

بررسی تأثیر شکل مقطع تونل بر پاسخ آن تحت بار انفجار با استفاده از آزمایش سانتریفیوژ

قاسم دهقانی اشکذری* ۱

علیرضا سعیدی عزیزکندی ۲

چکیده

با توجه به رشد جمعیت و مشکلات حمل و نقل، استفاده از فضاهای زیرزمینی یکی از مؤلفه‌های زیر بنایی کشورهای در حال توسعه است. سازه‌های زیرزمینی در شبکه انتقال آب نیز جایگاه مهمی دارند، ایمنی بسیاری از تأسیسات مهم مانند تأسیسات نیروگاه‌های برق آبی را نیز می‌توان با استفاده از سازه‌های زیرزمینی در مقابل تهدیدات حاصل از حملات نظامی یا تروریستی یا انفجارهای تصادفی افزایش داد. با توجه به اهمیت حمل و نقل و توزیع آب و تولید برق و ضرورت تداوم بهره‌برداری آن‌ها در مواقع تهدیدات، پرداختن به مباحث بارگذاری انفجاری، تحلیل و بررسی پاسخ و طراحی زیرزمینی در مقابل این نوع بارگذاری از اهمیت و ضرورت بالایی برخوردار است. در این پژوهش با استفاده از آزمایش‌های سانتریفیوژ به بررسی تأثیر شکل هندسی مقطع تونل بر پاسخ آن تحت اثر بارگذاری انفجار سطحی پرداخته شده است. تونل‌های مدل‌سازی شده در این تحقیق دارای سه مقطع مستطیلی، نعل اسبی و دایره‌ای می‌باشند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که برای طراحی سازه تونل در مقابل انفجار سطحی در صورتی که تجهیزات داخل تونل از اهمیت کمی برخوردار باشند یا نسبت به شوک حساس نباشند، به ترتیب مقاطع دایره‌ای، نعل اسبی و مستطیلی مقاطع مناسب‌تری برای تونل می‌باشند؛ اما از نظر شتاب و شوک وارد بر تجهیزات داخل تونل، بهترین و ایمن‌ترین مقطع برای تونل در برابر این نوع انفجار، مقطع نعل اسبی است.

واژه‌های کلیدی:

تونل، انفجار سطحی، سانتریفیوژ، شکل مقطع

۱ استادیار، دانشکده آمایش و پدافند غیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران ghdeas@yahoo.com

۲ استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

مقدمه

انجام مطالعات میدانی درزمینه‌ی اثر انفجار بر سازه‌های زیرزمینی علاوه بر صرف هزینه‌های زیاد، عوارض دیگری چون آلودگی‌های محیط‌زیستی را نیز به دنبال دارد که انجام آن‌ها را با محدودیت‌هایی مواجه کرده است. مطالعات میدانی انجام‌گرفته در این زمینه محدود است و از آن جمله می‌توان به آزمایش‌های انجام‌شده توسط ایشیکاوا (۲۰۰۶) اشاره نمود که رفتار سه نوع تونل مستقیم، شاخه‌ای و شبکه‌ای موردبررسی قرار داد. در آزمایش‌های تونل مستقیم از دو مقدار ماده منفجره استفاده شده و در نقاط مختلف در طول تونل، برای هر مقدار ماده منفجره، فشار، زمان رسیدن موج انفجار و سرعت رسیدن آن محاسبه شده است.

می‌توان به مطالعات صادق آذر و همکاران (۲۰۱۰) و یانگ (۱۹۹۷) اشاره نمود.

درروش جدانشده غیرکامل، پروسه انفجار و انتشار امواج ناشی از انفجار باهم ترکیب می‌شوند و سه مرحله به دو مرحله کاهش می‌یابد که مهم‌ترین آن‌ها روش‌های تفاضل محدود، اجزا محدود و روش‌های هیبریدی می‌باشند. این روش‌ها پروسه انفجار را در برنمی‌گیرند، بلکه معمولاً بارگذاری انفجار به‌وسیله یک تاریخچه زمانی فشار یا سرعت اعمال شده بر مرز مدل، ساده‌سازی می‌شود (صادق آذر و همکاران، ۲۰۱۰). جوی و چین در سال ۲۰۰۴ با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC به مطالعه تأثیر ویژگی‌های خاک از جمله سختی دینامیکی، مقاومت برشی زهکشی نشده، میرایی و شدت بار انفجاری بر روی تونل‌ها پرداخته است. ليو (۲۰۰۹) پاسخ غیرخطی تونل‌های زیرزمینی تحت بارگذاری انفجار را بررسی کرده است. ناگی و همکاران نیز در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ به بررسی تأثیر عمق قرارگیری ماده منفجره در انفجار مدفون همچنین تأثیر انفجار سطحی بر روی سازه‌های مدفون پرداختند.

درروش جدانشده کامل هر سه مرحله اشاره‌شده در یک مدل در نظر گرفته می‌شوند. برای مثال لو و ونگ^۱ (۲۰۰۵) با استفاده از این روش، خاک نزدیک محل انفجار را با استفاده از روش SPH و سازه و خاک دور از محل انفجار را با استفاده از روش اجزا محدود مدل‌سازی نمودند.

