبیه‌سازی از سازه زیرزمینی تحت اثر انفجار شامل چهار مرحله شکل‌گیری چاله انفجاری،

انتشار موج شوک در خاک، اندرکنش خاک و سازه زیرزمینی و پاسخ دینامیکی سازه می‌شود [5].

در این راستا آقایان کلاتر و استال [6] از هیدروکد اتوداین برای مدل‌کردن موج انفجار استفاده کردند و توانستند فشار نهایی بیشینه را در برخی از نقاط سازه طراحی شده محاسبه کنند.

آمبروزینی و آذسیب [7] از مدل سه‌بعدی نرم‌افزار اتوداین برای محاسبه پارامترهای فشار نهایی استفاده کردند و توانستند نتایج فشار نهایی بیشینه را با رابطه بیان شده توسط آقای هنریچ [8] مقایسه کنند.

آقایان بورگرس و وانتومی [9] 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 همکارانش [10] برای اطمینان از درستی نتایج عددی مبنی بر حفره ایجادشده ناشی از انفجار در خاک، در آزمایشگاه یک انفجار روی سطح خاک را انجام داده و نتایج آن را با هر یک از دو مدل لاگرانژی و اویلری خود مقایسه کرده و مقدار تخریب را در سه حالت باهم مقایسه کردند.

آئیربان [11] نیز حفره به وجود آمده ناشی از انفجار بر روی سطح زمین و آثار آن روی تونل زیرزمینی را در حالت عددی، در دو حالت دوبعدی و سه‌بعدی به دست 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 روی تونل استفاده کرد. همچنین در انتها نتایج خود را با آزمایش لاکسونی [10] ارزیابی کرد.

یوبینگ یانگ با همکاری آقایان ژی و وانگ [12] ضمن بررسی نتایج یک مطالعه تجربی روی یک سازه مترو، پاسخ دینامیکی تونل زیرزمینی شبیه‌سازی شده تحت اثر انفجار را بررسی کردند. آنها با مدل سازی عددی، اثر تغییرات عمق دفن سازه تحت انفجار را مطالعه نمودند.

مازک و المنایی [13] با انجام یک مطالعه عددی روی خط

سه متروی شهر قاهره مصر، عملکرد سازه تونل مترو را در مقیاس یک دهم با استفاده از مدل دو بعدی المان محدود مدل سازی و بررسی نمودند. آنها در مطالعات عددی خود مقادیر بارهای وارده در اعماق مختلف زمین در اطراف تونل زیرزمینی را مورد بررسی قرار دادند.

رویت تیواری با همکاری چاکرابورتی و ماتساگار [14] به بررسی آنالیز دینامیکی یک تونل زیرزمینی بتن مسلح تحت اثر انفجار با استفاده از مدل سازی عددی سه بعدی و در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه پرداختند. عمده توجه آنها میزان جابه جایی سقف سازه تونل تحت اثر انفجار ماده منفجره در فواصل مختلف نسبت به سازه زیرزمینی معطوف شده بود.

بررسی های صورت گرفته نشان می دهد پژوهش های علمی در زمینه بارگذاری انفجاری سازه های زیرزمینی و چگونگی اعمال بار انفجار روی این نوع از سازه ها و عملکرد آنها کمتر مورد توجه پژوهشگران بوده است. در این پژوهش با توجه به روابط تحلیلی و تجربی موجود، با استفاده از شبیه سازی انفجار سطحی توسط نرم افزار اتوداین، ضمن بررسی پارامترهای شوک زمینی به روش عددی و مقایسه نتایج به دست آمده با روش های تحلیلی و تجربی، به مطالعه و بررسی بارگذاری سازه زیرزمینی پرداخته شده است.

