

نحوه مدل سازی اثر انفجار بر سازه های زیرزمینی در دستگاه سانتریفیوژ

محمد حسن بازیار^{۱*}، حسین صالح زاده^۲، محمد کاظمی ورنامخواستی^۳، مسعود رابطی مقدم^۴

۱- استاد، ۲- دانشیار، ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک و ۴- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت: ۹۲/۰۴/۰۳، پذیرش: ۹۲/۱۲/۲۰)

چکیده

در مقاله حاضر، پس از توضیح اصول و قواعد مدل سازی فیزیکی با دستگاه سانتریفیوژ در ژئوتکنیک، کاربرد این اصول در مدل سازی انفجار شرح داده شده است. در ادامه نحوه انجام آزمایش انفجار و تجهیزات مورد نیاز آزمایش تشریح شده است. در انتها نتایج بارگذاری انفجار در یک دستگاه سانتریفیوژ به صورت تاریخچه زمانی شتاب، فشار و کرنش برای دو نقطه مختلف از سازه زیرزمینی که در عمق ۵/۶ متری سطح زمین قرار گرفته، ارائه گردیده است. نتایج به دست آمده از این آزمایش انطباق خوبی با روابط موجود در آیین نامه ها و تحقیقات گذشته دارد. از نتایج این مطالعه می توان برای درک بهتر اثر بارگذاری انفجار بر سازه های زیرزمینی و در صورت لزوم صحت سنجی نرم افزارهای عددی جهت مطالعات وسیع تر استفاده کرد.

کلید واژه ها: سانتریفیوژ، مدل سازی فیزیکی، ژئوتکنیک، بارگذاری انفجار، سازه زیرزمینی.

Centrifuge Modeling of an Underground Structure Subjected to Blast Loading

M. H. Baziar^{*}, H. Salehzadeh, M. Kazemi, M. Rabeti Moghadam

Iran University of Science and Technology

(Received: 24/06/2013; Accepted: 11/03/2014)

Abstract

In this paper, first, the principles of physical modeling in geotechnical centrifuge has been explained and then, the application of these principles in modeling of the blast loading is described. Thereafter, procedures and equipment of a blast test in IUST centrifuge are described. Results are presented in the form of acceleration, stress and strain time histories for two different points of underground structures that is located in the depth of 5.6 meters from ground surface. It is observed that the results are in good agreement with existing codes and past researches. The results of this study can be used to investigate the effects of blast loading on underground structures and verification of softwares to more extensive studies.

Keywords: Centrifuge, Physical Modeling, Geotechnical, Blast Loading, Underground Structure.

* Corresponding Author Email: Baziar@iust.ac.ir

۱. مقدمه

و دارای خطر هستند، به ندرت قابل اجرا می‌باشند و مطالعات عددی علاوه بر مشکلات گفته شده در قسمت قبل به دلیل حساسیت موضوع کمتر به شکل تجاری در آمده‌اند. از این رو محققین مطالعات آزمایشگاهی را به عنوان راهی مطمئن‌تر و کم هزینه‌تر برای بررسی اثر بارگذاری انفجار انتخاب کردند. آزمایش‌هایی نظیر مدل‌سازی سانتریفیوژی علاوه بر اینکه نسبت به آزمایش‌های میدانی بسیار کم هزینه و کم خطر می‌باشند، دارای نتایج قابل اعتماد نیز هستند. با بررسی مطالعات سانتریفیوژی که در زمینه انفجار در خاک به مطالعه پرداخته‌اند، مشخص می‌شود که این مطالعات در سه زمینه بررسی حفره انفجاری، بررسی انتشار امواج ناشی از انفجار در خاک و بررسی اثر انفجار بر سازه‌های زیرزمینی دسته‌بندی می‌شوند. در این میان بیشترین مطالعات انجام شده مربوط به حفره انفجاری است. برای این منظور محققین ابتدا با استفاده از آنالیز ابعادی تعدادی عدد بی‌بعد تعریف می‌کنند، سپس آزمایش‌ها را طوری انجام می‌دهند که تعدادی از این اعداد بی‌بعد ثابت بمانند و تنها دو عدد بی‌بعد در آزمایش‌ها تغییر کند. حال می‌توان با استفاده از ارتباط بین اعداد بی‌بعد متغیر که با انجام آزمایش‌ها به دست می‌آید، بر اساس نوع و مقدار ماده منفجره و خصوصیات خاک به محاسبه حجم حفره انفجاری پرداخت. اشمیت از جمله محققینی است که در این زمینه مطالعات فراوانی انجام داده است [۸ و ۹]. از جدیدترین مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان به مطالعه فن و همکاران اشاره نمود [۱۰]. در زمینه بررسی انتشار امواج ناشی از انفجار در خاک، محققین به بررسی حداکثر فشار، حداکثر شتاب و حداکثر سرعت ذرات در خاک می‌پردازند. از مطالعات انجام گرفته در این زمینه می‌توان به مطالعات والش و چارلی [۱۱]، چارلی و دودن [۱۲] و فن و همکاران اشاره نمود [۱۰]. در زمینه بررسی اثر انفجار بر سازه، نصب حسگر بر سازه، اثر انفجار بر سازه و برخی روش‌های کاهش اثر انفجار بر آن را بررسی می‌نمایند.

کاتر [۱۳] به بررسی اثر انفجار بر سازه زیرزمینی در سانتریفیوژ با شتاب‌های مختلف، ۹۷ g، ۴۸/۵ g و ۱ g پرداخت. سازه زیرزمینی مورد استفاده وی مبین یک تونل بود. وی به دلیل اینکه آزمایش‌ها را برای شتاب ثقل‌ها و مقیاس‌های مختلف انجام داد، مشاهده کرد که مدل‌سازی مدل‌ها بسیار مطلوب بوده و این بیانگر درستی روش آزمایش و قوانین مدل‌سازی است. وی همچنین رابطه‌ای برای حفره انفجاری در ماسه ۳۰/۳ Monterey ارائه کرد. زیمی [۱۴] به مدل‌سازی فیزیکی اثر انفجارهای سطحی بر سازه‌های زیرزمینی پرداخت. سازه زیرزمینی مدل شده توسط وی مبین یک تونل بود. وی در این آزمایش‌ها ضخامت پوشش خاک بالای سازه و جنس مصالح پوشش بالای سازه را تغییر داد و نتایج را در قالب تاریخچه زمانی کرنش، که توسط نوزده کرنش‌سنج نصب شده بر تونل ثبت شده بود، مقایسه کرد. نتیجه آزمایش‌ها به این صورت بود که وقتی ضخامت پوشش خاک بالای سازه از ۱/۸ متر به

