

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده پردیس خوارزمی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک

بررسی تاثیر وقوع روانگرایی در عمق بر حرکات لرزه ای زمین

نگارنده : داود شیخ

استاد راهنما

دکتر امیر بذرافشان مقدم

دی ۹۸

به پاس تعبیر عظیم و انسانیشان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی،

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است،

به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در کنارشان به شجاعت می‌گراید،

و به پاس محبت‌های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند،

این مجموعه را به **پدر و مادر و همسر عزیزم** تقدیم می‌کنم.

تشکر و قدردانی

حمد و سپاس خداوند توانا و مهربان را که هر چه دارم از اوست.

بر خود لازم می‌دانم در این مجال از زحمات بی‌دریغ، تلاش‌های بی‌وقفه و راهنمایی‌های

ارزشمند استاد گرامی جناب آقای دکتر امیر بذرافشان مقدم در راستای انجام این پایان‌نامه،

تشکر و قدردانی کنم.

تعهد نامه

اینجانب داود شیخ دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران ژئوتکنیک دانشکده پردیس دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تاثیر وقوع روانگرایی در عمق بر حرکات لرزه ای زمین تحت راهنمایی دکتر امیر بذرافشان مقدم متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو داود شیخ

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

روانگرایی در خاکها به پدیده ای گفته میشود که خاک اشباع در طی اعمال تنش شدید ناشی از زلزله یا دگرگونی های ناگهانی، سختی و مقاومت خود را بطور کامل از دست می دهد روانگرایی بیشتر در خاکهای اشباع، شل و ماسه‌ای مشاهده شده است. چنانچه خاک اشباع با آب باشد، مثل خاکی که در زیر سطح دریا یا سطح آب زیرزمینی قرار دارد، فضای میان دانه های جامد پر از آب بوده و با اعمال فشار شدید به خاک، این فشار به آب موجود در فضاهای خالی وارد خواهد شد و در طی تلاش آب برای خارج شدن از فضای حفره های خاک به علت آن که اعمال فشار سریع اعمال خواهد شد این تلاش بدون فایده خواهد بود لذا تنشی در آب بوجود خواهد آمد که از مقدار تنشی که باعث اتصال دانه های خاک به یکدیگر شده بسیار بیشتر خواهد بود که این تنش بسیار زیاد باعث از بین رفتن ساختار و مقاومت خاک شده و باعث میشود خاک مانند یک سیال عمل کند .

در این پژوهش از نرم افزار `opensees` برای مدل سازی به منظور ارزیابی دقیق تر اندرکنش خاک استفاده شد و هدف این پژوهش بررسی تأثیر عمق روانگرایی و ضخامت لایه روانگرا در یک عمق مشخص بر روی نشست سطح زمین، اضافه فشار آب حفره‌ای و شتابنگاشت در سطح زمین بود. در این پژوهش ابعاد پروفیل خاک ۵۰ متر در ۱۵۰ متر بوده و آنالیز به صورت ۲ بعدی و بدون سربار بوده است. ضخامت لایه روانگرا ۳ متر در نظر گرفته شد و از عمق به سمت سطح زمین جابجا گردید تا اثر عمق لایه روانگرا بررسی شود. برای یک عمق ثابت نیز، ضخامت لایه روانگرا ۱، ۳ و ۵ متر تغییر کرد تا اثر ضخامت لایه در خروجی‌ها دیده شود .

طبق نتایج مشاهده شد که هر چه لایه روانگرا از سطح زمین دورتر شود میزان اضافه فشار آب حفره‌ای افزایش می‌یابد و مقدار نشست افزایش می‌یابد ولی بعد از یک عمق معین مقدار نشست دیگر تغییر خاصی نمی‌کند و مقدار γ_u افزایش می‌یابد و مقدار ماکزیمم شتابنگاشت در سطح زمین کمتر می‌شود. بر اساس نتایج قسمت بررسی ضخامت لایه روانگرا مشخص شد که با افزایش ضخامت لایه

روانگرا در یک عمق مشخص، به واسطه افزایش تنش مؤثر، میزان اضافه فشار آب حفره‌ای افزایش می‌یابد. وقتی که ضخامت لایه روانگرا ۱ متر بود مقدار نشست بیشترین میزان خود را داشت با افزایش ضخامت لایه روانگرا مقدار ماکزیمم شتاب‌نگاشت سطح زمین کمتر می‌شود. ضخامت یک متری لایه روانگرا در عمق ۳ متری باعث ایجاد نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای بیشتری نسبت به ضخامت ۳ و ۵ متری لایه روانگرا می‌شود.