با توجه به هزینه و خطرپذیری مطالعات میدانی و پیچیدگی مطالعات عددی، محققین مطالعات آزمایشگاهی را به‌عنوان راهی مطمئن و کم‌هزینه برای بررسی اثر بارگذاری انفجار انتخاب کرده‌اند. آزمایش‌هایی نظیر مدل‌سازی سانتریفیوژی علاوه بر اینکه نسبت به آزمایش‌های میدانی بسیار کم‌هزینه و کم‌خطر می‌باشند، دارای نتایج قابل‌اعتماد نیز هستند. با بررسی مطالعات سانتریفیوژی که درزمینه‌ی انفجار در خاک انجام‌شده است، 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 انجام‌شده مربوط به حفره انفجاری است. برای این منظور محققین ابتدا

در زمینه‌ی بررسی اثر انفجار بر سازه‌ها بیشترین مطالعات به‌صورت عددی انجام‌گرفته است. ازجمله نرم‌افزارهایی که می‌توان از آن‌ها در این زمینه استفاده کرد، ABAQUS, FLAC DYNA-L اشاره نمود. علیرغم اینکه مطالعات عددی نسبت به مطالعات میدانی بسیار کم‌هزینه‌تر و ساده‌تر هستند، اما اعتماد به نتایج این‌گونه مطالعات نیازمند صحت سنجی نرم‌افزار مورداستفاده است. از طرفی به علت پیچیدگی موجود در پروسه فیزیکی انفجار و انتشار امواج ناشی از آن، شبیه‌سازی کامل و صحیح این پدیده نیازمند مدل‌های پیچیده و صحیح برای بررسی بارگذاری و پاسخ‌های مواد می‌باشد. روند شبیه‌سازی پروسه انفجار و اثر آن بر روی سازه‌ها را می‌توان به سه مرحله زیر تقسیم‌بندی نمود:

- ۱- پروسه انفجار و شکل‌گیری گودال ناشی از آن
- ۲- انتشار امواج ناشی از انفجار
- ۳- پاسخ سازه

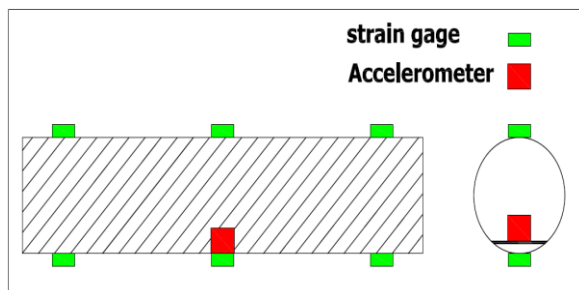
بر اساس همین سه مرحله، روش‌های عددی را می‌توان به سه دسته جدا شده، جدانشده غیرکامل و جدانشده کامل طبقه‌بندی نمود. در روش جدا شده ابتدا تاریخچه تنش‌های صحرائی محاسبه شده و سپس این تنش‌ها به‌عنوان شرایط مرزی بر سازه اعمال می‌شوند و درنهایت پاسخ سازه بدست می‌آید. در این روش اندرکنش بین خاک و سازه به صورت واقعی در نظر گرفته نمی‌شود. تحلیل‌های متعددی با استفاده از این رویه صورت پذیرفته است که از آن جمله

¹ Lu and Wang

آزمایش تحت شتاب ۱g انجام شود، حالت تنش خاک در مدل مورد آزمایش، شرایط واقعی را به دلیل کاهش شدید تنش سربرار نمی‌تواند به درستی شبیه‌سازی نماید؛ بنابراین نتایج آزمایش بدست آمده در شرایط مدل تحت شتاب ۱g نمی‌تواند نمایش درستی از شرایط واقعی باشد. یک راه‌حل عملی در این شرایط مدل‌سازی تحت شتاب بالا است؛ که در این نوع آزمایش با ساخت مدل مقیاس شده و تحت شتاب بالا در دستگاه سانتریفیوژ عملی خواهد بود. بدین‌وسیله شرایط تنش واقعی در دستگاه سانتریفیوژ قابل‌دستیابی و بازسازی است و کنترل شرایط آزمایش عملی و بسیار ساده خواهد شد. در این تحقیق سه تونل با مساحت مقطع برابر در خاک ماسه خشک در دستگاه سانتریفیوژ دانشگاه علم و صنعت ایران مورد آزمایش قرار گرفته است. توان این دستگاه 14g-ton است. تمامی آزمایش‌ها در شتاب ۷۰ برابر شتاب ثقل انجام شده است.

مشخصات دیتالاگر و ابزار گذاری

مهم‌ترین مسئله در مدل‌سازی انفجار در دستگاه سانتریفیوژ دستگاه ثبت داده یا دیتالاگر است. دیتالاگرهای این قبیل آزمایش‌ها به جهت آنکه انفجار ذاتاً یک پدیده آنی است که در چند میلی‌ثانیه رخ می‌دهد به‌علاوه، به دلیل اینکه در دستگاه سانتریفیوژ این زمان بر N تقسیم می‌شود باید قابلیت ثبت تعداد زیادی داده در ثانیه را داشته باشند. فرکانس نمونه‌برداری در دیتالاگر به‌کاررفته در این آزمایش ۱۰۰ هزار داده در ثانیه است. در آزمایش‌های انجام‌شده جهت مقایسه عملکرد تونل‌ها با مساحت مقطع داخلی یکسان از کرنش‌سنج و شتاب‌سنج همان‌طور که در شکل (۱) دیده می‌شود، استفاده شده است.



شکل (۱): ابزارگذاری در طول تونل و داخل تونل

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 و هالساپل^۱ (۱۹۸۰) و اشمیت و هوسن^۲ (۱۹۸۷) از جمله محققینی هستند که در این زمینه مطالعات فراوانی انجام داده است. از جدیدترین مطالعات انجام‌شده در این زمینه می‌توان به مطالعه فن و همکاران^۳ (۲۰۱۲) اشاره نمود. در زمینه‌ی بررسی انتشار امواج ناشی از انفجار در خاک، محققین به بررسی حداکثر فشار، حداکثر شتاب و حداکثر سرعت ذرات در خاک می‌پردازند. از مطالعات انجام‌گرفته در این زمینه می‌توان به مطالعات والش و چارلی^۴ (۱۹۹۳)، دودن و چارلی^۵ (۱۹۹۵) و فن و همکاران (۲۰۱۲) اشاره نمود در زمینه‌ی 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 و همکاران^۶ (۱۹۸۸) با دستگاه سانتریفیوژ به بررسی اثر انفجار بر سازه زیرزمینی در شتاب‌های مختلف ۹۷g، ۴۸٫۵g و ۱g پرداخت. وی با انجام آزمایش‌هایی با شتاب‌ها و مقیاس‌های مختلف مشاهده کرد که مدل‌سازی فیزیکی بسیار مطلوب بوده و این بیانگر درستی روش آزمایش و قوانین مدل‌سازی است. وی همچنین رابطه‌ای برای حفره انفجاری در نوعی ماسه ارائه کرد. در این تحقیق با انجام آزمایش‌های سانتریفیوژ به مقایسه رفتار تونل‌ها با شکل مقطع مستطیلی، نعل اسبی و نیم‌دایره‌ای تحت اثر بار ناشی از انفجار سطحی پرداخته شده است و با مقایسه شتاب وارد بر کف سازه و ممان خمشی ایجادشده در مقطع تونل، رفتار تونل با مقاطع مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

