محکم علمی بروینی «علوم وخاوری کمی بداخد نوین» سال پنجم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۳؛ ص ۴۱–۳۱

نحوه مدلسازی اثر انفجار بر سازههای زیرزمینی در دستگاه سانتریفیوژ محمد حسن بازیار^{(*}، حسین صالح زاده^۲، محمد کاظمی ورنامخواستی^۳، مسعود رابطی مقدم^٤ ۱- استاد، ۲- دانشیار، ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک و ٤- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت: ۹۲/۰۴/۰۳، پذیرش: ۹۲/۱۲/۲۰)

چکیدہ

در مقاله حاضر، پس از توضیح اصول و قواعد مدلسازی فیزیکی با دستگاه سانتریفیوژ در ژئوتکنیک، کاربرد این اصول در مدلسازی 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 نامهها و تحقیقات گذشته دارد. از نتایج این مطالعه میتوان برای درک بهتر اثر بارگذاری انفجار بر سازههای زیرزمینی و در صورت لزوم صحت سنجی نرمافزارهای عددی جهت مطالعات وسیعتر استفاده کرد.

كلیدواژهها: سانتریفیوژ، مدلسازی 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

۳۲

استفاده از فضاهای زیرزمینی با توجه به رشد جمعیت و مشکلات حمل و نقل یکی از مؤلفههای زیر بنایی کشورهای در حـال توسـعه است. بدین منظور حفظ جان انسان ها و سرویس دهی آن ها 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 این گونه 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 می شود که تاکنون عمده فعالیت های صورت گرفته در این زمینه، در سه بخش مطالعات میدانی (بزرگ مقیاس)، مطالعات عددی و مطالعات آزمایشگاهی (کوچک مقیاس) دستهبندی می گردد. 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 معدود مطالعات میدانی که در این زمینه انجام گرفته است می توان به آزمایشات انجام شده توسط پروفسور جو حاجی نام برد که از سرهنگان ارتش ژاپن قبل از جنــگ جهـانی دوم مــیباشـد. ایــن آزمـایشهـا مـابین سالهای ۱۹۲۸تا ۱۹۴۵ انجام شده و توسط ایشیکاوا و بپو [۲] گزارش شده است. از مواردی که در ایـن آزمـایشهـا بررسـی شـده 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، می توان به FLAC, ABAQUS, LS-DYNA اشاره نمود. على رغم اينكه مطالعات عددي نسبت به مطالعات میدانی بسیار کم هزینهتر و سادهتر هستند، اما اعتماد به نتايج اين گونه مطالعات نيازمند صحت سنجى نرمافزار مورد استفاده می باشد.

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 می وان به مطالعات کیم و همکاران [۴]، شین و همکاران [۵]، نان ژیانگ و چوآنبو [۶] و ژیا و همکاران [۷] اشاره نمود.

همان طور که گفته شد به علت این که مطالعات میدانی پر هزینه

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 مطمئن تر و کم هزینه تر برای بررسی اثر بارگذاری انفجار انتخاب کردند. آزمایش هایی نظیر مدلسازی سانتریفیوژی علاوه بر اینکه نسبت به آزمایشهای میدانی بسیار کم هزینه و کم خطر میاشند، 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 آزمایش ها تغییر کند. حال می توان با استفاده از ارتباط بین اعداد بی بعد متغیر که با انجام آزمایشها به دست میآید، بر اساس نوع و مقدار ماده منفجره و خصوصيات خاك به محاسبه حجم حفره انفجارى پرداخت. اشميت از جمله محققینی است که در این زمینه مطالعات فراوانی انجام داده است [۸ و ۹]. از جدیدترین مطالعات انجام شده در این زمینه می توان 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 می پردازنـد. از مطالعات انجام گرفته در این زمینه می توان به مطالعات والش و چارلی [۱۱]، چارلی و دودن [۱۲] و فن و همکاران اشاره نمود [۱۰]. در زمینه بررسی اثر انفجار بر سازه زیرزمینی محققین با 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 شــتابهـای مختلـف، و ۹۸ و ۹۸ و ۱۶ پرداخـت. سازه زیرزمینی مورد استفاده وی مبین یک تونل بود. وی به دلیل اینکـه آزمایشها را برای شتاب ثقلها و مقیـاسهـای مختلـف انجـام داد، مشاهده کرد که مدلسازی مدلها بسیار مطلوب بوده و ایـن بیـانگر رابطهای برای حفره انفجاری در ماسـه ۲۰۰۰ سازی است. وی همچنـین زیمی [۱۴] به مـدلسازی فیزیکی اثـر انفجارهـای سطحی بـر سازههای زیرزمینی پرداخت. سازه زیرزمینی مدل شـده توسط وی سازههای زیرزمینی پرداخت. سازه زیرزمینی مدل شـده توسط وی بالای سازه و جنس مصالح پوشش بالای سازه را تغییر داد و نتایج را در قالب تاریخچه زمانی کرنش، که توسط نوزده کـرنشسـنج نصب شده بر تونل ثبت شده بود، مقایسه کرد. نتیجه آزمایشهـا بـه ایـن