کلمات کلیدی: روانگرایی، شتاب‌نگاشت، اپنسیس، فشار آب حفره‌ای

فهرست مطالب

ح	فهرست شکل‌ها	.....
ع	فهرست جدول	.....
۱	فصل اول	.....
۱-۱	مقدمه	.....
۲-۱	ضرورت انجام موضوع	.....
۳-۱	روش‌شناسی تحقیق	.....
۴-۱	فصل‌بندی پایان‌نامه	.....
۵	فصل دوم	.....
۱-۲	تعریف روانگرایی خاک	.....
۲-۲	سازوکار روانگرایی خاک	.....
۳-۲	عوامل مؤثر بر روانگرایی خاک‌ها	.....
۱-۳-۲	دانه‌بندی ذرات ماسه	.....
۲-۳-۲	چگالی نسبی اولیه	.....
۳-۳-۲	چگونگی شکل‌گیری خاک	.....
۴-۳-۲	ابعاد توده ماسه و موقعیت زهکشی	.....
۵-۳-۲	ماهیت و مقدار بارهای وارده	.....
۶-۳-۲	مدت زمان شکل‌گیری توده ماسه	.....

۱۳	..... سابقه تغییرشکل‌های نسبی قبلی	۷-۳-۲
۱۳	..... حباب‌های هوای محبوس بین ذرات	۸-۳-۲
۱۳	..... خطرات روانگرایی خاک	۴-۲
۱۴	..... جوشش ماسه	۱-۴-۲
۱۵	..... گسیختگی جریان‌ی	۲-۴-۲
۱۶	..... گسترش جانبی	۳-۴-۲
۱۷	..... نوسان زمین	۴-۴-۲
۱۸	..... از دست رفتن ظرفیت باربری	۵-۴-۲
۱۹	..... نشست زمین	۶-۴-۲
۲۰	..... پیشینه پژوهش	۵-۲
۳۵	..... فصل سوم	-۳
۳۶	..... مقدمه	۱-۳
۳۶	..... تئوری محیط‌های متخلخل اشباع	۲-۳
۳۹	..... مواد و مصالح مورد استفاده	۳-۳
۴۱	..... مدل‌سازی	۴-۳
۴۴	..... راستی‌آزمایی مدل	۵-۳
۴۹	..... فصل چهارم	-۴
۵۰	..... مقدمه	۱-۴

۲-۴	نتایج مربوط به اثر عمق لایه روانگرا.....	۵۰
۱-۲-۴	اضافه فشار آب حفره‌ای نسبت به زمان برای اعماق مختلف.....	۵۰
۲-۲-۴	نشست سطح زمین نسبت به زمان.....	۵۴
۳-۲-۴	شتاب نگاشت در سطح زمین.....	۵۸
۴-۲-۴	نمودار عمق نسبت به اضافه فشار آب حفره‌ای.....	۶۱
۳-۴	نتایج مربوط به اثر ضخامت لایه روانگرا.....	۶۵
۱-۳-۴	اضافه فشار آب حفره‌ای نسبت به زمان.....	۶۶
۲-۳-۴	نشست سطح زمین نسبت به زمان.....	۶۸
۳-۳-۴	شتاب نگاشت در سطح زمین.....	۷۰
۴-۳-۴	نمودار عمق نسبت به اضافه فشار آب حفره‌ای.....	۷۲
۵-۵	فصل پنجم.....	۷۵
۱-۵	مقدمه.....	۷۶
۲-۵	نتایج کلی.....	۷۶
۳-۵	پیشنهادها.....	۷۹
	منابع... ..	۸۰