اسلوب آزمایش

شتاب و مقیاس در آزمایش سانتریفیوژ

کریگ (۱۹۸۵)^۷ مدل رفتاری خاک در برابر انفجار به‌شدت غیرخطی و وابسته به تنش است. اگر مدل مقیاس شده

^۱ Dowden and Charlie

^۲ Kutter et al

^۳ Craig

^۱ Schmidt and Holsapple

^۲ Schmidt and Housen

^۳ Fan et al

^۴ Walsh and Charli

برنامه و روش آزمایش‌ها

مشخصات مصالح

مشخصات خاک

خاک مورد استفاده در این آزمایش ماسه سیلیکات استاندارد ۱۶۱ فیروزکوه با تراکم نسبی ۶۰٪ بوده که مشخصات آن در جدول (۱) آورده شده است.

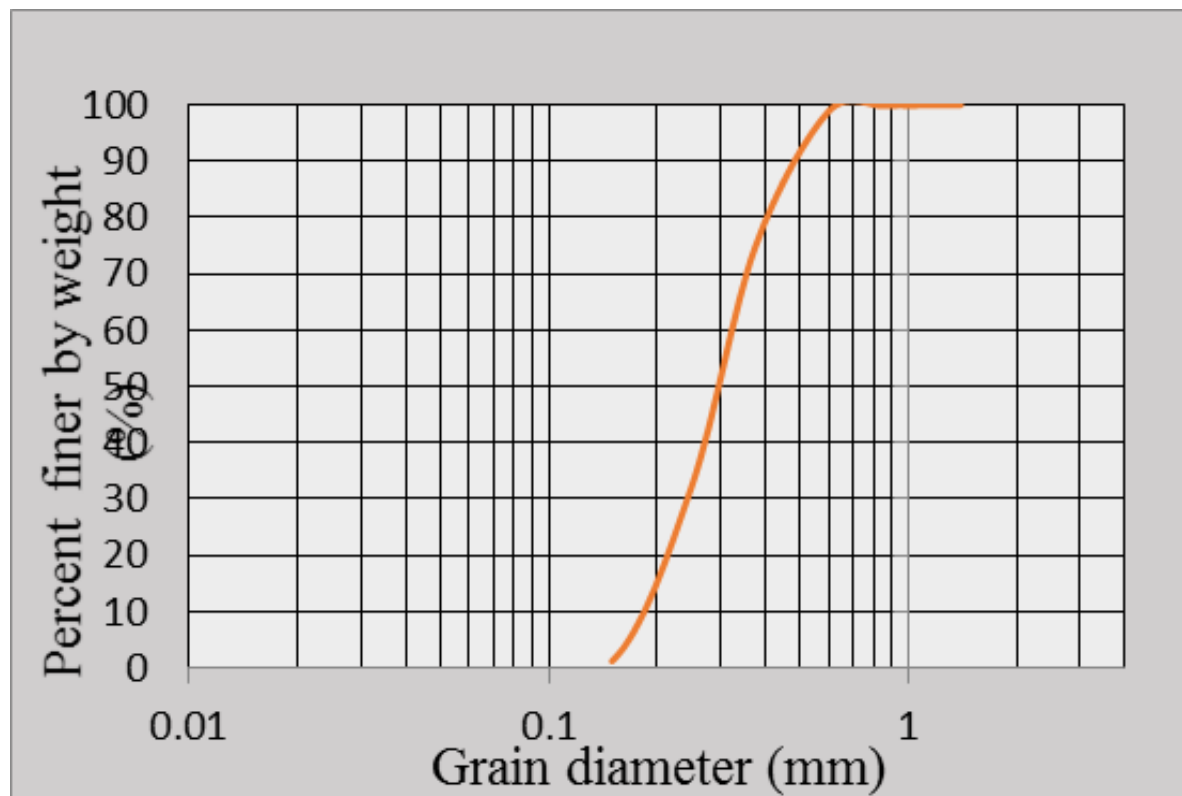
در مطالعه حاضر تمامی آزمایش‌ها در شتاب ۷۰g و تونل‌ها در شتاب ۱g نصب شده‌اند. میزان شتاب بر اساس ۱/۳ عمق نمونه محاسبه شده است. برای ساخت پروفیل خاک نمونه از روش ریزش بارانی استفاده گردید. به منظور ایجاد تراکم یکنواخت پروفیل خاک به صورت لایه لایه اجرا گردید.

جدول (۱): مشخصات ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

Sand	Gs	e_{max}	e_{min}	D ₅₀ (mm)	F.C%	ϕ	Cu	Cc	K
161-Firouzkouh sand	۲,۶۵۸	۰,۹۷	۰,۵۵	۰,۲۷	۰,۲	۳۲	۲,۵۸	۰,۹۷	۰,۰۱۲۵

بارش خشک از ارتفاع ثابت ۲۶ سانتیمتر در داخل جعبه ریخته شده است. منحنی دانه‌بندی ماسه فیروزکوه در شکل (۲) آورده شده است.