استفاده از فضاهای زیرزمینی با توجه به رشد جمعیت و مشکلات حمل و نقل یکی از مؤلفه‌های زیر بنایی کشورهای در حال توسعه است. بدین منظور حفظ جان انسان‌ها و سرویس دهی آن‌ها در مواقع ضروری نظیر شرایط انفجارهای تصادفی از اهمیت خاصی برخوردار است. دیدگاهی که در دهه اخیر در کشورهای توسعه یافته مطرح شده، استفاده دوگانه از تونل‌ها و ایستگاه‌های زیرزمینی مترو به عنوان پناهگاه زیرزمینی و همچنین حمل و نقل مسافر است. از این رو، بررسی اثر انفجار بر این‌گونه سازه‌ها و تخمین مناسبی از بارهای وارده در حین انفجار بر آن‌ها از مهم‌ترین مباحث پدافند غیرعامل است [۱]. با نگاهی به تحقیقات موجود در زمینه مباحث مرتبط با انفجار، مشخص می‌شود که تاکنون عمده فعالیت‌های صورت گرفته در این زمینه، در سه بخش مطالعات میدانی (بزرگ مقیاس)، مطالعات عددی و مطالعات آزمایشگاهی (کوچک مقیاس) دسته‌بندی می‌گردد. مطالعات میدانی به علت صرف هزینه و مشکلات زیست محیطی، بسیار کم و محدود به کشورهای دارای تجهیزات مانند روسیه، آمریکا، ژاپن و سوئد است. از محدود مطالعات میدانی که در این زمینه انجام گرفته است می‌توان به آزمایشات انجام شده توسط پروفیسور جو حاجی نام برد که از سرهنگان ارتش ژاپن قبل از جنگ جهانی دوم می‌باشد. این آزمایش‌ها مابین سال‌های ۱۹۲۸ تا ۱۹۴۵ انجام شده و توسط ایشیکاوا و بپو [۲] گزارش شده است. از مواردی که در این آزمایش‌ها بررسی شده است، اثر بارگذاری انفجار بر سه نوع تونل مستقیم، شاخه‌ای و شبکه‌ای می‌باشد. در آزمایش‌های تونل مستقیم از دو مقدار ماده منفجره استفاده شده و در نقاط مختلف برای هر مقدار ماده منفجره فشار، زمان رسیدن موج انفجار و سرعت رسیدن آن محاسبه شده است. در زمینه بررسی اثر انفجار بر سازه‌ها بیشترین مطالعات به صورت عددی انجام گرفته است. از جمله نرم‌افزارهایی که می‌توان از آن‌ها در این زمینه استفاده کرد، می‌توان به FLAC, ABAQUS, LS-DYNA اشاره نمود. علی‌رغم اینکه مطالعات عددی نسبت به مطالعات میدانی بسیار کم هزینه‌تر و ساده‌تر هستند، اما اعتماد به نتایج این‌گونه مطالعات نیازمند صحت سنجی نرم‌افزار مورد استفاده می‌باشد.

گویی و چیان [۳] با استفاده از نرم‌افزار FLAC 2D، انفجار بر روی تونلی که در زیر فرودگاهی در تایوان ساخته شده بود را مدل کردند و تأثیر ویژگی‌های خاک از جمله سختی دینامیکی خاک، مقاومت برشی زه‌کشی نشده، نسبت میرایی خاک و شدت بار انفجاری و ابعاد گودال ایجاد شده را در پاسخ سازه بررسی کردند. از دیگر مطالعات عددی انجام گرفته در این زمینه می‌توان به مطالعات کیم و همکاران [۴]، شین و همکاران [۵]، نان ژیانگ و چوانبو [۶] و ژیا و همکاران [۷] اشاره نمود.

همان‌طور که گفته شد به علت این که مطالعات میدانی پر هزینه

ژئوتکنیکی فیزیکی در سانتریفیوژ تا سال ۱۹۶۰ عمومیت نیافت تا اینکه سانتریفیوژ در انگلیس و ژاپن دوباره معرفی شد. یکی از دلایل کاهش علاقه به دنبال این کار اولیه در آمریکا، ترجیح مدل‌سازی ریاضی و آنالیز عددی بود که با پیشرفت فناوری رایانه علاقه به آن روزافزون شده بود. در اواسط سال ۱۹۶۰، مهندسين شروع به استفاده از سانتریفیوژ در ژاپن و اروپای غربی کردند به طوری که اکنون تمایل همه‌گیری برای استفاده از آن به وجود آمده است [۱۹].

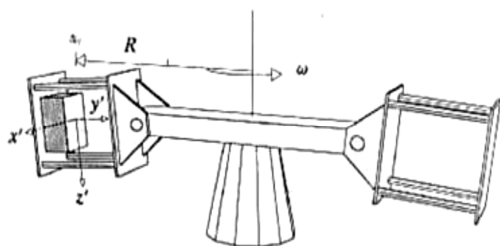
۲-۲. مدل‌سازی در سانتریفیوژ ژئوتکنیکی

آزمایشات سانتریفیوژی خاک از یافته‌های اخیر در مدل‌سازی پدیده‌های ژئوتکنیکی می‌باشد که به سرعت در جهان رشد داشته است. اصلی‌ترین دلیل علمی استفاده از مدل‌سازی سانتریفیوژ برای تحقیقات ژئوتکنیکی، غلبه بر وزن خود مصالح می‌باشد. رفتار مکانیکی خاک به شدت غیرخطی و وابسته به سطح تنش می‌باشد. به منظور شبیه‌سازی دقیق یک نمونه در مقیاس کوچک، می‌بایست تنش‌های درجا به درستی در مدل باز تولید شوند. برای ایجاد تنش‌های ناشی از وزن نمونه اصلی در یک مدل با مقیاس $1/N$ ، لازم است تا مدل تحت شتاب گرانشی N برابر شتاب گرانشی نمونه اصلی آزمایش شود. اگر یک مدل با مقیاس $1/N$ در معرض شتاب N برابر شتاب گرانشی زمین قرار گیرد، ابعاد و بسیاری از فرآیندهای نمونه اصلی می‌بایست به درستی مقیاس شوند.

اساس کار سانتریفیوژ بر دوران توده خاک مدل، حول محوری قائم با سرعت زاویه‌ای ثابت استوار است. بر حسب فاصله نمونه خاک، از محور دوران (شعاع دوران r) و نیز سرعت زاویه‌ای دستگاه ω ، شتاب شعاعی برابر با $r\omega^2$ چندین برابر شتاب ثقل زمین (g) به توده خاک وارد می‌شود و بنابراین وزن مخصوص معادل نمونه خاک از رابطه زیر به دست می‌آید (ρ چگالی خاک می‌باشد) [۲۰]:

$$\gamma = \rho(g^2 + (r\omega^2)^2)^{0.5} \quad (1)$$

در شکل (۱)، نمای ساده‌ای از یک دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی نشان داده شده است.



شکل ۱. نمای ساده‌ای از یک دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی

شکل (۲)، تنش‌های قائم در موقعیت‌های مختلف نمونه اصلی و مدل سانتریفیوژی با مقیاس $1/N$ را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که

۳/۶ متر افزایش می‌یابد کرنش محوری اندازه‌گیری شده در یک چهارم دهانه حدود ۴۰ درصد کاهش می‌یابد و هنگامی که ضخامت پوشش بالای سازه $2/7$ متر خاک و $0/9$ متر ژئوفوم باشد، کرنش محوری اندازه‌گیری شده در یک چهارم دهانه نسبت به حالتی که ضخامت پوشش خاک بالای سازه $3/6$ متر باشد، حدود ۶۴ درصد کاهش پیدا می‌کند. وی آزمایشات را در شتاب ثقل $70g$ و در خاک ماسه‌ای انجام داده است.

در کشور ما مطالعات گزارش شده در این زمینه صرفاً به صورت مطالعات عددی می‌باشد و تاکنون اثر انفجار بر سازه‌های زیرزمینی به کمک دستگاه سانتریفیوژ بررسی نشده است [۱۵ و ۱۶]. مقاله حاضر اولین مطالعه اثر بارگذاری انفجار بر سازه‌های زیرزمینی به کمک دستگاه سانتریفیوژ است. در مقاله حاضر سعی بر آن است که ابتدا به معرفی اصول مدل‌سازی در سانتریفیوژ ژئوتکنیکی پرداخته شود و سپس نحوه مدل‌سازی انفجار در سانتریفیوژ برای بررسی اثر انفجار بر سازه‌های زیرزمینی تشریح شود. در پایان نتایج حاصل از انجام یک آزمایش مدل‌سازی انفجار در سانتریفیوژ که در دستگاه سانتریفیوژ دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شده است، ارائه می‌شود. از نتایج این مطالعه می‌توان برای بررسی اثر بارگذاری انفجار بر سازه‌های زیرزمینی و صحت سنجی نرم‌افزارهای عددی جهت مطالعات وسیع‌تر استفاده کرد.