۲- مبانی پژوهش

۲-۱- پارامترهای شوک زمینی

پارامترهایی شوک زمینی مانند فشار بیشینه و سرعت ذرات خاک با توجه به نتایج مطالعات اسمیت و هترینگتون به ترتیب با روابط (۱) و (۲) به دست می آیند [1]:

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

$$u = 48.8f \left(\frac{P_o}{W^{1/3}} \right) \quad (2)$$

در رابطه های بالا فشار بیشینه با (P_o) و سرعت ذره ای بیشینه با (u) نشان داده شده است. (f) ضریب جفت شدگی زمین و ماده منفجره است که میزان پیوستگی ماده منفجره با

زمین را نشان می دهد. بر اساس آئین نامه امریکا مقدار آن با توجه به نوع انفجار تعیین می شود. در یک انفجار سطحی به طور تقریبی مقدار ضریب جفت شدگی برابر با 0.4 در نظر گرفته می شود. همچنین پارامترهای (W) وزن ماده منفجره برحسب کیلوگرم و (R) فاصله از محل انفجار به متر، (C) سرعت انتشار موج انفجار برحسب متر بر ثانیه و (P) چگالی خاک برحسب کیلوگرم بر متر مکعب است. (n) ضریب تضعیف خاک است که وابسته به نوع خاک بوده و مقدار آن با استفاده از جدول (۱) به دست می آید. در این پژوهش برای ضریب تضعیف با توجه به نوع خاک که از جنس ماسه بسیار متراکم است مقدار $2/5$ در نظر گرفته شده است.

از طرفی با استفاده از آئین نامه (TM5-855-1) امریکا می توان مقادیر فشار و سرعت ذره ای بیشینه را برحسب فاصله مقیاسی و نوع خاک به وسیله نمودارهای بیشینه فشار بر حسب انواع خاک و بیشینه سرعت ذره ای برحسب انواع خاک در آئین نامه TM5-855-1 تعیین نمود [3].

۲-۲- اعمال بار ناشی از انفجار

روش های مختلفی برای اعمال بار ناشی از انفجار بر روی پوشش بتنی سازه های زیرزمینی وجود دارد. روش های موجود طراحی برای حالت با محدوده مقیاسی $(Z > 1.0)$ به کار می روند. همچنین برای حالت $(Z \leq 1.0)$ آزمایش های متعددی انجام شده است اما شدت بارگذاری در این شرایط مقاومت در برابر بارهای وارد شده را بسیار دشوار کرده است.

در آئین نامه (TM5-855-1) امریکا روش برآورد بار ناشی از انفجار وارد بر سازه، استفاده از فشار بازتابی (P_r) با فرمول تقریبی $(P_r = 1.5P_o)$ است. در این روش پس از تعیین فشار خاک در عمق مورد نظر (P_p) با استفاده از رابطه (۳) و نیز اعمال ضریب افزایشی $(1/5)$ برابری، فشار وارد شده بر دیوارهای سازه مشابه با آنچه در شکل (۱) نشان داده شده، تعیین می شود.

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

در رابطه فوق (P_p) فشار در اعماق خاک و (R) فاصله از

در این پژوهش سازه زیرزمینی در یک محیط نیمه‌متناهی فرض شده است. در نرم‌افزار اتوداین برای اعمال چنین شرایط مرزی در مدل‌های لاگرانژی از شرایط مرزی ترنس‌میت استفاده می‌شود.

۳-۲- مدل‌سازی خاک

خاک مورد مطالعه از جنس ماسه متراکم با مشخصات جدول (۱) است. برای مدل کردن خاک، معادله حالت تراکم (Compaction) مطابق رابطه (۴) استفاده شده است. در این معادله حالت (C) سرعت صوت و (P) چگالی آن است [15].

$$\frac{\partial P}{\partial \rho} = C^2(\rho) \quad (4)$$

معادله حالت تراکم تمرکز بیشتری روی بارگذاری و باربرداری مواد متخلخل دارد. در این معادله حالت سرعت صوت بر حسب دانسیته تعریف می‌شود. همچنین به کمک معادله حالت فوق در اتوداین وابستگی سرعت صوت به چگالی ماسه به کمک ده نقطه (C, P) تعریف می‌شود.