محیط خاکی به صورت یک خاک همگن و خشک بوده که جهت رسیدن به تراکم نسبی ۶۰٪ و وزن مخصوص (۱۴۹۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مکعب) در هر لایه به ضخامت ۲ سانتیمتر خاکی به وزن ۲/۵ کیلوگرم به روش

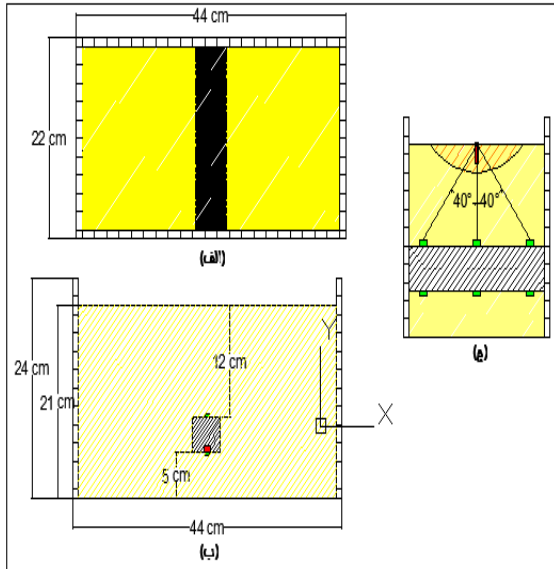


شکل (۲): منحنی دانه‌بندی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

مشخصات تونل

سازه با جنس بتن مسلح را با سازه‌ای از جنس دیگر مدل می‌نمایند. با توجه به جدول (۲) و مقیاس کردن سختی خمشی مقطع تونل، در این آزمایش برای مدل‌سازی تونل با جنس بتن مسلح در واقعیت، از تونل با جنس فولاد آلیاژی استفاده شده است. شکل (۳) نمایی از شرایط مرزی و محل قرارگیری تونل و ابزارهای نصب شده را نشان می‌دهد.

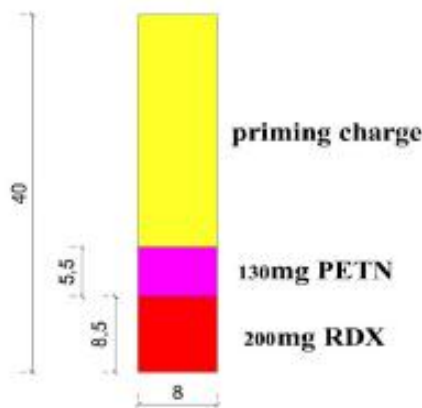
به‌طور کلی باید جنس و خصوصیات سازه اصلی و مدل در سانتریفیوژ یکسان باشد. به دلیل اینکه سازه اصلی از جنس بتن مسلح است باید برای مدل‌سازی آن در سانتریفیوژ از میکروبتن استفاده شود. ساختن میکروبتن دشوار و هزینه‌بر است. از این‌رو در مدل‌سازی سانتریفیوژی



شکل (۳): (الف) پلان (ب) ارتفاع (ج) موقعیت قرارگیری کرنش‌سنج‌ها نسبت به خرج انفجاری

پارامتر	واقعیت	مدل
شتاب	۱	N
مساحت	N	۱
طول	N^2	۱
حجم	N^3	۱
سرعت	۱	۱
جرم	N^3	۱
نیرو	N^2	۱
انرژی	N^3	۱
تنش	۱	۱
کرنش	۱	۱
چگالی	۱	۱
زمان (دینامیک)	N	۱
زمان (خزش)	۱	۱
فرکانس	۱	N

جدول (۲): روابط تشابه بین مدل و پروتوتایپ



شکل (۴): (الف) اجزا تشکیل‌دهنده چاشنی انفجاری (ابعاد بر حسب میلی‌متر) و (ب) تصویر چاشنی



منفجرهای به وزن ۳۳۰ میلی‌گرم را تشکیل می‌دهند. با توجه به شتاب هدف دستگاه سانتریفیوژ، این مقدار ماده منفجره طبق رابطه (۱)، معادل ۱۱۳/۱۹ کیلوگرم ماده منفجره در شتاب ثقل ۱g است. مقدار TNT معادل با این ماده منفجره

ماده انفجاری مورد استفاده در این آزمایش ترکیب PETN و RDX است. در این آزمایش از ۱۳۰ میلی‌گرم PETN و ۲۰۰ میلی‌گرم RDX استفاده شده است که در مجموع ماده

ماده انفجاری

دسته بندی می شود، بارگذاری ناشی از اندرکنش موج تنش و سازه زیرزمینی که این بارگذاری ناشی از برخورد جبهه موج تنش با سازه است که به آن، بارگذاری آبی گویند و در مدت زمان کمی اتفاق می افتد و دیگری بارگذاری ناشی از نیروی اینرسی خاک موجود بین سازه و حفره انفجاری است. این بارگذاری پس از این که جبهه موج از سازه عبور کرد رخ می دهد و ناشی از شتاب خاک موجود بین سازه و حفره انفجاری است. زمان این بارگذاری در مقایسه با بارگذاری نوع اول طولانی تر است و آن را بارگذاری پیوسته نیز می نامند. در شکل های (۵) تاریخچه زمانی کرنش بر روی تاج تونل ها در موقعیت های زیر حفره انفجاری و دونقطه بافاصله از حفره انفجار تونل های مستطیلی، دایره ای و نعل اسبی نشان داده شده است. در این نمودارها کرنش فشاری منفی و کرنش کششی مثبت می باشد. همان گونه که مشاهده می شود حداکثر کرنش برای زاویه صفر و به ترتیب در تونل مقطع مستطیلی، نعل اسبی و دایره ای است. همچنین همان طور که ملاحظه می شود در مقطع تونل نعل اسبی با دور شدن از محل چاله انفجار کرنش با نرخ کمتری کاهش می یابد به عبارت دیگر تأثیر زاویه محل قرارگیری کرنش سنج تا محل انفجار در تونل نعل اسبی بسیار کم است و توزیع کرنش در طول این نوع تونل یکنواخت تر است.