۲. قوانین حاکم بر مدل‌سازی فیزیکی در

سانتریفیوژ ژئوتکنیکی

۲-۱. تاریخچه آزمایش‌های سانتریفیوژی

ایده اجرای آزمایش‌ها بر روی مدل‌های مقیاس کوچک در سانتریفیوژ برای اولین بار در سال ۱۸۶۹ توسط فیلیپس [۱۷] در فرانسه ارائه شد. او با استفاده از معادلات دیفرانسیلی تعادل برای اجسام الاستیک، روابط شبیه‌سازی شده‌ای که بتواند برای مدل مقیاس کوچک و مدل نمونه اصلی (پروتوتایپ) رفتار یکسانی را نشان دهد، به دست آورد. از آنجایی که شتاب ثقل فاکتور اصلی در تعادل اکثر اجسام است، فیلیپس استفاده از نیروهای اینرسی به ویژه نیروی سانتریفیوژی را پیشنهاد کرد. در این زمان به این ایده برای به دست آوردن شبیه‌سازی بین مدل و پروتوتایپ توجه نشد و تا سال ۱۹۳۰ برای مهندسين عمران ناشناخته ماند. کاربرد عملی دستگاه سانتریفیوژ در مدل‌سازی و آزمایش‌های مکانیک خاک برای نخستین بار در سال ۱۹۳۶ در کشور شوروی سابق با انجام آزمایش‌هایی که پاکراوسکی و فیدورف [۱۸] ترتیب دادند، آغاز شد. آن‌ها نتایج کارهای آزمایشگاهی خود را در ۴ نوع آزمایش مختلف که برای نخستین بار در آن‌ها از دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی استفاده شده بود را در مقاله‌ای خلاصه کردند. مسائل مورد تحقیق در این آزمایش‌ها عبارت بودند از: پایداری شیب‌ها، توزیع فشار زیر پی، توزیع فشار اطراف لوله‌های مدفون و نشست پی‌ها. علی‌رغم این پیشرفت، ایده آزمایش بر روی مدل‌های

این رابطه معادل نسبت انرژی مدل و نمونه است که در جدول مقیاس‌ها ارائه شد. رابطه (۴) نشان می‌دهد که وزن ماده منفجره در سانتریفیوژ با توان سوم شتاب ثقل مدل می‌شود به این معنی که اگر ۱ گرم ماده منفجره در شتاب $100g$ منفجر شود معادل انفجار ۱ تن ماده منفجره در شتاب ثقل $1g$ است.

۳-۲. سازه زیرزمینی

به طور کلی باید جنس و خصوصیات سازه اصلی و مدل در سانتریفیوژ یکسان باشد. به دلیل اینکه سازه اصلی از جنس بتن مسلح می‌باشد باید برای مدل‌سازی آن در سانتریفیوژ از میکرو بتن استفاده کرد. ساختن میکرو بتن دشوار و هزینه بر می‌باشد. از این رو در مدل‌سازی سانتریفیوژی، یک سازه با جنس بتن مسلح را با سازه‌ای از جنس دیگر مدل می‌نمایند [۱۳، ۲۱ و ۲۲].

جدول ۱. قوانین مقیاسی سانتریفیوژ

میت	مقیاس نمونه واقعی	مدل تحت اثر شتاب N برابر شتاب ثقل
طول	1	$\frac{1}{N}$
تنش	1	1
کرنش	1	1
نیرو	1	$\frac{1}{N^2}$
جابه‌جایی	1	$\frac{1}{N}$
سرعت	1	1
شتاب	1	N
زمان دینامیکی	1	$\frac{1}{N}$
انرژی	1	$\frac{1}{N^3}$
جرم	1	$\frac{1}{N^3}$
سختی خمشی	1	$\frac{1}{N^4}$

جنس ماده‌ای که برای مدل استفاده می‌شود طبق برقراری رابطه بین سختی خمشی مدل و نمونه اصلی انتخاب می‌شود [۲۱ و ۲۲]:

$$(EI)_m = \frac{(EI)_p}{n^4} \quad (5)$$

که در آن،

EI = سختی خمشی

E = مدول الاستیسیته

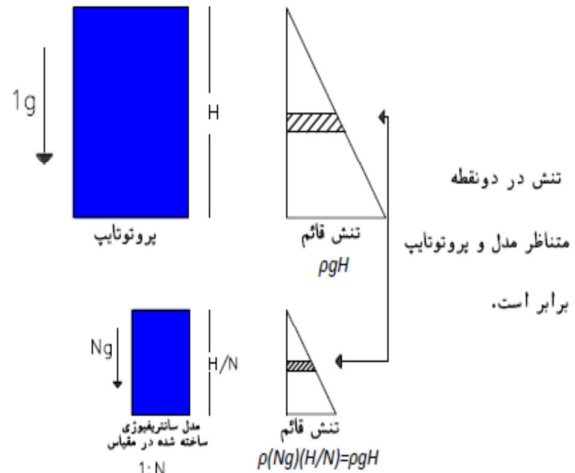
I = ممان اینرسی

می‌باشد. با استفاده از رابطه (۵)، رابطه ضخامت نمونه اصلی با مدل، با جنس متفاوت از نمونه اصلی به صورت زیر به دست می‌آید [۲۲]:

$$t_p = N t_m \left(\frac{E_m}{E_p} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

که در آن، t ضخامت سازه زیرزمینی می‌باشد که اندیس‌های p و m به ترتیب مربوط به نمونه واقعی^۱ و مدل^۲ می‌باشند. N نیز نسبت

تنش‌ها در نقاط مشابه در مدل و نمونه اصلی برابر هستند. پارامترهای مختلفی که در مدل‌سازی سانتریفیوژی مورد استفاده قرار می‌گیرند بر اساس روابط مقیاسی که از آنالیزهای ابعادی به دست می‌آیند با توان‌های مختلف N مقیاس می‌شوند. جدول (۱)، قوانین مقیاسی برای پارامترهای مهم در مدل‌سازی‌های دینامیکی با سانتریفیوژ را نشان می‌دهد [۲۱].



شکل ۲. مفهوم مدل‌سازی سانتریفیوژی و برابری تنش‌ها [۲۱]

۳. مدل‌سازی اثر انفجار بر سازه زیرزمینی در سانتریفیوژ

۳-۱. ماده انفجاری

اشمیت [۸] عدد π زیر را برای مقیاس کردن انرژی برای انواع مختلف مواد انفجاری در سانتریفیوژ ارائه نمود.

$$\pi = \left(\frac{G}{Q} \right) \left(\frac{W}{\delta} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

G = شتاب ثقل

Q = گرمای انفجار بر واحد جرم ماده انفجاری

W = جرم ماده انفجاری

δ = چگالی ماده انفجاری

با مساوی قرار دادن عدد π بالا، برای مدل و نمونه اصلی رابطه زیر بین جرم ماده انفجاری مدل و نمونه اصلی به دست می‌آید.

$$W_m = \left(\frac{G_p}{G_m} \right)^3 \left(\frac{Q_m}{Q_p} \right)^3 \left(\frac{\delta_m}{\delta_p} \right) W_p \quad (3)$$

حال اگر جنس ماده انفجاری مدل و نمونه یکسان باشد رابطه (۳)، به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$W_m = \left(\frac{G_p}{G_m} \right)^3 W_p \quad (4)$$

¹ Prototype

² Model



شکل ۳. تصویری از سانتریفیوژ دانشگاه علم و صنعت ایران

جدول ۲. مشخصات سانتریفیوژ ژئوتکنیکی دانشگاه علم و صنعت ایران [۲۰]