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 ۲/۷ متر خاک و ۲/۹ متر ژئوفوم باشد، کرنش محوری اندازهگیری شده در یک چهارم دهانه نسبت به حالتی که ضخامت پوشش خاک بالای سازه ۳/۶ متر باشد، حدود ۶۴ درصد کاهش پیدا میکند. وی آزمایشات را در شتاب ثقل g ۷۰ 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]. مقالـه 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 پرداختـه شود و سپس نحوه مدلسازی انفجار در سانتریفیوژ برای بررسی اثر انفجار بر سازههای زیرزمینی تشریح شود. در پایان نتایج حاصل از سانتریفیوژ دانشگاه علـم و صنعت ایـران انجام شـده است. ارائـه میشود. از نتایج این مطالعه میتوان بـرای بررسی اثـر بارگـذاری انفجار بر سازههای زیرزمینی و صحت سنجی نـرمافزارهای عـددی انفجار بر سازههای زیرزمینی و صحت سنجی نـرمافزارهای عـددی

۲. قـــوانین حـــاکم بـــر مـــدلســازی فیزیکـــی 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، فیلیـپس اسـتفاده از نیروهـای اینرسـی به ویژه نیروی سانتریفیوژی را پیشنهاد کرد. در این زمان به این ایده برای به دست آوردن شبیه سازی بین مدل و پروتوتایپ توجه نشد و تا سال ۱۹۳۰ برای مهندسین 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. آن ها 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 لولـههای مـدفون و نشسـت پیها. علی رغم این پیشرفت، ایده آزمایش بر روی مدل های

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، مهندسین شروع به استفاده از سانتریفیوژ در ژاپن و اروپای غربی کردند به طوری که اکنون تمایل همه گیری برای استفاده از آن به وجود آمده است [۱۹].

۲-۲. مدلسازی در سانتریفیوژ ژئوتکنیکی

آزمایشات سانتریفیوژی خاک از یافت. همای اخیر در مدل سازی پدیده های ژئوتکنیکی می باشد که به سرعت در جهان رشد داشته است. اصلی ترین دلیل علمی استفاده از مدل سازی سانتریفیوژ برای تحقیقات ژئوتکنیکی، غلبه بر وزن خود مصالح می باشد. رفت ار مکانیکی خاک به شدت غیر خطی و وابسته به سطح تنش می باشد. به منظور شبیه سازی دقیق یک نمونه در مقیاس کوچک، می بایست تنشهای درجا به درستی در مدل باز تولید شوند. برای ایجاد تنشهای ناشی از وزن نمونه اصلی در یک مدل با مقیاس ۱۸/۱، لازم است تا مدل تحت شتاب گرانشی N برابر شتاب گرانشی نمونه اصلی آزمایش شود. اگر یک مدل با مقیاس ۱۸/۱ در معرض شتاب N برابر شتاب گرانشی زمین قرار گیرد، ابعاد و بسیاری از فرآیندهای نمونه اصلی می بایست به درستی مقیاس شوند.