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ برجستگی‌های خطی ماسه‌ای و ستون‌های مخروطی شکل ماسه‌ای ناشی از پدیده جوشش ماسه (نشریه شماره ۵۲۵ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور)..... ۱۵
- شکل ۲-۲ گسیختگی جریان‌ی ناشی از پدیده روانگرایی (نشریه شماره ۵۲۵ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور)..... ۱۶
- شکل ۳-۲ ایجاد فرورفتگی در زمین ناشی از پدیده گسترش جانبی (نشریه شماره ۵۲۵ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور)..... ۱۷
- شکل ۴-۲ مکانیسم نوسان زمین (نشریه شماره ۵۲۵ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور)..... ۱۸
- شکل ۵-۲ مکانیسم از دست رفتن ظرفیت باربری در اثر کج‌شدگی ناشی از روانگرایی (نشریه شماره ۵۲۵ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور)..... ۱۹
- شکل ۶-۲ مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده با مش‌های در شت و ریز، الف) تاریخچه فشار آب منفذی اضافی زیر پی ب) تاریخچه نشست در زمین آزاد و زیر پی (Shahir and Pak, 2010)..... ۲۱
- شکل ۷-۲ مقایسه نتایج عددی (چپ) با نتایج آزمایشگاهی (راست) در عمق‌های مختلف در مدل میدان آزاد برای اضافه فشار آب منفذی و شتاب (Karimi and Dashti, 2015)..... ۲۲
- شکل ۸-۲ مقایسه نتایج عددی (چپ) با نتایج آزمایشگاهی (راست) در عمق‌های مختلف زیر مرکز پی برای اضافه فشار آب منفذی و شتاب (Karimi and Dashti, 2015)..... ۲۳
- شکل ۹-۲ نسبت فشار آب منفذی برای سربارهای مختلف در اعماق مدفون مختلف در خاک سست و متراکم (آریج و جانعلی زاده چوب‌بستی، ۱۳۹۸)..... ۲۷
- شکل ۱۱-۲ مقایسه جابجایی جانبی در اثر روانگرایی در سه حالت استفاده از: ستون سنگی غیرمسلح، ستون سنگی مسلح و بدون ستون سنگی (شرقی و کرمی، ۱۳۹۸)..... ۲۸

- شکل ۲-۱۰ بررسی تاثیر تراکم و فرکانس زلزله بر روی نشست خاک روانگرا (خادمی دستجردی و همکاران، ۱۳۹۸) ۳۰
- شکل ۲-۱۲ رابطه عرض پی و ظرفیت باربری به ازای عمق و ضخامت‌های مختلف روانگرایی (صفرپور و همکاران، ۱۳۹۱) ۳۲
- شکل ۳-۱ سطوح تسلیم مخروطی در محیط تنش‌های مؤثر اصلی (Elgamal, 2005) ۳۸
- شکل ۳-۲ صفحات تسلیم Lade-Duncan در فضای تنش‌های اصلی ۳۹
- شکل ۳-۳ شمای کلی باکس خاک برای لایه روانگرایی با ضخامت ۳ متر بین سطح زمین و تراز منفی ۳ متر ۴۳
- شکل ۳-۴ شمای کلی باکس خاک برای لایه روانگرایی با ضخامت ۱، ۳، ۵ متر در تراز منفی ۴، ۶ و ۸ متر ۴۳
- شکل ۳-۵ شتاب‌نگاشت اعمالی به مدل ۴۴
- شکل ۳-۶ شتاب‌نگاشت اعمالی در جهت افقی به مدل ۴۵
- شکل ۳-۷ صحت‌سنجی مدل عددی با مدل آزمایشگاهی velcas برای اضافه فشار آب منفذی در عمق ۱/۲۵ متری سطح زمین ۴۶
- شکل ۳-۸ صحت‌سنجی مدل عددی با مدل آزمایشگاهی velcas برای اضافه فشار آب منفذی در عمق ۲/۵ متری سطح زمین ۴۶
- شکل ۳-۹ صحت‌سنجی مدل عددی با مدل آزمایشگاهی velcas برای اضافه فشار آب منفذی در عمق ۵ متری ۴۷
- شکل ۳-۱۰ صحت‌سنجی مدل عددی با مدل آزمایشگاهی velcas برای اضافه فشار آب منفذی در عمق ۷/۵ متری سطح زمین ۴۷
- شکل ۴-۱ نمودار اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک روانگرایی موجود در عمق ۰ تا ۳ متر ۵۱
- شکل ۴-۲ نمودار اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک روانگرایی موجود در عمق ۳ تا ۶ متر ۵۱