ابعاد جعبه خاک	۲۰×۶۰×۲۰ سانتی‌متر مکعب (عرض، طول، ارتفاع)
شتاب گریز از مرکز	۲۰۰ برابر شتاب ثقل زمین (معادل ۱۹۶۲ متر بر مجذور ثانیه)
حداکثر جرم در شرایط حداکثر شتاب	۷۰ کیلوگرم
شعاع دوران	۸۵ سانتی‌متر
امکان نمایش	از بالا و از نمای نمونه بر روی صفحه رایانه
توان دستگاه	۱۲ اتن-جی
مشخصات موتور	با توان نامی ۵/۷ کیلووات و دور اسمی ۷۱۵ کیلووات و از نوع ۸ پل و سه فاز با جرم ۹۶ کیلوگرم
امکانات جانبی	تنظیم شتاب گریز از مرکز و شتاب زاویه‌ای در مرحله آغاز و پایان کار با دقت بالا و امکان انتقال و ذخیره تصویر نمونه در خاک در صفحه رایانه از طریق دو دوربین در دو صفحه عمود

۴-۱-۲. ماده انفجاری

ماده انفجاری مورد استفاده در این آزمایش ترکیب PETN و RDX می‌باشد. در این آزمایش از ۱۳۰ میلی‌گرم PETN و ۲۰۰ میلی‌گرم RDX استفاده شده است که در مجموع ماده منفجره‌ای به وزن ۳۳۰ میلی‌گرم را تشکیل می‌دهند. به دلیل اینکه آزمایش در شتاب g ۷۰ انجام شده است، این مقدار ماده منفجره طبق رابطه (۴)، معادل $113/19$ کیلوگرم ماده منفجره در شتاب ثقل g ۱ می‌باشد. مقدار TNT معادل با این ماده منفجره به عواملی نظیر انرژی آزاد شده بر اثر انفجار، شکل هندسی ماده انفجاری، جنس پوشش ماده انفجاری و محیط انفجار بستگی دارد که با لحاظ این موارد و نظر گروه سازنده این چاشنی، مقدار TNT معادل به صورت تقریبی برابر $141/48$ کیلوگرم می‌باشد. در شکل (۴) اجزای تشکیل دهنده ماده انفجاری و در شکل (۵) تصویر آن نشان داده شده است.

شتاب سانتریفیوژی به شتاب ثقل می‌باشد. لازم به ذکر است در این مقاله هدف محاسبه نیروی وارد بر سازه می‌باشد و نه پاسخ سازه. از این رو مدل‌سازی سازه بتن مسلح با آلومینیوم در سانتریفیوژ قابل قبول می‌باشد. در صورتی که هدف بررسی پاسخ سازه به بار وارده و محاسبه نیروهای داخلی سازه باشد، با وجود این که ساخت میکروبتن مشکل و هزینه‌بر است، می‌بایست سازه بتن مسلح در سانتریفیوژ با میکروبتن مدل می‌شد. این موضوع به این علت است که برقراری رابطه (۵) در حوزه الاستیک می‌باشد و اگر سطح کرنش اعمال شده به بتن به قدری باشد که بتن از حالت الاستیک خارج گردد در این صورت رفتار الاستوپلاستیک بتن به درستی مدل نمی‌شود و این امر باعث به وجود آمدن خطا در نتایج می‌گردد. به طور کلی مسئله مدل‌سازی بتن با آلومینیوم معادل، در حوزه مدل‌سازی فیزیکی ژئوتکنیکی به مثابه یک اصل پذیرفته شده است. در مدل‌سازی سانتریفیوژی برقراری تمام تشابهات ابعادی با در نظر گرفتن تمامی جوانب بین مدل و نمونه اصلی عملاً غیرممکن بوده و معمولاً تشابه‌سازی بر اساس مهم‌ترین پارامتری که مورد مطالعه محققین باشد، انجام می‌گیرد. در شرایط آزمایش حاضر محققین غالباً پارامتر مهم را تغییر شکل^۱ در نظر می‌گیرند که در این حالت مدل‌سازی صحیح با در نظر گرفتن نسبت سختی خمشی مدل و نمونه اصلی انجام می‌شود [۲۱].

۴. بخش تجربی

در این آزمایش یک سازه زیرزمینی در عمق $5/6$ متری از سطح زمین در دستگاه سانتریفیوژ برای بررسی اثر انفجار بر آن مدل شده است، که در ادامه جزئیات مدل‌سازی و انجام آزمایش به همراه نتایج آورده شده است.

۴-۱-۱. وسایل و تجهیزات

۴-۱-۱-۱. سانتریفیوژ دانشگاه علم و صنعت ایران

در سال ۱۳۸۲ با استفاده از امکانات داخلی، سانتریفیوژی با مشخصات آورده شده در جدول (۲)، در مرکز تحقیقات ژئوتکنیک دانشگاه علم و صنعت ایران ساخته شد [۲۰]. در شکل (۳)، تصویری از سانتریفیوژ دانشگاه علم و صنعت ایران نشان داده شده است. سانتریفیوژ حاضر برای مدل‌سازی مسائل ژئوتکنیکی با شرایط بارگذاری استاتیکی طراحی شده است. از آنجا که مدل‌سازی بارگذاری انفجار در دستگاه سانتریفیوژ برخلاف سایر بارگذاری‌های دینامیکی معمول از قبیل زلزله نیازمند دستگاه لرزاننده نمی‌باشد، بنابراین آزمایش مورد نظر به منظور بررسی اثر بارگذاری انفجار در این دستگاه انجام گرفته است.

^۱ Deformation

گذاشته شده است و پس از نصب حسگرها به منظور جلوگیری از ورود خاک به سازه دو طرف آن با دو صفحه قوم نازک پوشانده شده است.

۴-۱-۴. دستگاه ثبت داده‌ها و حسگرها

دستگاه ثبت داده‌ها: مهم‌ترین مسئله در مدل‌سازی انفجار در دستگاه سانتریفیوژ دستگاه ثبت داده یا دیتا لاگر^۱ است. دیتا لاگرهای این قبیل آزمایش‌ها به علت اینکه انفجار ذاتاً یک پدیده آنی است که در چند میلی ثانیه رخ می‌دهد و به علاوه، به دلیل اینکه در دستگاه سانتریفیوژ این زمان بر N (نسبت شتاب چرخش به شتاب ثقل) تقسیم می‌شود، باید قابلیت ثبت تعداد زیادی داده در ثانیه را داشته باشند. فرکانس نمونه‌برداری در دیتالاگر به کار رفته در این آزمایش ۱۰۰ KHz است، یعنی ۱۰۰۰۰۰ داده در ثانیه توسط این دیتا لاگر ثبت می‌شود. در زیر جدولی آورده می‌شود که نشان دهنده تعداد داده‌های ثبت شده در یک ثانیه برای آزمایش کاتر [۱۳]، زیمی [۱۴] و آزمایش حاضر دارد.



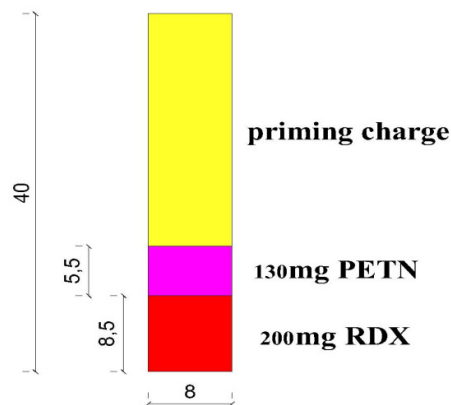
شکل ۶. سازه زیرزمینی مدل شده در آزمایش

جدول ۳. مقایسه تعداد داده‌های ثبت شده

تعداد داده در ثانیه	آزمایش
۶۶۵۰۰	کاتر [۱۳]
۱۵۰۰۰	زیمی [۱۴]
۱۰۰۰۰۰	آزمایش حاضر

جدول (۳)، نشان دهنده این موضوع است که سرعت نمونه‌برداری دستگاه در مقایسه با تحقیقات جهانی در این زمینه قابل قبول است.