اساس کار سانتریفیوژ بر دوران توده خاک مدل، حول محوری قائم با سرعت زاویدای ثابت استوار است. بر حسب فاصله نمونـه خـاک، از محور دوران (شعاع دوران r) و نیز سرعت زاویدای دستگاه ۵۰ شتاب شعاعی برابر با 2 هت چندین برابر شتاب ثقل زمین (g) به توده خـاک وارد می شود و بنابراین وزن مخصوص معادل نمونه خاک از رابطه زیر به دست می آید (ρ چگالی خاک می باشد) [۲۰]:

(1)

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

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 نمونـه اصـلی و مدل سانتریفیوژی با مقیاس ۱/N را نشان میدهد. دیده میشود که

تنشها در نقاط مشابه در مدل و نمونه اصلی برابر هستند. پارامترهای مختلفی که در مدلسازی سانتریفیوژی مورد استفاده قرار می گیرند بر اساس روابط مقیاسی که از آنالیزهای ابعادی به دست می آیند با توانهای مختلف N مقیاس می شوند. جدول (۱)، قوانین مقیاسی برای پارامترهای مهم در مدل سازی های دینامیکی با سانتریفیوژ را نشان می دهد [11].



اشمیت [۸] عدد π زیر را بـرای مقیـاس کـردن انـرژی بـرای انـواع مختلف مواد انفجاری در سانتریفیوژ ارائه نمود.

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

G = شتاب ثقل

گرمای انفجار بر واحد جرم ماده انفجاری = Q

 $\delta = \delta$ چگالی مادہ انفجاری

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

$$W_{m} = \left(\frac{G_{p}}{G_{m}}\right)^{3} \left(\frac{Q_{m}}{Q_{p}}\right)^{3} \left(\frac{\delta_{m}}{\delta_{p}}\right) W_{p}$$
(7)

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

$$W_{m} = \left(\frac{G_{p}}{G_{m}}\right)^{3} W_{p} \tag{f}$$

این رابطه معادل نسبت انرژی مدل و نمونه است که در جدول مقیاسها ارائه شد. رابطه (۴) نشان می دهد که وزن ماده منفجره در سانتریفیوژ با توان سوم شتاب ثقل مدل می شود به این معنی که اگر ۱ گرم ماده منفجره در شتاب g ۱۰۰ منفجر شود معادل انفجار ۱ تن ماده منفجره در شتاب ثقل g ۱ 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].

مدل تحت اثر شتاب N برابر شتاب ثقل	مقياس نمونه واقعي	کمیت
$\frac{1}{N}$	1	طول
1	1	تنش
1	1	كرنش
$\frac{1}{N^2}$	1	نيرو
$\frac{1}{N}$	1	جابجايي
1	1	سرعت
Ν	1	شتاب
$\frac{1}{N}$	1	زمان دینامیکی
$\frac{1}{N^3}$	1	انرژی
$\frac{1}{N^3}$	1	جرم
$\frac{1}{N^4}$	1	سختي خمشي

جنس مادهای که برای مدل استفاده می شود طبق برقراری رابطه بین سختی خمشی مدل و نمونه اصلی انتخاب می شود
$$(17 \ e\ T7]$$
:
(۵) $(EI)_m = \frac{(EI)_p}{n^4}$

سختی خمشی=EI

مدول الاستيسيته=E

ممان اينرسى=I

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]: $t_p=Nt_m \left(\frac{E_m}{E_p}\right)^{\frac{1}{3}}$

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

¹ Prototype ² Model

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، می بایست سازه بتن مسلح در سانتریفیوژ با میکروبتن مدل میشد. این موضوع به این علت است که برقراری رابطه (۵) در حوزه الاستیک می باشد 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 نمی شود و این امر باعث به وجود آمدن خطا در نتایج می گردد. 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 مـدل و نمونـه اصلی عمـلاً غیـرممکن بـوده و معمـولاً تشابه سازی بر اساس مهم ترین پارامتری که مورد مطالعه محققین باشد، انجام می گیرد. در شرایط آزمایش حاضر محققین غالباً پارامتر مهم را تغییر شکل در نظر می گیرند که در این حالت مدلسازی صحیح با در نظر گرفتن نسبت سختی خمشی مدل و نمونـه اصـلی انجام مي شود [٢١].