به عواملی نظیر انرژی آزاد شده بر اثر انفجار، شکل هندسی ماده انفجاری، جنس پوشش ماده انفجاری و محیط انفجار بستگی دارد که با در نظر گرفتن این موارد مقدار TNT معادل به صورت تقریبی برابر ۱۴۱/۴۸ کیلوگرم می باشد. در شکل (۴) اجزای تشکیل دهنده ماده انفجاری و تصویر آن نشان داده شده است.

$$W_m = \left(\frac{G_p}{G_m}\right)^3 W_p \quad (1)$$

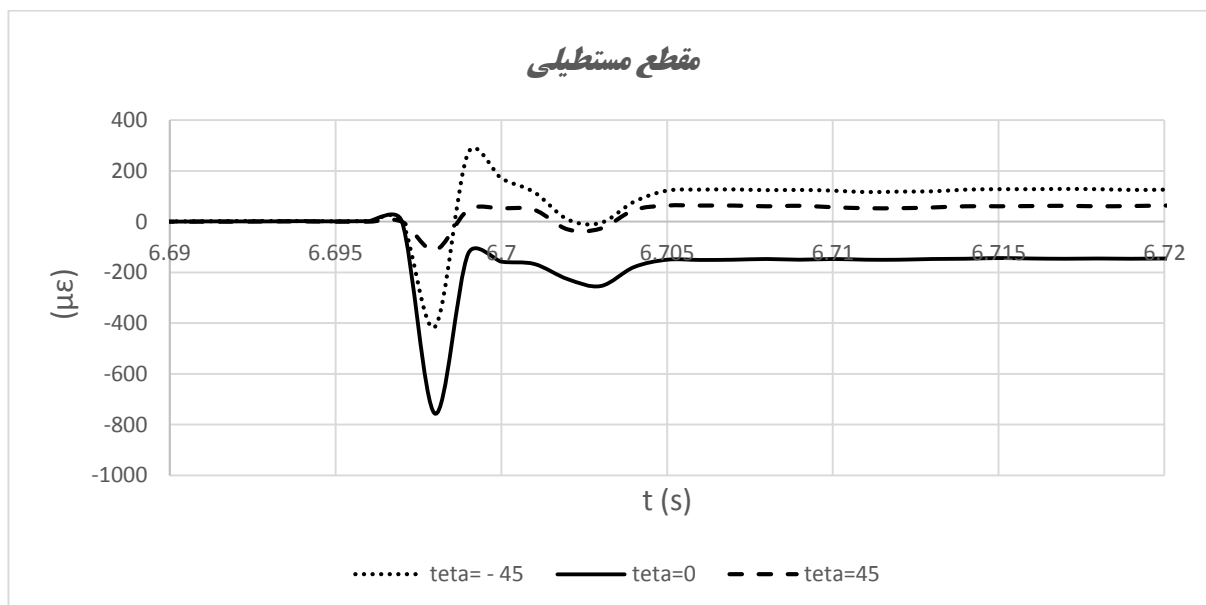
نتایج و بحث

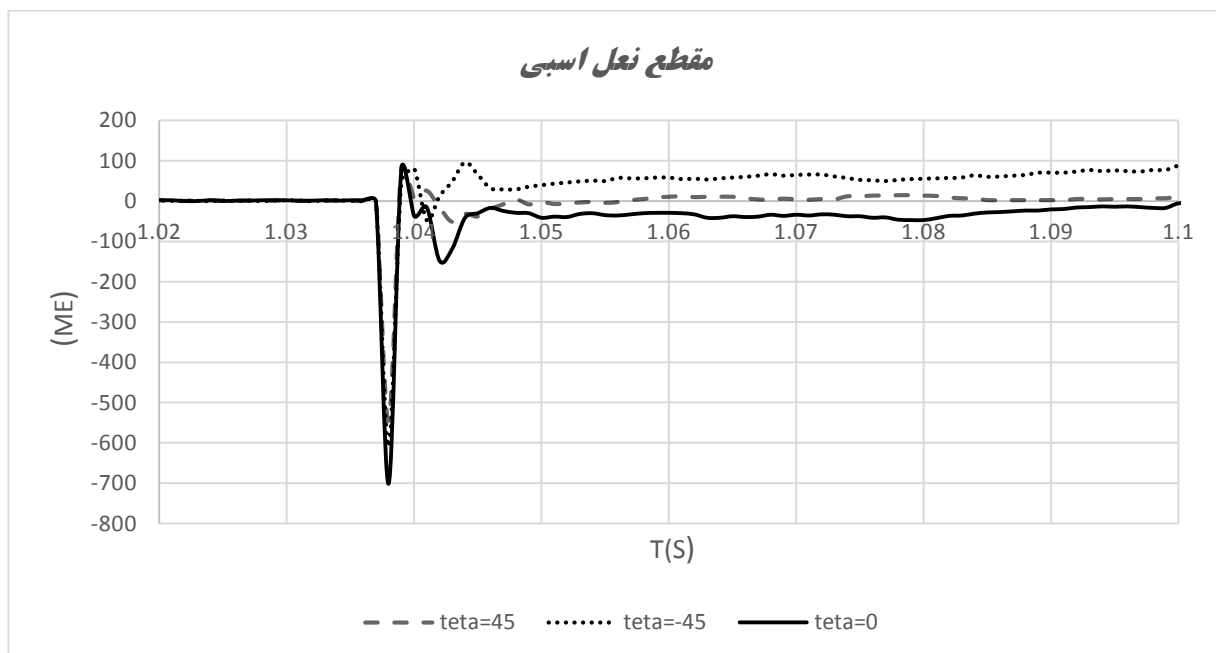
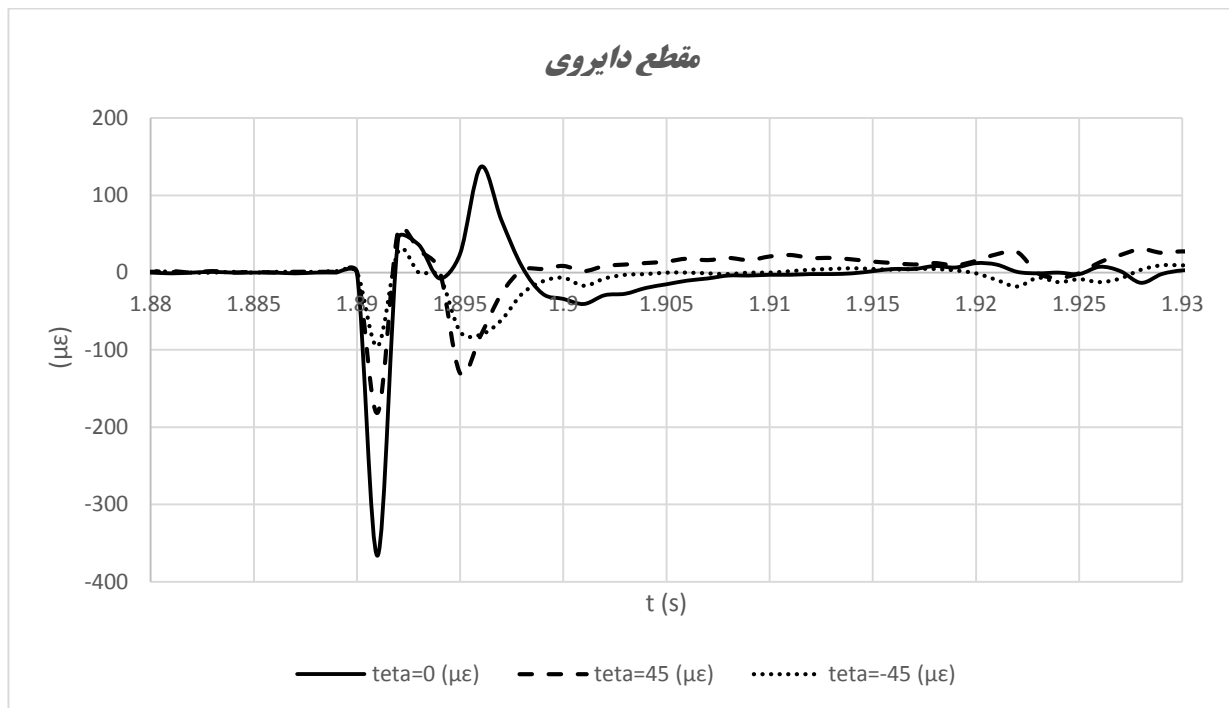
تخمین هندسه گودال سطحی