حسگرها: مشخصه اصلی حسگرهایی که در سانتریفیوژ مورد



شکل ۴. اجزای تشکیل دهنده چاشنی انفجاری مورد استفاده در آزمایش (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

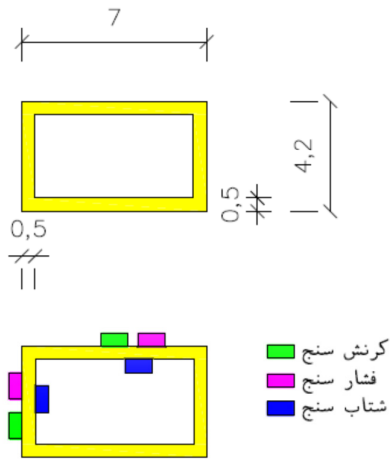


شکل ۵. تصویر چاشنی انفجاری مورد استفاده در آزمایش

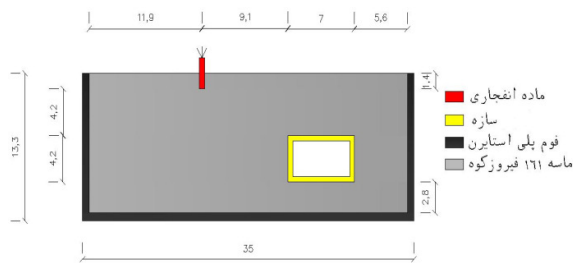
۴-۱-۳. سازه زیرزمینی

با توجه به توضیحات ارائه شده در قسمت ۳-۲، در این آزمایش برای مدل‌سازی یک سازه زیرزمینی با جنس بتن مسلح در واقعیت از یک سازه با جنس آلومینیوم استفاده شده است. آلومینیوم مورد استفاده در این آزمایش، از جنس آلومینیوم ۷۰۷۵ با مدول الاستیسیته ۷۱/۷ Gpa می‌باشد. مدول الاستیسیته بتن مسلح سازه واقعی مورد نظر در آزمایش ۲۳/۲۷ Gpa در نظر گرفته شده است. چون آزمایش در شتاب ۷۰ g انجام می‌شود طبق رابطه (۶)، یک سازه بتنی با ضخامت ۵۰ cm در واقعیت معادل یک سازه آلومینیومی با ضخامت ۵ mm در مقیاس سانتریفیوژی است. سازه زیرزمینی مدل شده به ترتیب دارای طول، عرض و ارتفاع ۱۰، ۶ و ۶ سانتی‌متر است که در شتاب ثقل ۱ g معادل یک سازه به طول و عرض و ارتفاع ۷، ۴/۲ و ۴/۲ متر می‌باشد. تصویری از سازه زیرزمینی در مقیاس مدل از جنس آلومینیوم در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۶) دیده می‌شود دو طرف مدل به دلیل اینکه به راحتی بتوان حسگرها را بر آن نصب کرد، باز

^۱ Data Logger



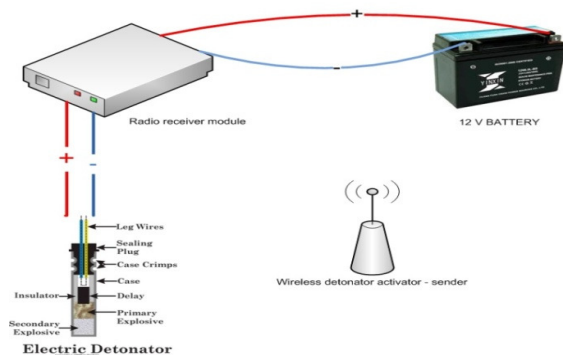
شکل ۷. موقعیت حسگرها بر روی سازه و ابعاد سازه در مقیاس واقعی (ابعاد بر حسب متر می‌باشد)



شکل ۸. نحوه قرارگیری سازه و ماده انفجاری در خاک در مقیاس واقعی (ابعاد بر حسب متر می‌باشد)

۴-۲-۲. نصب و انفجار ماده انفجاری

مسئله دیگری که در این‌گونه آزمایش‌ها مورد اهمیت است واحد کنترل ماده انفجاری است. ماده انفجاری مورد استفاده در این آزمایش‌ها الکتریکی می‌باشد که باید در حین چرخش سانتریفیوژ، در شتاب مورد نظر منفجر شود. برای این منظور یک واحد کنترل انفجار ساخته شد که بر بازوی سانتریفیوژ نصب گردید و در فاصله دور در حین چرخش به صورت بی‌سیم کنترل می‌شد. در شکل (۹) نمای شماتیک این‌گونه واحدهای کنترل نشان داده شده است.



شکل ۹. نمای شماتیک واحد کنترل انفجار

استفاده قرار می‌گیرند این است که به دلیل محدودیت فضا به اندازه کافی از لحاظ ابعاد کوچک باشند. در ضمن نباید به دلیل وزن خود، اینرسی زیادی ایجاد نمایند. این حسگرها در مقایسه با حسگرهایی که برای آزمایش‌های تمام مقیاس استفاده می‌شوند بسیار کوچک‌تر هستند. جدا از مشخصه قبلی چون این حسگرها برای آزمایش انفجار استفاده می‌شوند باید از ظرفیت بالایی برخوردار باشند. باری که انفجار بر حسگرها اعمال می‌کند بسیار بیشتر از بارگذاری‌های معمول در سایر آزمایش‌های سانتریفیوژ می‌باشد. پس در نظر گرفتن دو ویژگی برای یک حسگر مطلوب، در مدل‌سازی انفجار در سانتریفیوژ ضروری است: ابعاد و ظرفیت حسگرها.

دسترسی به این‌گونه حسگرها در کشور به طور مستقیم وجود ندارد، هزینه و مشکلات تهیه این حسگرها به دلیل محدودیت‌ها، دسترسی به این حسگرها را مشکل کرده است. برای پروژه حاضر از حسگرهای شتاب‌سنج و فشارسنج شرکت TML استفاده شده است. با توجه به محدودیت تهیه حسگر از آمریکا بهترین جایگزین برای تهیه حسگرها شرکت TML ژاپن می‌باشد. با این حال حسگرهای این شرکت به اندازه کافی از ظرفیت بالایی برخوردار نیستند. در این آزمایش از ۶ حسگر استفاده شده است (۲ عدد شتاب‌سنج، ۲ فشارسنج و ۲ عدد کرنش‌سنج). ظرفیت شتاب‌سنج‌ها و فشارسنج‌ها و کرنش‌سنج‌ها به ترتیب برابر 1000 g ، 3 Mpa و 2% هستند. فشارسنج‌ها و شتاب‌سنج‌ها از شرکت TML ژاپن تهیه شده‌اند و کرنش‌سنج‌ها ساخت شرکت Zemmig هلند می‌باشند.

۴-۲-۴. انجام آزمایش

۴-۲-۴-۱. آماده سازی مدل سانتریفیوژی

حسگرهای مورد نظر با آرایشی که در شکل (۷)، نشان داده شده است بر روی مدل نصب شده‌اند. جعبه سانتریفیوژ که نمونه در آن ساخته شد به ترتیب دارای طول، عرض و ارتفاع ۲۰، ۱۹ و ۱۹ سانتی‌متر بود. به منظور حذف اثر بازگشت موج انفجار در اثر برخورد با دیواره‌ها، دیواره این جعبه از داخل توسط فوم پلی استایرن به ضخامت ۱ سانتی‌متر پوشانده شد. نحوه نمونه‌سازی در این آزمایش استفاده از روش بارش خشک می‌باشد که برای این منظور یک سینی با کف مشبک تهیه شد. خاک مورد استفاده در این آزمایش ماسه ۱۶۱ فیروز کوه بود. خاک در لایه‌های ۲ سانتی‌متری توسط این سینی از ارتفاع ثابت ۴۰ سانتی‌متری برای هر لایه به داخل جعبه سانتریفیوژ ریخته شد. درصد تراکم به دست آمده در این حالت، حدود ۹۰ درصد بود. در شکل (۸) نحوه قرار گرفتن سازه و ماده انفجاری در مقیاس واقعی آورده شده است. جداره‌ای از سازه که حسگرها بر آن نصب شده‌اند به سمت ماده منفجره قرار گرفته است و جداره دیگر به سمت دیواره جعبه سانتریفیوژ قرار گرفته است.