۴. بخش تجربی

در این آزمایش یک سازه زیرزمینی در عمق ۵/۶ 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. وسایل و تجهیزات ۴–۱–۱. 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 نمی باشد، بنابراین آزمایش مورد نظر به منظور بررسی اثر بارگذاری انفجار در این دستگاه انجام گرفته است.

¹ Deformation



شکل ۳. تصویری از سانتریفیوژ دانشگاه علم و صنعت ایران

١٢٠	صنعت ايران [شگاه علم و ا	ژ ژئوتکنیکی دا	سانتريفيوز	ا. مشخصات	جدول '
-----	--------------	--------------	----------------	------------	-----------	--------

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

۴–۱–۲. ماده انفجاری

ماده انفجاری مورد استفاده در این آزمایش ترکیب PETN و PETN میباشد. در این آزمایش از ۱۳۰ میلی گرم PETN و ۲۰۰ میلی گرم PTN استفاده شده است که در مجموع ماده منفجرهای به وزن ۳۳۰ میلی گرم را تشکیل میدهند. به دلیل اینکه آزمایش در شتاب g ۲۷ معالی گرم را تشکیل می دهند. به دلیل اینکه آزمایش در شتاب g ۲۰۰ معادل انجام شده است، این مقدار ماده منفجره طبق رابطه (۴)، معادل انجام شده است، این ماده منفجره به عواملی نظیر انرژی آزاد شده بر و محمول اثر انفجاری، جنس پوشش ماده انفجاری را براند این را ازند که با اندا ماده منفجره ماده منفجره ماده منفرا معادل اینکه آزمایش در شتاب g ۲۰ معادل ۱۳۰ کیلو گرم ماده منفجره به عواملی نظیر انرژی آزاد شده بر و محیط اثر انفجار، شکل هندسی ماده انفجاری، جنس پوشش ماده انفجاری را اثر انفجار ی موارد و نظر گروه سازنده این چاشنی، مقدار TT معادل به صورت تقریبی برابر و محیط انفجار می انفرا (۴) تشکیل دهنده ماده انفجاری و در شکل (۴) اجزای تشکیل دهنده ماده انفجاری و در شکل (۵) تماد در شان داده شده است.





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 ایـن 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 ایـن آزمایش، از جـنس آلومینیوم ۲۰۷۵ با مـدول الاستیسیته ۲۰۱۷ Gpa میباشد. مدول الاستیسیته بتن مسلح سازه واقعی مورد نظر در آزمایش ۲۳/۲۷ می شود طبق رابطـه (۶)، یک چون آزمایش در شتاب g ۷۰ انجام میشود طبق رابطـه (۶)، یک سازه بتنـی با ضـخامت ۲۰۰۳ در واقعیت معادل یـک سازه آلومینیومی با ضخامت ۲۰ ۵ در واقعیت معادل یـک سازه سازه مدل شده به ترتیب دارای طول، عرض و ارتفاع ۱۰، ۶ و است. سازه با مادر میباشد. تصویری از سازه سانتیمتر است که در شتاب ثقل و ۱ معادل یک سازه به طول و زیرزمینی در مقیاس مدل از جنس آلومینیوم در شکل (۶) نشان داده شده است. همان طور که در شکل (۶) دیده میشود دو طرف مدل به دلیل اینکه به راحتی بتوان حسگرها را بر آن نصب کرد، باز

گذاشته شده است و پس از نصب حسگرها به منظـور جلـوگیری از ورود خاک به سازه دو طرف آن با دو صفحه فوم نازک پوشانده شده است.