شکل ۳-۴ نمودار اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک روانگرایی موجود در عمق ۶ تا ۹ متر ۵۲

شکل ۴-۴ نمودار اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک روانگرایی موجود در عمق ۹ تا ۱۲ متر .. ۵۲

شکل ۵-۴ نمودار اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک روانگرایی موجود در عمق ۱۲ تا ۱۵ متر ۵۳

شکل ۶-۴ نمودار مقایسه‌ای اضافه فشار آب حفره‌ای در اعماق مختلف برای خاک دارای لایه روانگرا با ضخامت ۳ متر ۵۳

شکل ۷-۴ نمودار تغییرات نشست سطح زمین نسبت به زمان در اعماق مختلف برای خاک دارای لایه روانگرا با ضخامت ۳ متر در عمق ۰ تا ۳ متر ۵۵

شکل ۸-۴ نمودار تغییرات نشست سطح زمین نسبت به زمان در اعماق مختلف برای خاک دارای لایه روانگرا با ضخامت ۳ متر در عمق ۳ تا ۶ متر ۵۵

شکل ۹-۴ نمودار تغییرات نشست سطح زمین نسبت به زمان در اعماق مختلف برای خاک دارای لایه روانگرا با ضخامت ۳ متر در عمق ۶ تا ۹ متر ۵۶

شکل ۱۰-۴ نمودار تغییرات نشست سطح زمین نسبت به زمان در اعماق مختلف برای خاک دارای لایه روانگرا با ضخامت ۳ متر در عمق ۹ تا ۱۲ متر ۵۶

شکل ۱۱-۴ نمودار تغییرات نشست سطح زمین نسبت به زمان در اعماق مختلف برای خاک دارای لایه روانگرا با ضخامت ۳ متر در عمق ۱۲ تا ۱۵ متر ۵۷

شکل ۱۲-۴ نمودار مقایسه‌ای تغییرات نشست سطح زمین نسبت به زمان در اعماق مختلف برای خاک دارای لایه روانگرا با ضخامت ۳ متر ۵۷

شکل ۱۳-۴ نمودار شتاب نگاشت در سطح زمین برای خاک دارای لایه روانگرایی با ضخامت ۳ متر واقع در ۳ متری سطح زمین ۵۸

شکل ۱۴-۴ نمودار شتاب نگاشت در سطح زمین برای خاک دارای لایه روانگرایی با ضخامت ۳ متر واقع در ۶ متری سطح زمین ۵۹

شکل ۱۵-۴ نمودار شتاب نگاشت در سطح زمین برای خاک دارای لایه روانگرایی با ضخامت ۳

- متر واقع در ۹ متری سطح زمین ۵۹
- شکل ۱۶-۴ نمودار شتاب نگاشت در سطح زمین برای خاک دارای لایه روانگرایی با ضخامت ۳ متر واقع در ۱۲ متری سطح زمین ۶۰
- شکل ۱۷-۴ نمودار شتاب نگاشت در سطح زمین برای خاک دارای لایه روانگرایی با ضخامت ۳ متر واقع در ۱۵ متری سطح زمین ۶۰
- شکل ۱۸-۴ نمودار مقایسه‌ای شتاب نگاشت در سطح زمین برای خاک دارای لایه روانگرایی با ضخامت ۳ متر واقع در عمق‌های مختلف ۶۱
- شکل ۱۹-۴ نمودار نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای نسبت به زمان در اعماق مختلف برای خاک دارای لایه روانگرا با ضخامت ۳ متر در عمق ۰ تا ۳ متر ۶۲
- شکل ۲۰-۴ نمودار نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای نسبت به زمان در اعماق مختلف برای خاک دارای لایه روانگرا با ضخامت ۳ متر در عمق ۳ تا ۶ متر ۶۳
- شکل ۲۱-۴ نمودار نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای نسبت به زمان در اعماق مختلف برای خاک دارای لایه روانگرا با ضخامت ۳ متر در عمق ۶ تا ۹ متر ۶۳
- شکل ۲۲-۴ نمودار نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای نسبت به زمان در اعماق مختلف برای خاک دارای لایه روانگرا با ضخامت ۳ متر در عمق ۹ تا ۱۲ متر ۶۴
- شکل ۲۳-۴ نمودار نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای نسبت به زمان در اعماق مختلف برای خاک دارای لایه روانگرا با ضخامت ۳ متر در عمق ۱۲ تا ۱۵ متر ۶۴
- شکل ۲۴-۴ نمودار مقایسه‌ای نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در اعماق مختلف برای خاک دارای لایه روانگرا با ضخامت ۳ متر ۶۵
- شکل ۲۵-۴ نمودار اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک دارای لایه روانگرا در زیر تراز منفی ۳ متر با ضخامت ۱ متر ۶۶
- شکل ۲۶-۴ نمودار اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک دارای لایه روانگرا در زیر تراز منفی ۳ متر