۴-۲-۳. انجام آزمایش و ثبت داده

آزمایش مورد نظر در شتاب ۷۰ g انجام شد. سرعت چرخش سانتریفیوژ در این شتاب ۲۵۸ rpm بود. هنگامی که شتاب سانتریفیوژ به شتاب ۷۰ g رسید، پس از چند ثانیه ماده انفجاری توسط واحد کنترل منفجر شد و داده‌ها توسط دیتا لاگر ثبت شدند و به صورت بی‌سیم به رایانه ارسال گردیدند.

۴-۳. نتایج و بحث

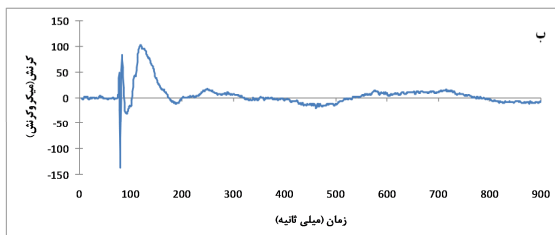
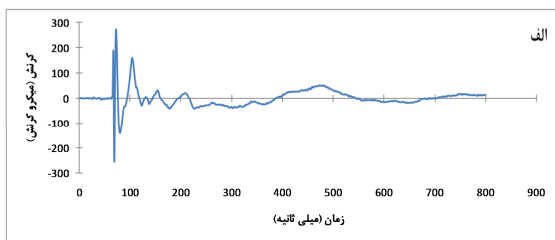
نتایج آزمایش سانتریفیوژی انجام شده در قالب تاریخچه زمانی شتاب، فشار و کرنش می‌باشد که در ادامه به تفکیک آورده شده است. نتایج در مقیاس واقعی آورده شده‌اند.

۴-۳-۱. کرنش

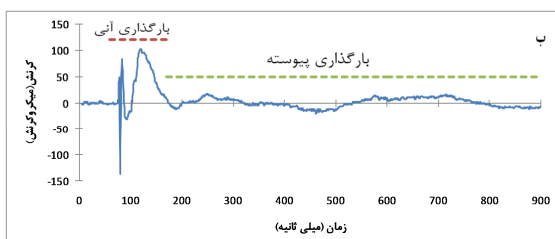
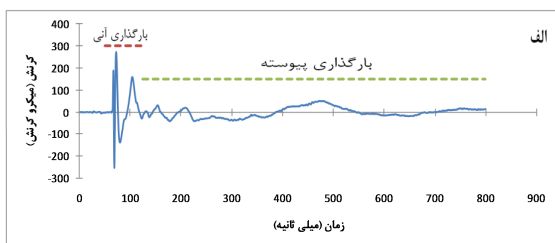
بارگذاری انفجار بر سازه‌های زیرزمینی در قالب دو سازوکار بارگذاری دسته‌بندی می‌شود [۲۳]: ۱- بارگذاری ناشی از اندرکنش موج تنش و سازه زیرزمینی: این بارگذاری ناشی از برخورد جبهه موج تنش با سازه می‌باشد. این بارگذاری آنی بوده و در مدت زمان کمی اتفاق می‌افتد و آن را بارگذاری آنی نیز می‌نامند. ۲- بارگذاری ناشی از نیروی اینرسی خاک موجود بین سازه و حفره انفجاری: این بارگذاری پس از این که جبهه موج از سازه عبور کرد رخ می‌دهد و ناشی از شتاب خاک موجود بین سازه و حفره انفجاری است. زمان این بارگذاری در مقایسه با بارگذاری نوع اول طولانی‌تر بوده و آن را بارگذاری پیوسته نیز می‌نامند. در شکل (۱۰) تاریخچه زمانی کرنش برای تاج و دیواره سازه در مقیاس واقعی نشان داده شده است. در این نمودار، کرنش فشاری منفی و کرنش کششی مثبت می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود حداکثر کرنش برای تاج و دیواره به ترتیب برابر $271/357$ و $-136/463$ میکرو کرنش می‌باشد. در شکل (۱۱) دو سازوکار بارگذاری آنی و پیوسته برای کرنش تاج و جداره نشان داده شده است. و همان‌گونه که انتظار می‌رفت رفتاری مشابه با آنچه در سایر تحقیقات سانتریفیوژی مشاهده شده است [۲۳] در این نمودار مشاهده می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود میزان بارگذاری پیوسته در تاج قابل ملاحظه‌تر از جداره است.

۴-۳-۲. فشار

در شکل (۱۲) تاریخچه زمانی فشار برای تاج و دیواره سازه در مقیاس واقعی نشان داده شده است. در این نمودار فشار مثبت و کشش منفی می‌باشد. در آیین‌نامه TM 5-855-1، روابطی برای محاسبه حداکثر فشار ناشی از انفجار آورده شده است [۲۴]. این روابط مربوط به نقاطی هستند که در داخل خاک و یا در محل اتصال خاک و سازه قرار دارند. حداکثر فشار ثبت شده در آزمایش تاج و دیواره به ترتیب $110/380$ و $570/625$ کیلو پاسکال می‌باشند. این مقدار با استفاده از رابطه (۷) که در آیین‌نامه TM 5-855-1 ذکر شده است، برای تاج و دیواره سازه به ترتیب $250/9$ و $528/5$ کیلو پاسکال به دست می‌آید.



شکل ۱۰. تاریخچه زمانی کرنش الف (تاج و ب) جدار



شکل ۱۱. سازوکار بارگذاری پیوسته و آنی کرنش در الف (تاج و ب) جدار

$$P = \rho c \times f \times 160 \times Z^{-n}$$

$$P = (\text{psi}) \text{ حداکثر فشار}$$

$$\rho = (\text{pcf}) \text{ چگالی خاک}$$

$$c = (\text{fps}) \text{ سرعت موج فشاری}$$

$$f = \text{ضریب اتصال}$$

$$n = \text{ضریب استهلاک}$$

$$Z = \frac{R}{W^3}$$

$$R = (\text{ft}) \text{ فاصله انفجار تا نقطه مورد نظر}$$

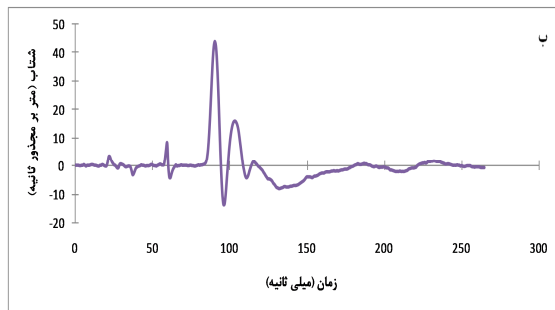
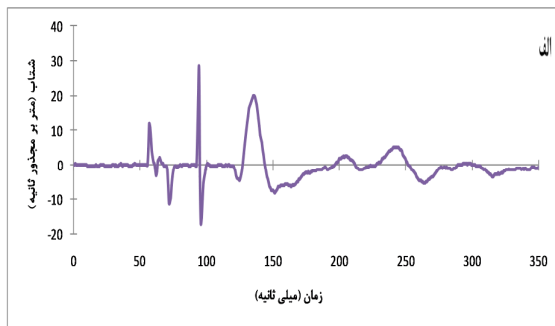
$$W = (\text{lb}) \text{ وزن ماده انفجاری بر حسب تی ان تی}$$