۴-۱-۴. دستگاه ثبت دادهها و حسگرها

دستگاه ثبت داده ها: 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 ۱۰۰۰۰ 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

ول ۳. مقایسه تعداد دادههای ثبت شده

تعداد داده در	آ، ا ۵	
ثانيه	ارمایس	
880	کاتر [۱۳]	
10	زیمی [۱۴]	
۱۰۰۰۰	آزمایش حاضر	

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

¹ Data Logger

حسـگرها: مشخصه اصلی حسگرهایی که در سانتریفیوژ مورد استفاده قرار می گیرند این است که به دلیل محدودیت فضا به اندازه کافی از لحاظ ابعاد کوچک باشند. در ضمن نباید در مقایسه با حسگرهایی که برای آزمایشهای تمام مقیاس استفاده می شوند بسیار کوچکتر هستند. جدا از مشخصه قبلی چون این حسگرها برای آزمایش انفجار استفاده می شوند باید از اعمال می کند بسیار بیشتر از بارگذاری های معمول در سایر آزمایش های سانتریفیوژی می باشد. پس در نظر گرفتن دو ویژگی برای یک حسگر مطلوب، در مدل سازی انفجار در سانتریفیوژ ضروری است: ابعاد و ظرفیت حسگرها.

دسترسی به این گونه 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 می باشد. 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 و شتابسنجها از شرکت TML ژاپن تهیه شدهاند و کرنشسنجها ساخت شرکت Zemmic هلند می باشد.

۴-۲. انجام آزمایش ۴-۲-۱. آماده سازی مدل سانتریفیوژی

حسگرهای مورد نظر با آرایشی که در شـکل (۷)، نشـان داده شـده است بر روی مدل نصب شدهاند. جعبه سانتریفیوژ که نمونه در آن ساخته مشد به ترتیب دارای طول ، عـرض و ارتفاع ۵۰ ، ۲۰ 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 لايه به داخل جعبه سانتريفيوژ ريخته شد. درصد تراكم 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 دیوار جعبه سانتریفیوژ قرار گرفته است.





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 این گونه آزمایش ها مورد اهمیت است واحد کنترل ماده انفجاری است. ماده انفجاری مورد استفاده در این آزمایش ها الکتریکی می باشد 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 بی سیم کنترل می شد. در شکل (۹) نمای شماتیک این گونه واحدهای کنترل نشان داده شده است.



شکل ۹. نمای شماتیک واحد کنترل انفجار

۲-۴-۳. انجام آزمایش و ثبت داده

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

۴–۳. نتایج و بحث

نتایج آزمایش سانتریفیوژی انجـام شـده در قالـب تاریخچـه زمـانی شتاب، فشار و کرنش میباشد که در ادامـه بـه تفکیـک آورده شـده است. نتایج در مقیاس واقعی آورده شدهاند.

۴–۳–۱. کرنش

بارگذاری انفجار بر سازههای زیرزمینی در قالب دو سازوکار بارگذاری دستهبندی می شود [۲۳]: ۱- بارگذاری ناشی از اندر کنش موج تنش و سازه زیرزمینی: این بار گذاری 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. زمـان این بارگذاری در مقایسه با بارگذاری نوع اول طولانی تر 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. همان گونه که مشاهده می شود حداکثر کرنش برای تـاج و دیـواره به ترتيب برابر ۲۷۱/۳۵۷ + ۱۳۶/۴۶۳ - ميكرو كرنش ميباشد. در شکل (۱۱) دو سازوکار بارگذاری آنی و پیوسته برای کرنش تاج و جداره نشان داده شده است. و همان گونه که انتظار می رفت رفتاری مشابه با آنچه در سایر تحقیقات سانتریفیوژی مشاهده شده است [77] در این نمودار مشاهده می شود. همان گونه که مشاهده می شود میزان بار گذاری پیوسته در تاج قابل ملاحظه تر 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 آیین نامه 1-855-5 TM، 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 برای تاج و دیواره به ترتیب ۱۱۰/۳۸۰ و ۵۲۰/۶۲۵ کیلو پاسکال میباشند. این مقدار با استفاده از رابطه (۲) که در آیین نامه 1-855-5 TM ذکر شده است، برای تاج و دیواره سازه به ترتیب ۲۵۰/۹ و ۵۲۸/۵ کیلو پاسکال به دست میآید.