جدول ۱. مشخصات پارامترهای خاک مدل‌سازی شده

Elasticity Modulus (N/m ²)	Density (Kg/m ³)	Seismic speed c (m/s)	Poisson's Ratio (ν)	Attenuation coefficient (n)	Type
6.25×10 ⁸	2641	478.68	0.25	3.25	Dense Sand

Table 1. Properties of soil considered in model

همچنین به عنوان مدل مقاومتی برای خاک مورد مطالعه از مدل (MO-Granular) استفاده شده است. این مدل بسط مدل دراگر-پراگر است به شکلی که آثار مرتبط با مواد دانه‌ای را در نظر می‌گیرد. در این مدل اثر کار سختی، دانسیته سختی و مدول برشی متغیر در نظر گرفته می‌شوند. همچنین برای حذف المان‌های بسیار اعوجاج یافته از روش فرسایش ناگهانی نرم‌افزار استفاده شده است [16].

۳-۳- مدل‌سازی پوشش بتنی

پوشش بتنی سازه زیرزمینی در داخل نرم‌افزار اتوداین از نوع

منبع انفجار است. (f) ضریب جفت‌شدگی است. همچنین (ρC) مقاومت آکوستیک و (n) ضریب تضعیف هستند که با توجه به مشخصات خاک مورد آزمایش تعیین می‌شود [3].

شکل ۱. نمایی شماتیک از چگونگی اعمال بار به سازه زیرزمینی مطابق روش آئین‌نامه (TM5-855-1) [۳]

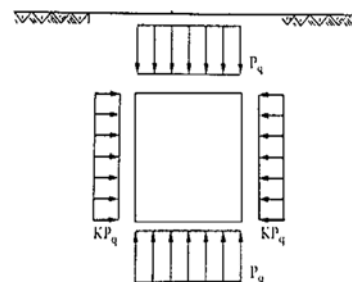


Fig.1. Schematic view of loads applied to the structure accordance with TM5-855-1

در ضمن در روابط و نمودارهای فوق q عمق مقیاسی (Z) برای یک انفجار مطابق تعریف برابر با $Z = \frac{W^{1/3}}{W^{1/3}}$ است. همانگونه که مشخص است این عمق تابعی از (d) فاصله از مرکز انفجار و (W) وزن خرج انفجار است.

۳- تحلیل عددی

۳-۱- مدل هندسی

در این پژوهش سازه زیرزمینی تحت اثر انفجار با استفاده از نرم‌افزار اتوداین و به صورت سه بعدی مدل‌سازی شده است. مدل شامل سازه زیرزمینی بتن مسلح، خاک ماسه‌ای به عنوان محیط انتشار موج انفجار و همچنین ماده منفجره از جنس TNT به صورت خرج انفجاری بدون پوشش در نظر گرفته شده است. سازه زیرزمینی 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 شده‌اند. خرج انفجاری در وزن‌های متفاوت برحسب کیلوگرم مدل‌سازی شده است.

با توجه به آنکه موج شوک ناشی از انفجار در محیط خاک منتشر شده و به سطح بیرونی سازه زیرزمینی برخورد می‌کند، برهم‌کنش سازه بتن مسلح و نیز خاک اطراف آن از نوع لاگرانژی تعریف شده است.

انرژی اولیه ماده منفجره است.

۳-۵- مدل سازی مسلح کننده

مسلح کننده‌ها از جنس فولاد می‌باشند. برای تعریف آن‌ها در کتابخانه نرم‌افزار از ماده Steel4340 با معادله حالت خطی و مدل مقاومتی جانسون-کوک با در نظر گرفتن شکست ناشی از کرنش پلاستیک استفاده شده است [14].