پس از انفجار ماده منفجره، چاله انفجاری در نمونه خاک تشکیل گردیده که دارای عمق تقریبی ۳ سانتی متر (۲/۱ متر در مقیاس واقعی) و قطر تقریبی ۱۱ سانتی متر (۷/۷ متر در مقیاس واقعی) است. با توجه به آیین نامه 1-TM5-855 می توان عمق و قطر چاله انفجار را تخمین زد که بر این اساس مقدار عمق و قطر حفره به ترتیب ۲/۵۴ متر و ۷/۱ متر در مقیاس واقعی می باشد که مطابقت خوبی با نتایج آزمایش دارد.

کرنش در امتداد تونل

بر اساس تقسیم بندی داویس (۱۹۹۴)^۱ بارگذاری انفجار بر سازه های زیرزمینی در قالب دو سازوکار بارگذاری





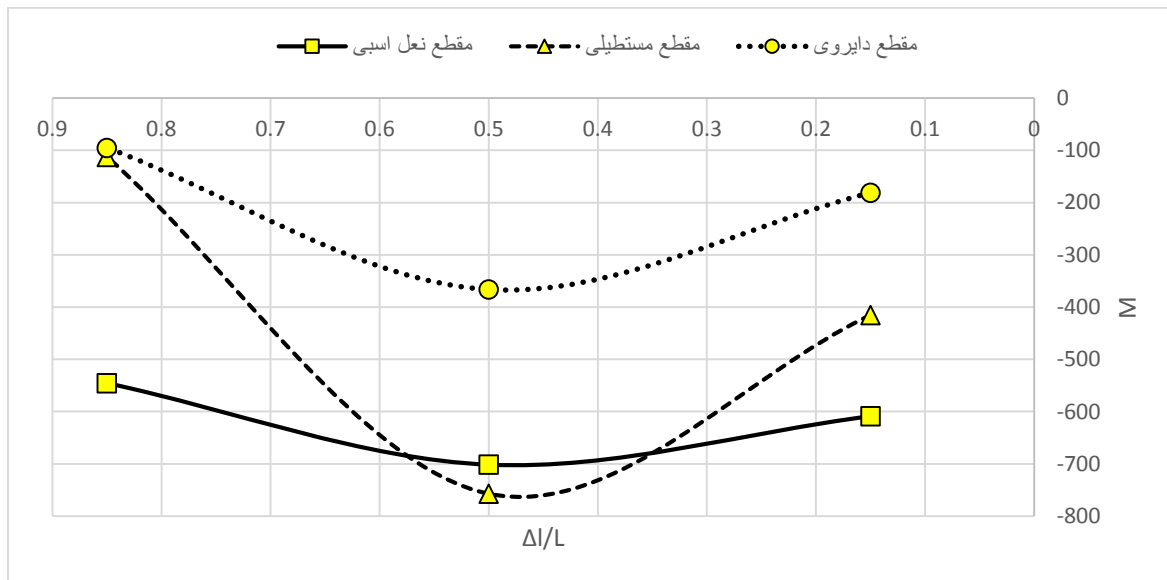
شکل (۵) کرنش تاج تونل در سه موقعیت طولی با زوایای ۴۰-، ۰ و ۴۰ درجه برای تونل‌های با مقاطع مختلف

میزان ممان خمشی ایجادشده در هر سه مقطع در زاویه صفر درجه (زیر چاشنی انفجار) اتفاق افتاده و در تونل با مقطع دایره‌ای میزان ممان کمتر از سایر اشکال می‌باشد و در تونل

ممان در امتداد تونل لنگر خمشی ماکزیمم ایجادشده در طول تونل در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بیشترین

ترتیب، مقاطع دایره‌ای، نعل اسبی و مستطیلی می‌باشند. همچنین همان‌طور که ملاحظه می‌شود در کل طول مقطع تونل نعل اسبی، لنگر خمشی به مقدار حداکثر آن نزدیک و به عبارت دیگر، توزیع لنگر خمشی در طول تونل تقریباً یکنواخت است.