در فرمول بالا f وابسته به عمق انفجار و مقدار ماده منفجره است و n بسته به نوع خاک تغییر می‌کند. قابل ذکر است با توجه به اینکه انفجار پدیده‌ای بسیار پیچیده بوده و نیازمند مطالعات گسترده و بسیار هزینه‌بر می‌باشد تاکنون رابطه واحدی برای محاسبه فشار حداکثر انفجار ارائه نگردیده است. به طوری که برای انفجار در هوا که ساده‌ترین حالت انفجار می‌باشد، تاکنون روابط زیادی ارائه گردیده است که گاهی برای یک شرایط یکسان نتایج مشابهی نمی‌دهند. حال که در شرایط انفجار در خاک موضوع بسیار پیچیده‌تر

سازه انجام می‌شود. امکان دارد تحت یک شوک ناشی از انفجار که بسیار کمتر از شوک مورد نیاز برای گسیختگی سازه است تجهیزات درون سازه با مشکل مواجه شوند و عملکرد مناسبی از خود نشان ندهند. حال به منظور محافظت تجهیزات از این آسیب باید مقدار شوک داخلی سازه معلوم شود تا تجهیزات بر اساس آن طراحی و نصب شوند [۲۴ و ۲۶]. برای ارزیابی شوک داخلی سازه می‌توان با نصب شتاب‌سنج‌ها به نحوی که در شکل (۷) نشان داده شده است، اقدام نمود. قابل ذکر است که هنوز رابطه جامعی برای ارزیابی شوک داخل سازه ارائه نشده است و روابط به بررسی حالات خاص پرداخته‌اند. در شکل (۱۳) تاریخچه زمانی شتاب برای تاج و دیواره سازه در مقیاس واقعی نشان داده شده است. حداکثر شتاب ثبت شده در نمودار برای تاج و دیواره به ترتیب ۲۷/۵۰ و ۴۳/۶۹ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. در شکل (۱۴) طیف فوریه شتاب تاج و جداره رسم شده است. برای به دست آوردن فرکانس غالب به این صورت عمل می‌شود که اگر حداکثر دامنه طیف A باشد خطی به موازات محور فرکانس به اندازه A/2 رسم می‌شود. دورترین نقاطی که از تلاقی این خط و طیف فوریه به دست می‌آید، F₁ و F₂ نامیده می‌شود (شکل ۱۵). فرکانس غالب F، میانگین این دو مقدار است [۲۷].

$$F = 0.5(F_1 + F_2) \quad (10)$$

با این روش، فرکانس غالب برای شتاب تاج و جداره به ترتیب ۲۵/۲۴ و ۴۴/۸۰ هرتز می‌باشد که در محدوده فرکانس معمول در بارگذاری انفجار می‌باشد [۲۷].



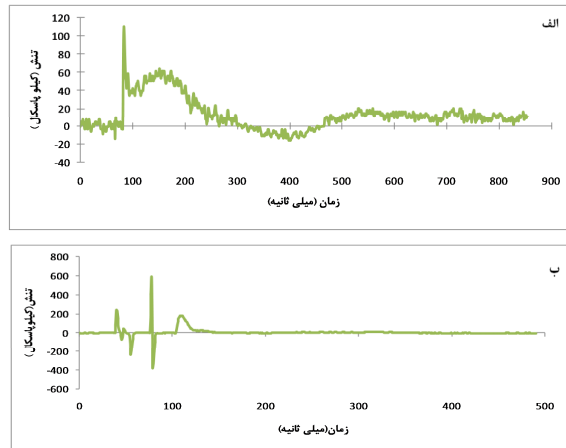
شکل ۱۳. تاریخچه زمانی شتاب (الف) تاج و (ب) جداره

می‌شود و پارامترهای بسیاری در پیش بینی‌ها وارد می‌گردد. برای مثال هنریچ [۲۵] برای محاسبه فشار میدان آزاد در ماسه لوم دار با آزمایشاتی که انجام داد رابطه (۸) را ارائه نمود. برای همین خاک در آیین‌نامه TM 5-855-1 به منظور محاسبه فشار میدان آزاد رابطه (۹) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود رابطه آیین‌نامه تقریباً ۱/۵ برابر رابطه به دست آمده از آزمایشات هنریچ می‌باشد. با این تفاسیر نتایج حاصل از آزمایش حاضر با نتایج حاصل از روابط آیین‌نامه آمریکا نزدیکی قابل قبولی دارد.

$$P = 1.11 \times Z^{-2.7} (\text{Mpa}) \quad (8)$$

$$P = 1.92 \times Z^{-2.7} (\text{Mpa}) \quad (9)$$

لازم به ذکر است با وجود این که آیین‌نامه TM 5-855-1 معتبرترین و جامع‌ترین آیین‌نامه در زمینه مباحث انفجار در خاک است اما روابط آن بر پایه روابط تجربی بوده و نتایج به دست آمده از آیین‌نامه غالباً مقدار قابل توجهی بیشتر از مقادیر واقعی است. بهتر بود برای مقایسه نتایج آزمایش حاضر با مطالعات گذشته از آیین‌نامه‌ها و مطالعات جدیدتر و دقیق‌تر استفاده می‌شد اما به دلیل این که شرایط ژئوتکنیکی آزمایش حاضر (ماسه سیلیکاته، بد دانه بندی شده، با درصد تراکم بالا و خشک) با این قبیل مطالعات هم‌خوانی نداشته، به مقایسه نتایج با TM 5-855-1 بسنده شده است.



شکل ۱۲. تاریخچه زمانی فشار (الف) تاج و (ب) جداره

۳-۳-۴. شتاب

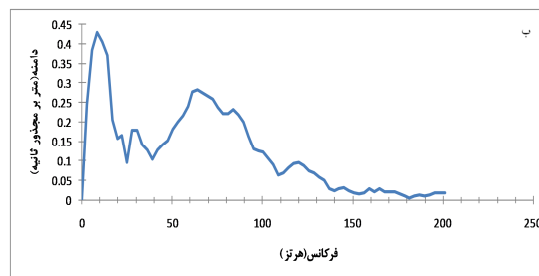
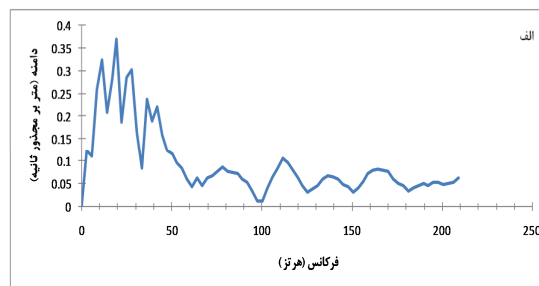
هنگامی که شوک زمین به سازه مدفون ضربه وارد می‌نماید، تکان‌هایی در سازه ایجاد می‌شود که به این تکان‌ها، شوک داخلی سازه گفته می‌شود. تجهیزات نصب شده درون سازه تحت اثر این حرکات تحمیلی، دچار نوسان خواهند شد [۲۶]. شوک داخلی سازه بر روی ایمنی و عملکرد صحیح تجهیزات مورد استفاده در سازه اثر می‌گذارد و یک مسئله مهم به منظور بررسی می‌باشد. طراحی سازه‌های زیرزمینی در برابر انفجار بر مبنای جلوگیری از گسیختگی

۶. تشکر و قدردانی

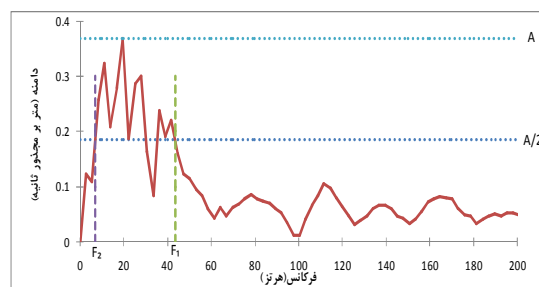
نویسندگان این مقاله کمال تشکر و سپاس را از مدیریت و کارکنان پژوهشکده مهمات سازی مهام به منظور تهیه چاشنی مورد استفاده در این آزمایش را دارند.