۴- درستی آزمایی

برای بررسی صحت نتایج به دست آمده از نرم‌افزار اتوداین، مقادیر حداکثر فشار و سرعت لحظه‌ای ثبت شده توسط سنج‌ها در اتوداین با نتایج روابط اسمیت و آئین‌نامه (TM5-855-1) مقایسه می‌شود.

۴-۱- درستی آزمایی فشار

با استفاده از مدل سازی عددی، مقادیر بیشینه فشار وارد شده بر سازه در اعماق ۱۰ تا ۴۰ متری زمین تحت اثر انفجار ۵۰۰ کیلوگرم از ماده منفجره TNT در سطح زمین قرار دارد، توسط نرم‌افزار اتوداین تعیین شده و نتایج حاصل در جدول (۲) آمده است.

جدول ۲. نتایج بیشینه فشار پوشش بتنی سازه زیرزمینی تحت اثر انفجار سطحی با خرج ۵۰۰ کیلوگرم TNT

P_o (MPa)			C (m/s)	f	Z (m/k $g^{1/3}$)	R (m)	No
Numerical	Smith	TM5- (855-1)					
2/3	1/5	3	495/43	0/4	1/25	10	1
0/37	0/25	0/4	495/05		2/5	20	2
0/14	0/1	0/18	488/18		3/75	30	3
0/098	0/4	0/1	487/91		5	40	4

Table 2. Results of maximum pressure on concrete cover of underground structure under surface explosion with 500 Kg TNT

۴-۲- درستی آزمایی بیشینه سرعت ذره‌ای

به منظور مقایسه نتایج عددی با منابع تحلیلی و تجربی، مقادیر سرعت ذره‌ای موج وارد بر پوشش بتنی سازه مورد مطالعه در اعماق ۱۰ تا ۴۰ متری زمین تحت اثر انفجار سطحی با وزن خرج ۵۰۰ کیلوگرمی از ماده منفجره TNT در نرم‌افزار اتوداین مدل سازی شد. نتایج مربوط به بیشینه مقادیر به دست آمده از سه روش مذکور در جدول (۳) به

Conc35 با معادله حالت پی-آلفا و مدل مقاومتی و شکست RHT-Concrete تعریف شده است. معادله حالت پی-آلفا دسته

$$P = X_1 + X_2 + X_3$$

$$\begin{cases} X_1 = A \left(1 - \frac{\omega p}{R_1 \rho_0} \right) \times e^{\left(-R_1 \frac{\rho_0}{p} \right)} \\ X_2 = B \left(1 - \frac{\omega p}{R_2 \rho_0} \right) \times e^{\left(-R_2 \frac{\rho_0}{p} \right)} \\ X_3 = \frac{\omega p^2}{\rho_0} E_{m_0} \end{cases} \quad (6)$$

دیگری از معادلات حالت تراکم است. با وجود آنکه معادلات حالت تراکم و تکه‌ای خطی برای مواد متخلخل مانند شن و ماسه در فشارهای کم نتایج خوبی دارند ولی برای مدل سازی در تنش‌های بالا از معادله حالت پی-آلفا بر حسب فشار و دمای مشخص استفاده می‌شود [16].

با توجه به معادله (۵) در نرم‌افزار اتوداین رابطه بین تنش با کرنش، نرخ کرنش، انرژی داخلی و خسارت برای بتن با استفاده از معیار RHT بیان می‌شود. این مدل مقاومتی توسط رمپلینگ [17] ارائه شده است و رابطه بین سختی فشاری، سختی کرنشی و نرخ آن و سه ثابت وابسته به تنش اصلی و همچنین شاخص آسیب را به یکدیگر توصیف می‌کند. این ثوابت وابسته نیز شامل بر سطح شکست، حد الاستیک و مقاومت باقیمانده می‌باشند.

$$\sigma_{ij} = f(\epsilon_{ij}, \dot{\epsilon}_{ij}, E, D) \quad (5)$$

۳-۴- مدل سازی ماده منفجره

برای مدل سازی ماده منفجره از خرج انفجاری TNT با معادله حالت JWL استفاده شده است. رابطه (۶) معادله حالت جونز ویکنز-لی (JWL) نامیده می‌شود که به صورت گسترده برای محاسبه فشار ناشی از یک انفجار کامل در هیدروکدها و مدل سازی‌ها به کار می‌رود [14].