- با ضخامت ۵ متر ۶۷
- شکل ۴-۲۷ نمودار اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک دارای لایه روانگرا در زیر تراز منفی ۳ متر
- با ضخامت‌های مختلف ۶۷
- شکل ۴-۲۸ نمودار تغییرات نشست سطح زمین نسبت به زمان در خاک دارای لایه روانگرا در زیر تراز منفی ۳ متر با ضخامت ۱ متر ۶۸
- شکل ۴-۲۹ نمودار تغییرات نشست سطح زمین نسبت به زمان در خاک دارای لایه روانگرا در زیر تراز منفی ۳ متر با ضخامت ۵ متر ۶۹
- شکل ۴-۳۰ نمودار مقایسه‌ای تغییرات نشست سطح زمین نسبت به زمان در خاک دارای لایه روانگرا در زیر تراز منفی ۳ متر با ضخامت‌های مختلف ۶۹
- شکل ۴-۳۱ نمودار شتاب نگاشت در سطح زمین در خاک دارای لایه روانگرا در زیر تراز منفی ۳ متر با ضخامت یک متر ۷۰
- شکل ۴-۳۲ نمودار شتاب نگاشت در سطح زمین در خاک دارای لایه روانگرا در زیر تراز منفی ۳ متر با ضخامت ۵ متر ۷۱
- شکل ۴-۳۳ نمودار مقایسه‌ای شتاب نگاشت در سطح زمین در خاک دارای لایه روانگرا در زیر تراز منفی ۳ متر با ضخامت‌های مختلف ۷۱
- شکل ۴-۳۴ نمودار نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک دارای لایه روانگرا در زیر تراز منفی ۳ متر با ضخامت یک متر ۷۲
- شکل ۴-۳۵ نمودار نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک دارای لایه روانگرا در زیر تراز منفی ۳ متر با ضخامت پنج متر ۷۳
- شکل ۴-۳۶ نمودار مقایسه‌ای نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک دارای لایه روانگرا در زیر تراز منفی ۳ متر با ضخامت‌های مختلف ۷۳

فهرست جدول

جدول ۱-۳ روابط پارامترهای PDMY ۴۰

جدول ۲-۳ مشخصات ماسه نوادا با تراکم ۴۰ درصد (Arulmoli et al,1992) ۴۵

۱- فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

یکی از مهم‌ترین و جدی‌ترین مباحث در حوزه ژئوتکنیک لرزه‌ای موضوع روانگرایی است. این موضوع در فاصله سه ماهه بین دو زلزله نیگاتا و آلاسکا که در سال ۱۹۶۴ به وقوع پیوستند مورد توجه مهندسين حوزه ژئوتکنیک قرار گرفتند. در این دو زلزله خرابی‌های زیادی از نوع خرابی پل، لوله‌های مدفون در خاک، شیروانی‌ها، سازه‌های مسکونی و غیرمسکونی مشاهده شد. در طول ۵۰ سال بعد از وقوع این زلزله‌ها موضوع روانگرایی دست‌مایه تحقیقات بسیاری از پژوهشگران در سرتاسر دنیا گردید. در این بین از روش‌های مختلف عددی و آزمایشگاهی جهت بررسی این پدیده استفاده گردید.