۷. مراجع

- [1] Fallahzadeh, P. "Assessment of Underground Structure Damages Due to Blast Loading"; MSc. Thesis, Iran Univ. of Sci. and Tech., CED, 2009 (In Persian).
- [2] Ishikawa, N.; Beppu, M. "Lessons from Past Explosive Tests on Protective Structures in Japan"; Int. J. Impact Eng. 2006, 34, 1535-1545.
- [3] Gui, M. W.; Chien, M. C. "Blast-Resistant Analysis for a Tunnel Passing Beneath Taipei Shongsan Airport - a Parametric Study"; Geotech. Geol. Eng. 2004, 24, 227-248.
- [4] Kim, S.; Jeong, W.; Jeong, D.; Seok, J. "Numerical Simulation of Blasting at Tunnel Contour Hole in Jointed Rock Mass"; Tunn. Undergr. Sp. Tech. 2006, 21, 306-307.
- [5] Shin, J. H.; Moon, H. G.; Chae, S. E. "Effect of Blast-Induced Vibration on Exiting Tunnels in Soft Rocks"; Tunn. Undergr. Sp. Tech. 2011, 26, 51-61.
- [6] Jiang, N.; Chuanbo, Z. "Blasting Vibration Safety Criterion for a Tunnel Liner Structure"; Tunn. Undergr. Sp. Tech. 2012, 32, 52-57.
- [7] Xia, X.; Li, H. B.; Li, J. C.; Liu, B.; Yu, C. "A Case Study on Rock Damage Prediction and Control Method for Underground Tunnels Subjected to Adjacent Excavation Blasting"; Tunn. Undergr. Sp. Tech. 2013, 35, 1-7.
- [8] Schmidt, R. M.; Holsapple, K. A. "Theory and Experiments on Centrifuge Cratering"; J. Geophys. Res. 1980, 85, 235-251.
- [9] Schmidt, R.; Housen, K. "Some Recent Advances in the Scaling of Impact and Explosion Cratering"; Int. J. Impact Eng. 1987, 5, 543-560.
- [10] Fan, Y.; Chen, Z.; Liang, X.; Zhang, X.; Huang, X. "Geotechnical Centrifuge Model Tests for Explosion Cratering and Propagation Laws of Blast Wave in Sand"; J. Zhejiang Univ. Sci. 2013, 13, 335-343.
- [11] Walsh, A. J.; Charlie, W. A. "Stress Wave Propagation in Unsaturated Sands. Vol. I: Centrifuge Modeling"; Eng. Research to Air Force Civil Eng. Support Agency, No. ESL-TR-92-73 Vol. I, 1993.
- [12] Dowden, N.; Charlie, W. "Blast-Induced Stress Wave Propagation in Unsaturated Sand: Comparison Between Centrifuge Modeling and Prototype"; Final Report to AFCESA/RACS, Contract No. F08635-90-CR0306, 1995.
- [13] Kutter, B. L.; O'Leary, L. M.; Thompson, P. Y.; Lather, R. "Gravity-Scaled Tests on Blast-Induced Soil-Structure Interaction"; J. Geotech. Eng-ASCE. 1988, 114, 431-447.
- [14] Zimmie, T.; De, A. "Centrifuge Modeling of Surface Blast Effects on Underground Structures"; Geotech. Test J. 2007, 30, 88-93.
- [15] Mirzeinali, S. H.; Baziar, M. H.; Rabeti Moghadam, M.; Hashemi, H. R. "Determination of Maximum Free Field Explosion Pressure of Conventional Projectiles in Soil for Modeling of Blast Loading Effect on the Underground and Above Ground Structures using FLAC Software"; 1st Conf. on Passive Defence and Resistant Structures, Noshirvani Babol Univ., 2010 (In Persian).
- [16] Mirzeinali, S. H.; Baziar, M. H.; Hashemi, H. R.; Rabeti Moghadam, M. "Effect of Blast Loading on Shallow Depth Tunnels using FLAC Software: Case Study of Karaj Subway";



شکل ۱۴. طیف فوریه شتاب الف) تاج و ب) جداره



شکل ۱۵. نحوه محاسبه فرکانس غالب [۲۷]

۵. نتیجه گیری

در مقایسه با آزمایش‌های میدانی انفجار، مدل‌سازی سانتریفیوژی این پدیده دارای هزینه و خطرات بسیار کمتری می‌باشد. بر اساس روابط مدل‌سازی در سانتریفیوژ می‌توان اثر مقدار زیادی ماده منفجره را با استفاده از مقدار کمی ماده منفجره بررسی نمود. در این مقاله ضمن تشریح اصول و قواعد مدل‌سازی انفجار در سانتریفیوژ، تجهیزات مورد نیاز برای این‌گونه آزمایش‌ها نیز توضیح داده شد. در پایان نتایج حاصل از انجام یک مدل‌سازی انفجار در سانتریفیوژ به صورت تاریخچه زمانی شتاب، کرنش و فشار برای دو نقطه مختلف از سازه ارائه شد.

نتایج این آزمایش تخمین مناسبی از میزان بار وارد بر سازه زیرزمینی در اثر انفجار را ارائه می‌دهد. از نتایج این آزمایش می‌توان برای طراحی سازه‌های زیرزمینی در برابر انفجار و یا صحت‌سنجی نرم‌افزارهای عددی جهت مطالعات وسیع‌تر استفاده نمود. از نتایج حاصل از شتاب‌سنج‌ها می‌توان برای طراحی صحیح تجهیزات و تأسیسات داخل این‌گونه سازه‌ها در برابر شوک ناشی از انفجار استفاده نمود. نتایج ارائه شده از لحاظ سازوکار اعمال بار و مقادیر بارگذاری انطباق خوبی با سایر تحقیقات و آیین‌نامه 5-855-TM دارد.

- [22] Abuhajar, O.; Naggar, H.; Newson, T. "Effects of Underground Structures on Amplification of Seismic Motion for Sand with Varying Density"; In proc. of the Int. Conf. on Geotechnical 2011, 1-6.
- [23] Davies, M. C. R. "Dynamic Soil Structure Interaction Resulting from Blast Loading"; In proc. of the Int. Conf. on Centrifuge 1994, 319-324.
- [24] TM 5-855-1 "Fundamental of Protective Design for Conventional Weapons"; US Army Eng. Waterways Experiment Station, 1984.
- [25] Henrych, J. "The Dynamics of Explosion and Its Use"; Chapter 5. Elsevier: New York, 1979.
- [26] Draft of No. 21 National Building Regulations of Iran "Passive Defense"; 6th Ed., 2009 (In Persian).
- [27] Yong, Lu. "Underground Blast Induced Ground Shock and Its Modeling Using Artificial Neural Network"; Comput. Geotech. 2005, 32, 164-178.
- 1st Conf. on Passive Defense and Resistant Structures, Noshirvani Babol Univ, 2010 (In Persian).
- [17] Phillips, E. "De L'équilibre Des Solides élastiques Semblables"; C. R. Acad. Sci. 1869, 68, 75-79.
- [18] Pokrovskii, G. I.; Fiodorov, I. S. "Studies of Soil Pressures and Deformations by Means of a Centrifuge"; In Proc. 1st Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Eng. 1936, 70.
- [19] Shahandeh, Sh. "Tunnel Deformation and Stability in Sandy Ground with Soft Horizontal Layers"; MSc. Thesis, Iran Univ. of Sci. and Tech., CED, 2010 (In Persian).
- [20] Salehzadeh, H.; Baziar, M. H. "Construction of a Geotechnical Centrifuge Equipment with 85cm Arm"; In Proc. 2st National Congress of Civil Eng. 2003, 174-182 (In Persian).
- [21] Taylor, R. N. "Geotechnical Centrifuge Technology"; Blackie Academic and Professional, 1995.