در رابطه (۶) A, B, R_1, R_2, ω ثوابت مصالح و P_0 چگالی اولیه ماده منفجره و P چگالی ناشی از محصولات انفجار است و نسبت آن‌ها در اینجا برابر یک در نظر گرفته می‌شود. (E_{m_0}) نیز

تفسیر آمده است.

در مورد تغییرات بیشینه سرعت ذره‌ای نیز همراه با افزایش عمق دفن سازه میان نتایج سه روش هماهنگی وجود دارد. با توجه به داده‌های به دست آمده، روش عددی در محدوده نتایج تجربی آئین‌نامه و نیز روابط اسمیت قرار دارد.

جدول ۳. نتایج (PPV) به روش عددی، آئین‌نامه (TM5-855-1) و اسمیت با خرج ۵۰۰ کیلوگرم TNT

PPV (m/s)		TM5-855-1	Z (m/kg ^{1/3})	R (m)	W(kg)	No.
Numerical	Smith					
2/5	1/1	3	1/25	10	500	1
0/21	0/19	0/54	2/5	20		2
0/12	0/07	0/21	3/75	30		3
0/0321	0/0340	0/03	5	40		4

Table 3. Results of PPV with numerical, TM5-855-1 and smith method with 500 Kg TNT

۵- شبیه‌سازی و تحلیل عددی

۵-۱- تحلیل عددی سازه زیرزمینی

در این بخش با استفاده از نتایج حاصل از سنجه‌هایی که در مدل عددی روی سقف و دیوارهای خارجی سازه قرار گرفته‌اند، بار وارد شده بر سازه زیرزمینی مورد مطالعه تحت اثر انفجار سطحی بررسی می‌شود.

۵-۲- تحلیل عددی اثر انفجار روی سازه زیرزمینی

شکل (۲) مراحل انفجار در مدل شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار اتوداین در حین گذشت زمان را نشان می‌دهد.

با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که در مدل عددی همزمان با آغاز انفجار چاله انفجاری حاصل از انفجار ماده منفجره در سطح زمین تشکیل می‌شود و به تدریج با گذشت زمان عمق و شعاع آن افزایش می‌یابد. این چاله انفجاری در تمامی مدل‌ها تا عمق ۳/۵ متری و شعاع آن تا ۲/۹۹ متر افزایش پیدا می‌کند.

همچنین با توجه به شکل می‌توان مشاهده نمود، امواج حاصل از انفجار ماده منفجره به صورت امواج کروی در

محیط اطراف پراکنده شده و در راستای عمودی به سمت لایه‌های درونی خاک منتقل می‌شود.

۵-۳- بررسی بارگذاری عددی

به منظور بررسی بارگذاری عددی، نتایج حاصل از بررسی عددی سازه زیرزمینی بتن مسلح در اعماق ۱۰ تا ۴۰ متری تحت اثر انفجار سطحی با وزن خرج ۵۰۰ کیلوگرمی از ماده منفجره TNT با نتایج آئین‌نامه امریکا مقایسه شد.