روانگرایی خاک بطور کلی پدیده‌ای است که در طی آن مقاومت برشی خاک بصورت قابل توجهی کم می‌شود. عامل اصلی ایجاد روانگرایی در خاک افزایش فشار آب منفذی خاک است که باعث کاهش تنش موثر خاک می‌شود. اولین شخصی که از اصطلاح روانگرایی استفاده کرد فردی بنام هازن بود که این پدیده را برای توجیه شکست رخ داده در سد Calaveras در آمریکا به کار برد.

در خاک‌های ماسه‌ای اشباع، در هنگامی که وقوع زلزله و به تبع آن ارتعاش ایجاد شده از زلزله، خاک متراکم می‌گردد. این متراکم شدن خاک باعث افزایش فشار آب منفذی خاک شده و اگر خاک موردنظر نفوذپذیری کمی داشته باشد آن‌گاه خاک نمی‌تواند به خوبی فشار آب منفذی ایجاد شده را کم کند و با ارتعاشات بیشتر ناشی از زلزله فشار آب منفذی بالاتر و بالاتر می‌رود تا اینکه فشار آب منفذی ایجاد شده با فشار سربار خاک برابر شده و خاک روانگرا می‌شود. در این حالت مقاومت برشی خاک نیز صفر خواهد شد که دلیل آن، این است که تنش کل خاک و فشار آب منفذی همان خاک برابر شده و در نتیجه تنش موثر به صفر میل می‌کند و مقاومت برشی در خاک‌های ماسه‌ای هم فقط به تنش موثر وابسته است و تنش موثر نیز در اینجا به صفر میل کرده است (در خاک ماسه‌ای چون چسبندگی وجود ندارد، تاثیری بر مقاومت برشی ندارد).

۲-۱ ضرورت انجام موضوع

هدف از این پژوهش بررسی تاثیر عمق روانگرایی بر روی نشست سطح زمین، اضافه فشار آب حفره‌ای و شتاب نگاشت در سطح زمین می باشد. در مورد تاثیر زلزله بر روانگرایی تحقیقاتی صورت پذیرفته اما در مورد تاثیر روانگرایی بر امواج زلزله تحقیق خاصی صورت نگرفته است لذا در این تحقیق تغییراتی که بر روی شتاب نگاشت زلزله در هنگام عبور از یک لایه روانگرا رخ می دهد بلحاظ تغییرات شتاب برای اولین بار مورد بررسی قرار گرفته است. این تحقیق می تواند به شناخت منطقه‌ی روانگرایی و تعیین راهکارهای مناسب برای مقابله با آن استفاده شود. از طرف دیگر از نتایج این تحقیق می توان با توجه به تغییراتی که ناشی از عمق لایه روانگرا بر روی شتاب نگاشت زلزله بوجود می آید تاثیرات این شتاب نگاشت جدید را بر روی سازه بنا شده بر روی خاک مورد تحلیل قرار داد.

۳-۱ روش شناسی تحقیق

در این تحقیق به بررسی تأثیر عمق روانگرایی بر روی نشست سطح زمین، اضافه فشار آب حفره‌ای و شتاب نگاشت در سطح زمین پرداخته شد. همچنین تأثیر ضخامت لایه روانگرا نیز بر پارامترهای ذکر شده بررسی گردید. در این پژوهش از نرم افزار opensees برای مدل سازی به منظور ارزیابی دقیق تر اندرکنش خاک استفاده شد. نرم افزار opensees که در آن از زبان برنامه نویسی تیکل "TCL/TK" استفاده شده است می تواند مورد استفاده پژوهشگران برای شبیه سازی و اجرای کلیه رفتارهای سازه‌های مورد نظر قرار گیرد. این نرم افزار در دسته نرم افزارهای کدباز قرار می گیرد که به پژوهشگران این اجازه را می دهد که مصالح و فرمان های خود را در قسمت کتابخانه آن اضافه نموده و استفاده و آنالیز نمایند. ابعاد پروفیل خاک ۵۰ متر در ۱۵۰ متر بوده و آنالیز به صورت ۲ بعدی و بدون سربار بوده است. ضخامت لایه روانگرا ۳ متر در نظر گرفته شد و از عمق به سمت سطح زمین جابجا گردید تا اثر عمق لایه روانگرا بررسی شود. برای یک عمق ثابت نیز، ضخامت لایه روانگرا ۱، ۳، ۵ متر

تغییر کرد تا اثر ضخامت لایه در خروجی‌ها دیده شود.