با مقاطع نعل اسبی و مستطیلی به ترتیب ۹۱ درصد و ۱۰۶ درصد ممان بیشتری تحت بارگذاری یکسان نسبت به تونل با مقطع دایره‌ای ایجاد شده است؛ بنابراین از نظر سازه‌ای، بهترین مقاطع برای طراحی تونل از نظر سازه‌ای در برابر انفجار به

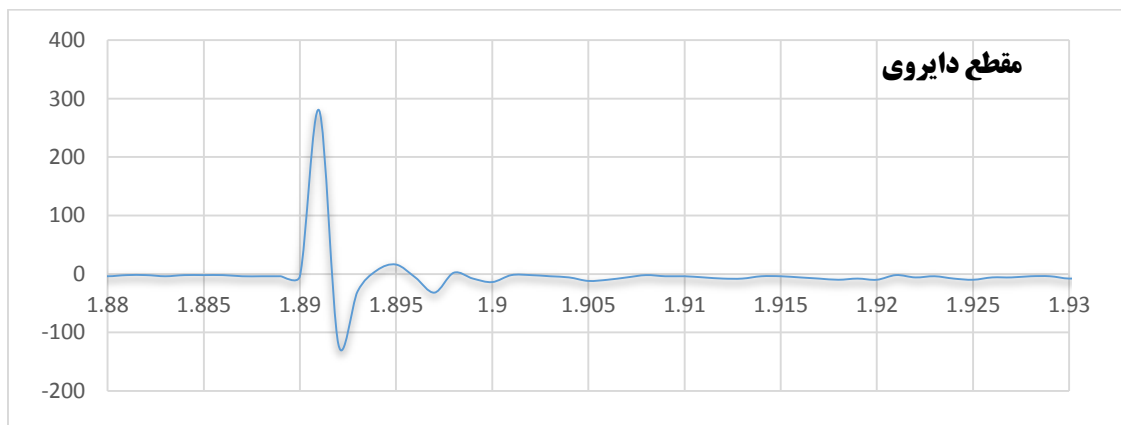
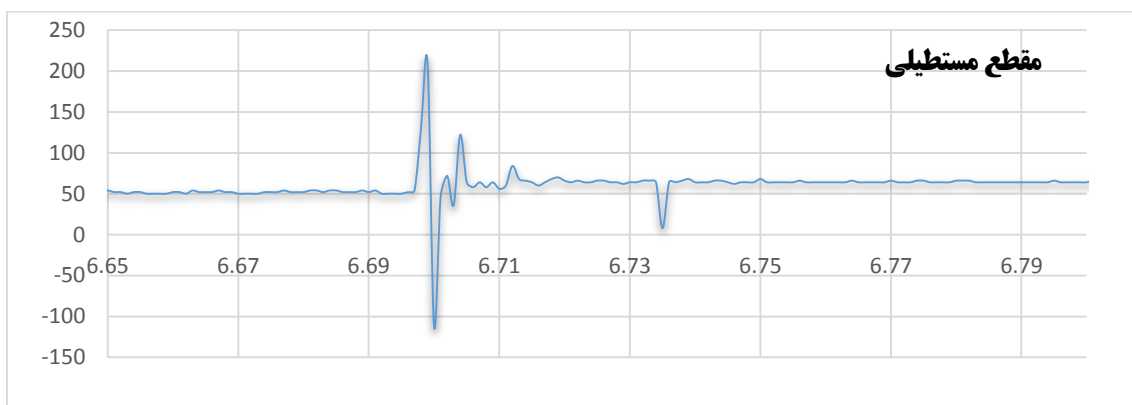
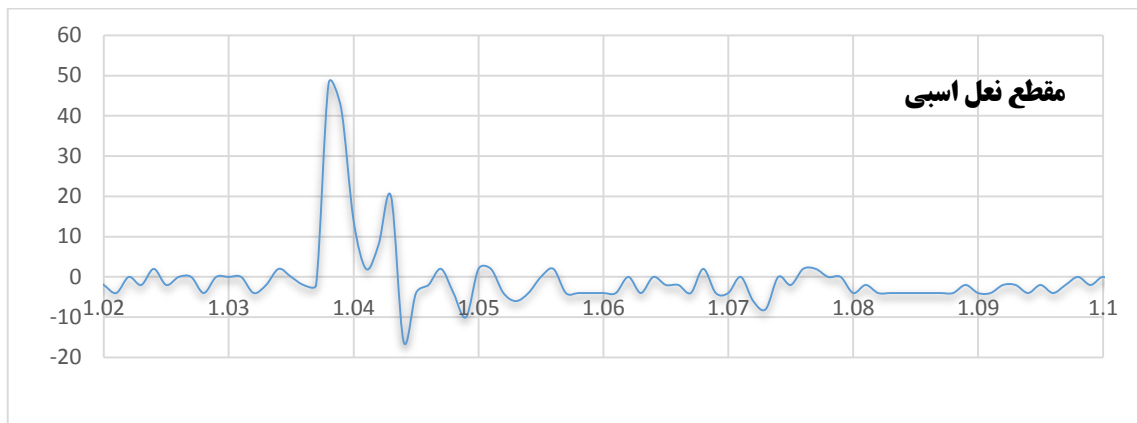


شکل (۶) دیاگرام ممان خمشی در طول تونل

آن طراحی و نصب شوند (لو، ۲۰۰۵). در این مطالعه جهت ارزیابی شوک داخلی سازه، شتاب سنجی درون سازه نصب شده است تا میزان شوک داخلی را ثبت نماید. قابل ذکر است که هنوز رابطه جامعی برای ارزیابی شوک داخل سازه ارائه نشده است و روابط به بررسی حالات خاص پرداخته‌اند. شکل (۷) تاریخچه زمانی شتاب برای داخل تونل با مقاطع مختلف را نشان می‌دهد حداکثر شتاب ثبت شده در تونل با مقاطع دایره‌ای، نعل اسبی و مستطیلی به ترتیب ۲۸۰، ۴۸ و ۲۱۰ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. لذا از نظر شوک وارد شده به داخل تونل می‌توان مقطع نعل اسبی را بهترین مقطع معرفی نمود.