شکل ۲. تغییرات فشار خاک تحت انفجار سطحی در زمان‌های مختلف و مراحل شکل‌گیری چاله انفجاری در مدل‌سازی عددی

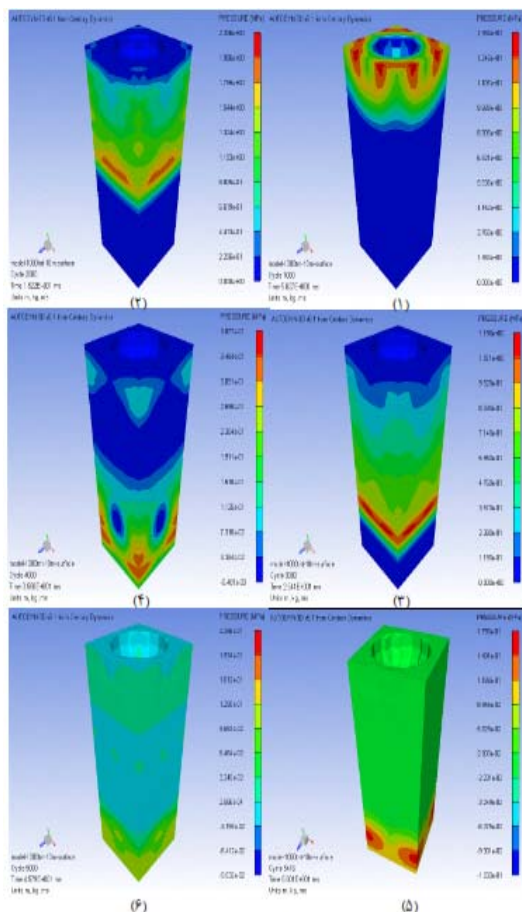


Fig. 2. Soil pressure variation under surface explosion in different times and steps of formation of explosive pits in numerical model

در روش عددی نتایج مربوط به المانی از سازه است که در آن سقف و دیوارها بیشترین مقادیر بار را دریافت کردند. بررسی نتایج نشان می‌دهد، مقطعی از سازه شامل مرکز سطح سقف سازه و دیوارهای کناری آن بیشترین مقدار بار را توسط سنجه‌های تعبیه شده در مدل عددی دریافت می‌نماید. از این رو این المان در تمامی اعماق با توجه به شرایط بحرانی اعمال بار در نتایج در نظر گرفته شده است. در جدول (۴) نتایج بار معادل

حاصل از میانگین بارهای وارد شده بر طول وجوه سازه برای هر دو روش عددی و آیین نامه (TM5-855-1) آمده است. از نتایج جدول (۴) مشاهده می شود که مقادیر آیین نامه نسبت به روش عددی بزرگتر بوده و با افزایش عمق دفن سازه

با یکدیگر هماهنگی بیشتری پیدا می کنند. علت اصلی اختلاف نتایج را می توان وارد کردن ضریب جفت شدگی $0/4$ مربوط به انفجار سطحی نامید.

جدول ۴. مقایسه نتایج اعمال بارگذاری سازه زیرزمینی تحت اثر انفجار سطحی با خرج ۵۰۰ کیلوگرم TNT

TM5-855-1				AUTODYN			R(m)	W(kg)	No.
K _{lm}	Lateral load	1/5 coefficient Regulations	Roof load	K _{nu}	Lateral load	Roof load			
0/58	1/74	4/5	3	0/65	1/5	2/3	10	500	1
0/75	0/3	0/6	0/4	0/6	0/22	0/37	20		2
0/82	0/14	0/27	0/18	0/67	0/11	0/16	30		3
0/86	0/086	0/15	0/1	0/73	0/065	0/089	40		4

Table 4. Results of surface explosion of underground structure with 500 Kg TNT

۵- نتیجه گیری

مقادیر فشار از مرتبه بزرگتری است. دلیل این امر آن است که در آیین نامه فرض بر این است که بررسی ها در محدوده انفجار کامل انجام بگیرد (ضریب جفت شدگی $f=1$)، در حالی که در مدل بررسی شده، انفجار در سطح مشترک هوا و خاک شکل گرفته است. از این رو ضریب جفت شدگی برابر $(f=0/4)$ است. به عبارت دیگر عمق خرج انفجاری تقریباً صفر بوده و تفاوت اندکی بین نتایج آن ها وجود دارد.