خاک مورد استفاده Nevada Sand با چگالی نسبی برای لایه روانگرا بین ۳۰ درصد انتخاب شد.

کلیه تحلیل‌ها با مدل رفتاری PDMY02 انجام گردید.

۴-۱ فصل بندی پایان نامه

در فصل دوم این پژوهش، با توجه به نشریه شماره ۵۲۵ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور به تعریف و بررسی مکانیسم پدیده روانگرایی و عوامل موثر بر آن پرداخته شده و سپس به مطالعات مختلف صورت گرفته بر روی خاک‌های روانگرا در شرایط مختلف پرداخته شد.

در فصل سوم به بررسی مواد و روش‌های بکار رفته در آنالیز پژوهش می‌پردازیم. معرفی متریال به کاررفته و روش تحلیل این متریال در اپنسیس از جمله اهداف این فصل هستند. تئوری محیط‌های متخلخل اشباع به‌عنوان تئوری حاکم بر فضای آنالیز ما توضیح داده شده است. در نهایت مش بندی باکس بکار رفته در آنالیز، شرایط مرزی باکس و نوع بارگذاری آورده شده است.

در فصل چهارم جداول و نتایج و تحلیل نتایج حاصل از تحلیل عددی باکس موردنظر ما با نرم‌افزار اپنسیس با شرح و توضیح مفصل آورده شده است.

در نهایت در فصل پنجم خلاصه نتایجی که در فصل چهارم به آن رسیدیم آورده شده و پیشنهادهایی برای کار محققین دیگر در پایان آمده است.

۲- فصل دوم

مروری بر مطالعات گذشته

از موضوعات مورد اهمیت در هر پژوهشی در ابتدا توجه به ادبیات و سپس پیشینه پژوهش است. در این فصل از این پژوهش، با توجه به نشریه شماره ۵۲۵ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور به تعریف و بررسی مکانیسم پدیده روانگرایی و عوامل موثر بر آن پرداخته شده و سپس به مطالعات مختلف صورت گرفته بر روی خاک‌های روانگرا در شرایط مختلف پرداخته شد.

۱-۲ تعریف روانگرایی خاک

یکی از مهم‌ترین و جدی‌ترین مباحث در حوزه ژئوتکنیک لرزه‌ای موضوع روانگرایی است. این پدیده باعث خرابی‌های زیادی در طی زلزله‌های گذشته شده است.

روانگرایی خاک بطور کلی پدیده‌ای است که در طی آن مقاومت برشی خاک بصورت قابل توجهی کم می‌شود. عامل اصلی ایجاد روانگرایی در خاک افزایش فشار آب منفذی خاک است که باعث کاهش تنش موثر خاک می‌شود. اولین شخصی که از اصطلاح روانگرایی استفاده کرد فردی بنام هازن بود که این پدیده را برای توجیه شکست رخ داده در سد Calaveras در آمریکا به کار برد.

در خاک‌های ماسه‌ای اشباع، در هنگامی که وقوع زلزله و به تبع آن ارتعاش ایجاد شده از زلزله، خاک متراکم می‌گردد. این متراکم شدن خاک باعث افزایش فشار آب منفذی خاک شده و اگر خاک موردنظر نفوذپذیری کمی داشته باشد آن‌گاه خاک نمی‌تواند به خوبی فشار آب منفذی ایجاد شده را کم کند و با ارتعاشات بیشتر ناشی از زلزله فشار آب منفذی بالاتر و بالاتر می‌رود تا اینکه فشار آب منفذی ایجاد شده با فشار سربار خاک برابر شده و خاک روانگرا می‌شود. در این حالت مقاومت برشی خاک نیز صفر خواهد شد که دلیل آن نیز این است که تنش کل خاک و فشار آب منفذی المان خاک برابر شده و در نتیجه تنش موثر به صفر میل می‌کند و مقاومت برشی در خاک‌های ماسه‌ای هم فقط به تنش موثر وابسته است و تنش موثر نیز در اینجا به صفر میل کرده است (در خاک ماسه‌ای چسبندگی چون وجود ندارد، تاثیری بر مقاومت برشی ندارد).