تاریخچه شتاب زمان در تونل

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. شوک داخلی سازه بر روی ایمنی و عملکرد صحیح تجهیزات مورداستفاده در سازه اثر می‌گذارد و یک مسئله مهم به‌منظور طراحی است. طراحی سازه‌های زیرزمینی در برابر انفجار بر مبنای جلوگیری از گسیختگی سازه انجام می‌شود. امکان دارد تحت یک شوک ناشی از انفجار که بسیار کمتر از شوک موردنیاز برای گسیختگی سازه است تجهیزات درون سازه با مشکل مواجه شوند و عملکرد مناسبی از خود نشان ندهند. حال به‌منظور محافظت تجهیزات از این آسیب باید مقدار شوک داخلی سازه معلوم شود تا تجهیزات بر اساس



شکل (۷): تاریخچه شتاب زمان در مقاطع مختلف

نتیجه گیری

نتایج بررسی‌های انجام گرفته نشان می‌دهند که:

اسبی کاهش می‌یابد و به بیان دیگر، توزیع کرنش در طول تونل با مقطع نعل اسبی یکنواخت‌تر است.

۱- حداکثر کرنش در تاج تونل دایره‌ای از دو مقطع دیگر کمتر است و بیشترین مقدار کرنش در تونل مستطیلی می‌باشد و در تونل‌های دایره‌ای و مستطیلی با دور شدن از محل انفجار میزان کرنش ایجاد شده در تونل با سرعت بیشتری نسبت به تونل نعل

۲- مقدار حداکثر لنگر خمشی در تونل با مقطع مستطیلی است و کمترین لنگر خمشی مربوط به تونل با مقطع دایره‌ای است؛ بنابراین از نظر سازه‌ای تونل با مقطع دایره‌ای اقتصادی‌تر است.

باشند یا نسبت به شوک و تکان‌های تونل حساس نباشند، به ترتیب مقاطع دایره‌ای، نعل اسبی و مستطیلی مقاطع مناسب‌تری برای تونل می‌باشند؛ اما از نظر شتاب و شوک وارد بر تجهیزات داخل تونل، بهترین و ایمن‌ترین مقطع برای تونل در برابر این نوع انفجار، مقطع نعل اسبی است.

۳- مقدار حداکثر شوک وارد بر تجهیزات داخل تونل مربوط به مقطع دایره‌ای است و شوک داخلی وارد بر تونل با مقطع نعل اسبی از سایر موارد کمتر است.

با توجه به موارد ذکر شده در بالا می‌توان نتیجه گرفت که برای طراحی تونل در مقابل انفجار سطحی، از نظر سازه‌ای و در صورتی که تجهیزات داخل تونل از اهمیت کمی برخوردار

مراجع

- Geometrical Analysis for Underground Structures.”; 13th International Conference on Aerospace Sciences & Aviation Technology; 2009, ASAT- 13, Egypt.
- 11- Nagy, N. M. Mohamed, M. Boot, J.C. “Nonlinear Numerical Modelling for the Effects of Surface Explosions on Buried Reinforced Concrete Structures.”; Geomechanics and Engineering Journal; 2010; 2, 1, 1-18.
 - 12- Sadeghazar, M. Atarnezhad, R. Khosravi, A. “Evaluating the Response of Buried Reinforced Concrete Structures Under Surface Burst Explosion Using Numerical Simulations”; In Proc. of the International Conference on Structures - Earthquake – Geotechnics 2010, 212-222 (In Persian).
 - 13- Schmidt, R. M. Holsapple, K. A. “Theory and Experiments on Centrifuge Cratering”; J. Geophy. Res. 1980, 85, 235-251.
 - 14- Schmidt, R. Housen, K. “Some Recent Advances in the Scaling of Impact and Explosion Cratering”; Int. J. Impact Eng. 1987, 5, 543-560.
 - 15- TM 5-855-1 “Fundamental of Protective Design for Conventional Weapons”; US Army Eng. Waterways Experiment Station, 1984.
 - 16- 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. ESLTR- 92-73 Vol. I, 1993.
 - 17- Yang, Z. “Finite Element Simulation of Response of Buried Shelters to Blast Loadings.”; Finite Elem Anal Des; 1997; 24, 3, 113-132.
 - 18- Yong, Lu. “Underground Blast Induced Ground Shock and Its Modeling Using Artificial Neural Network”; Comput. Geotech, (2005).
 - 19- Zimmie, T. De, A. “Centrifuge Modeling of Surface Blast Effects on Underground Structures”; Geotech. Test J. 2007, 30, 88–93.
 - 1- Craig W. "Centrifuge modelling for site-specific prototypes", Publication of: Balkema (AA), 1985.
 - 2- Davies, M. C. R. “Dynamic Soil Structure Interaction Resulting from Blast Loading”; In proc. of the Int. Conf. on Centrifuge 1994, 319-324.
 - 3- Dowden, N. Charlie, W. “Blast-Induced Stress Wave Propagation in Unsaturated Sand: Comparison between Centrifuge Modeling and Prototype”; Final Report to AFCEA/RACS, Contract No. F08635-90-CR0306, 1995.
 - 4- 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. 2012, 13, 335-343.
 - 5- Gui, M. W. Chien, M. C. “Blast Resistant Analysis for a Tunnel Passing Beneath Taipei Shongsan Airport – A Parametric Study”; Geotechnical and Geological Engineering; 2004; 24, 227–248.
 - 6- Ishikawa, N. Beppu, M. “Lessons from Past Explosive Tests on Protective Structures in Japan”; Int. J. Impact Eng. 2007, 34, 1535–1545.
 - 7- 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.
 - 8- Liu, H. “ Dynamic Analysis of Subway Structures Under Blast Loading. ”; Department of Civil Engineering, The City College of New York/CUNY, New York; 2009; NY 10031 USA.
 - 9- Lu, Y. Wang, Zh. Chong, K. “A Comparative Study of Buried Structure in Soil Subjected to Blast Load Using 2D and 3D Numerical Simulations.”; Soil Dyn Earthquake Eng; 2005; 25, 275–288.
 - 10- Nagy, N. M. Eltehawy, E. A. Elhanafy, H. M. Eldesouky, A. “Numerical Modeling of