(۴) با توجه به بررسی عددی صورت گرفته، از میان سنجه های نصب شده روی سازه زیرزمینی بیشترین مقادیر توسط سنجه هایی که در مرکز سطح سقف سازه قرار داشتند ثبت شد. همچنین پس از مرکز سقف، نقاط مربوط به رئوس سرعت سقف و دیوارها بیشترین تأثیر را از انفجار دریافت می نمایند. با توجه به نتایج مربوط به بار وارد شده روی سقف سازه مشاهده شد که مقادیر آیین نامه امریکا نسبت به دو روش دیگر محافظه کارانه است. از این رو پیشنهاد می شود در طراحی های مطابق با این دستورالعمل ضریب افزایشی $1/5$ برای بار وارد شده بر سازه اعمال نشود.

در این پژوهش آثار انفجار سطحی روی سازه زیرزمینی با استفاده از هیدروکد AUTODYN و نیز روش تئوری بررسی شد. در این راستا با استفاده از شبیه سازی عددی اثر بار وارد روی پوشش بتنی سازه زیرزمینی بررسی شد. همچنین نتایج عددی با آیین نامه ارتش آمریکا و نیز روابط تحلیلی اسمیت و همکاران مقایسه شد. از مجموع مباحث مطرح شده می توان نتایج زیر را بیان نمود:

(۱) با توجه به بررسی پارامتری نتایج عددی با نتایج تحلیلی و آیین نامه مشاهده می شود که هیدروکد اتوداین در تحلیل و بررسی پدیده انفجار در سازه های زیرزمینی نتایج قابل قبولی به دست می دهد.

(۲) با توجه به نتایج حاصل برای سازه زیرزمینی تحت بارگذاری انفجاری روش های عددی و تحلیلی با افزایش عمق دفن سازه با یکدیگر هماهنگی خوبی دارند.

(۳) امواج انفجار در خاک به شکل امواج نیم کره ای پیشروی می کنند. نتایج شبیه سازی عددی شامل بیشینه مقادیر فشار و سرعت ذره ای با مقادیر ارائه شده در آیین نامه (TM5-855-1) با یکدیگر مقایسه شدند. همان گونه که مشاهده شد مقادیر پیش بینی دستورالعمل ارتش امریکا برای بیشینه

۷. مراجع

- [14] Tiwari, R.; Chakraborty, T.; Matsagar, V. "Dynamic Analysis of Underground Tunnels Subjected to Internal Blast Loading;" World Congress on Computational Mechani (WCCM XI).Vol. 8,pp. 533-538. (2014).
- [15] Pandurangan, B. "Development, Parameterization and Validation of Dynamic Material Models for Soil and Transparent Armor Glass"; Ph.D. Thesis, Graduate School of Clemson Univ., (2009).
- [16] AUTODYN User Manual. s.l.: Century Dynamics Inc. Version13.0. (2015).
- [17] Rempling, R. "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)
- [1] Smith, P. D.; Hetherington, J. G.; Hetherington, J. H. "Blast and Ballistic Loading of Structures"; Oxford OX2: Butterworth-Heinemann Ltd; Linacre House, 8DP. (1994).
- [2] Bulson, S. P. "Explosive Loading of Engineering Structures". Chicago: USA Air Force Army, 1. (1997).
- [3] TM5-855-1. "Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapon". Washington, DC: Department of U.S. Army Security Engineering, Technical Manual. (1986).
- [4] ASCE. "Design of Structures to Resist Nuclear Weapons Effects". Reston, American Society of Civil Engineering, Manual 42. (1985).
- [5] Taghavi parya, M.H. "Analysis and Survey of Surface and Subsurface Explosion Effects on Underground Structures Using Numerical Simulation and Semi-Analytical Method"; Ms.c. Thesis, Department of Passive Defense, Imam Hussein University, (2016). ("In Persian ")
- [6] Clutter J.K.; Stahl M. "Hydrocode Simulations of Air and Water Shocks for Facility Vulnerability Assessments". (2004).
- [7] Ambrosini D.; Anesib R.D. "Blast Load Assessment Using Hydrocodes"; 10, Boston, Vol. 2. 1. (2007).
- [8] Henrych, J. "The Dynamics of Explosion and Its Use". Amsterdam: Elsevier, 1. (1979).
- [9] Borgers J.B.W.; Vantomme J. "Towards a Parametric Model of a Planar Blast Wave Created with Detonating Cord". (2006).
- [10] Lucksony. "Numerical Results-Based Review of the Hole Created by the Explosion in the Soil"; International Journal of Impact Engineering. (2008).
- [11] Anirbon. "The Tunnel in Soil Subjected to Blast Load Using 2D and 3D Numerical Simulations"; South Univ.Technol:Vol.18, 3. pp. 917-924. (2011).
- [12] Yang, Y.; Xie, X Wang, R.; "Numerical Simulation of Dynamic Response of Operating Metro Tunnel Induced by Ground Explosion "; Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. China.Vol .2(4), pp.373-384. (2010)
- [13] Mazek, S.A.; Almannaci, H.A.; "Finite element model of Cairo metro tunnel-Line3 Performance"; J. Ain Shams Engineering. Cairo, Egypt. Vol. 4, pp.709-716. (2013).