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

(Y)



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

P = (psi) حداکثر فشار φ = (pcf) = γ

پ د بی د د (fps) د مرج فشاری (c = (fps

f = 1 فريب اتصال

n = ضريب استهلاک

 $Z = \frac{R}{1}$

 $W^{\frac{1}{3}}$

R = (ft)فاصله انفجار تا نقطه مورد نظر W = (lb)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 می کند. قابل ذکر است با توجه به اینکه انفجار پدیدهای بسیار پیچیده بوده و نیازمند مطالعات گسترده و بسیار هزینهبر می باشد تاکنون رابطه واحدی برای محاسبه فشار حداکثر انفجار ارائه نگردیده است. به طوری که برای انفجار در هوا که سادهترین حالت انفجار می باشد، تاکنون روابط زیادی ارائه گردیده است که گاهی برای یک شرایط یکسان نتایج مشابهی نمی دهند. حال که در شرایط انفجار در خاک موضوع بسیار پیچیده تر

می شود و پارامترهای بسیاری در پیش بینیها وارد می گردد. 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 آیین نامه 1-858-5 TM به منظور محاسبه فشار میدان آزاد رابطه (۹) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود رابطه آیین نامه تقریباً ۱/۵ برابر رابطه به دست آمده از آزمایشات هنریچ می باشد. با این تفاسیر نتایج حاصل از آزمایش حاضر با نتایج حاصل از روابط آیین نامه آمریکا نزدیکی قابل قبولی دارد.

$$P = 1.11 \times Z^{-2.7}(Mpa)$$
 (A)

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

لازم به ذکر است با وجود این که آیین نامه 1-585 TM معتبرترین و جامع ترین آیین نامه در زمینه مباحث انفجار در خاک است اما روابط آن بر پایه روابط تجربی بوده و نتایج به دست آمده از این آیین نامه غالباً مقدار قابل توجهی بیشتر از مقادیر واقعی است. بهتر بود برای مقایسه نتایج آزمایش حاضر با مطالعات گذشته از آیین نامهها و مطالعات جدیدتر و تقیق تر استفاده می شد 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 هم خوانی نداشته، به مقایسه نتایج با 1-58-5 TM بسنده شده است.



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

۴–۳–۳. 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

سازه انجام می شود. 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 سازہ معلوم شود تا تجھیزات بر اساس آن طراحی و نصب شوند [۲۴ و ۲۴]. برای ارزیابی شوک داخلی سازه می توان با نصب شتاب سنجها 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 مقياس واقعى نشان داده شده است. حداكثر شتاب ثبت شده در نمودار برای تاج و دیواره به ترتیب ۲۷/۵۰ و ۴۳/۶۹ متر بر مجذور ثانیه می باشد. در شکل (۱۴) طیف فوریه شتاب تاج و جداره رسم شده است. برای به دست آوردن فرکانس غالب به این صورت عمل می شود که اگر حداکثر دامنه طیف A باشد خطی به موازات محور فرکانس به اندازه A/2 رسم می شود. دور ترین نقاطی که از تلاقی این خط و طیف فوریه به دست میآید،F1 و F₂ نامیده می شود (شکل ۱۵). فرکانس غالب F، میانگین این دو مقدار است [77].

$$F = 0.5(F_1 + F_2)$$
 (1.)

با این روش، فرکانس غالب بـرای شـتاب تـاج و جـداره بـه ترتیـب ۲۵/۲۴ و ۴۴/۸۰ هرتز میباشـد کـه در محـدوده فرکـانس معمـول در بارگذاری انفجار میباشد [۲۷].



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

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

- 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. Geophy. 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";







۵. نتیجهگیری

در مقایسه با آزمایشهای میدانی انفجار، مدلسازی سانتریفیوژی این پدیده دارای هزینه و خطرات بسیار کمتری می باشد. بر اساس روابط مدلسازی در سانتریفیوژ می توان اثر مقدار زیادی ماده منفجره را با استفاده از مقدار کمی ماده منفجره بررسی نمود. در این مقالله ضمن تشریح اصول و قواعد مدلسازی انفجار در سانتریفیوژ، تجهیزات مورد نیاز برای این گونه 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 صحت سنجی نرمافزارهای عددی جهت مطالعات وسیعتر استفاده نمود. از نتایج حاصل از شتابسنجها میتوان برای طراحی صحیح تجهیزات و تأسیسات داخل این گونه 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 آیین نامه 1-855-5 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.

41