Analysis of explosion loading on underground structures under surface explosion

Abstract

Most of underground structures are designed and built to withstand the effects of precision penetrating weapons and heavy bombs in the soil. Usually the depth of the structures is high and there is no possibility of missiles to the main structure. Accordingly, the design of these structures is performed for blast loads. The explosion phenomenon is a type of high strain rate problem that requires dynamic analysis to solve. Also, due to the interaction between underground structures and soil, the analysis of these structures is affected by any type of nonlinear analysis. Thus, the analysis of underground structures in simulations affected by the explosion is a high strain rate problem that requires nonlinear dynamic analysis. There are two implicit and explicit solutions to dynamic analysis that, given the explosion problems, their analysis is explicitly integral. The loading of underground structures is often based on the relationships obtained from theoretical and experimental research. Currently, the most important reference for explosive loading in the field of underground structures is the US code (TM5-855-1) provided by the US army. The numerical simulation methods have recently been widely used as a novel method in the calculation of nonlinear dynamic loads. According to the researchers, among the explicit software available in AUTODYN software, due to its ability to solve very high strain rate problems, it yields good results from simulation and explosion problem analysis. On the other hand, the explosive loading of underground structures is often based on theoretical and empirical research. In this study, a numerical simulation method was used to analyze and simulate the effect of the surface explosion on the underground structure. Also, all the simulation steps were performed using AUTODYN hydrocode. In order to analyze the loading and response of underground structures, the effect of the explosive charge weight and the depth of burial of the structure has been studied and the numerical results have been compared with the relationships presented in reliable US scientific and guidance sources. Finally, suggestions are made to improve the loading of these structures. Also, considering the results of the load on the roof of the structure, it was observed that the values of the US code are conservative compared to the other two methods. Therefore, it is recommended not to apply 1.5 incremental coefficient load to the structure in accordance with this instruction. The numerical simulation results including a comparison of maximum pressure and the velocity values with the values provided in the by code (TM5-855-1) showed that the predicted values for the maximum pressure values larger than of instructions America's Army. The reason for this is that the code assumes that the investigations take place in the full explosion range (mating coefficient $f = 1$), while in the numerical model under consideration, the explosion is formed at the joint surface of air and soil. Hence the coupling coefficient is equal to ($f = 0.4$). In other words, the depth of the explosive charge is almost zero and there is little difference between the results.

Keywords: Underground structures, Explosion loading, Surface explosion, Ground-shock parameters,