همان‌طور که گفته شد اولین بار فردی بنام هازن از عبارت Liquefies برای توجیه پدیده شکست سد Calaveras در ایالت کالیفرنیا آمریکا استفاده کرد. ترزاقی در سال ۱۹۲۵ برای اولین بار تئوری خود را بنام تنش موثر مطرح کرد و این تئوری توسط محققین دیگر برای تشریح و بررسی پدیده روانگرایی مورد استفاده قرار گرفت. ترزاقی به عنوان اولین کسی که اصطلاح روانگرایی را مورد استفاده قرار داد عنوان کرد که، فروپاشی در خاک اشباع باعث انتقال وزن ذرات فروپاشیده شده به آب اطراف خواهد شد و در این هنگام پدیده روانگرایی دور از انتظار نخواهد بود. این اتفاق در اعماق باعث خواهد شد فشار آب ایستایی افزایش یابد و به سمت مقادیر وزن غوطه‌وری خاک میل کند (نشریه شماره ۵۲۵ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور).

کاساگرانده در سال ۱۹۳۶ به بررسی مشخصات خاک‌های غیرچسبده موثر بر پایداری ترانشه‌ها پرداخت. کاساگرانده به کمک تعدادی آزمایش ساده به بیان مفهوم پدیده روانگرایی پرداخت. طبق یکی از دستاوردهای کاساگرانده، تراکم خاک در خاک‌های غیرچسبده سست مثل ماسه‌های با دانه‌بندی یکنواخت از متوسط تا ریز که در حالت سست قرار دارند بسیار کمتر از تراکم بحرانی آن‌هاست. از طرف دیگر بخشی از مصالح اگر در حالت سست باشند و تحت تغییرشکل‌های مداوم قرار گیرند، تمایل به کاهش حجم از خود نشان می‌دهند. حال چنانچه منافذ توسط آب پر شده باشند آب راه‌گریزی با همان نرخ سرعتی که تغییر شکل در حال ایجاد شدن است نداشته باشد، بار بصورت موقت به روی آب منتقل شده و در نتیجه پایداری خاک به سبب کاهش زاویه اصطکاک خاک موجب آسیب به کل خاک و لغزش جریانی در خاک می‌شود (نشریه شماره ۵۲۵ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور).

طبق تعریف سعید در سال ۱۹۷۹ روانگرایی زمانی رخ می‌دهد که خاک در تنش پسماند کم و ثابت به دلیل افزایش فشارهای آب منفذی بالا، تغییر شکل پیوسته‌ای را تحمل می‌کند و مقادیر فشار همه‌جانبه‌ی مؤثر به سمت مقادیر کم میل می‌کند. بسیار پایینی کاهش می‌یابد. اعمال تنش تناوبی یا حتی ایستایی باعث بالا رفتن مقادیر فشار منفذی و ایجاد روانگرایی می‌شود. طبق نظر سعید، روانگرایی

به نسبت تخلخل، تراکم نسبی ماسه و فشار همه‌جانبه وابسته است و در خاک‌های ماسه‌ای در جریان رو به بالا بدلیل شیب هیدرولیکی بحرانی رخ می‌دهد (نشریه شماره ۵۲۵ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور).

(Castro et al., 1982) طبق نظر کاسترو و همکاران در سال ۱۹۸۲ روانگرایی پدیده‌ای است که خاک در طی آن مقاومت برشی‌اش بصورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. این کاهش به علت بارگذاری تناوبی، ضربه‌ای و یکنواخت می‌تواند رخ دهد و توده خاک شبیه به یک سیال، جریان می‌یابد تا زمانی که مقدار مقاومت برشی کاهش یافته با تنش برشی اعمال شده بر روی توده خاک با هم برابر شوند. (نشریه شماره ۵۲۵ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور).

طبق نظر پولوس در سال ۱۹۹۷، روانگرایی در واقع همان شکست برشی ماسه سست یا نرم در شرایط زهکشی نشده است و زمانی رخ می‌دهد که الف) مقدار مقاومت برشی زهکشی نشده حالت پایدار خاک از مقدار تنش‌های برشی محرک برجا توده خاک قبل از گسیختگی، کمتر شود. ب) سرعت تنش‌های برشی اضافی آنقدر باشد که باعث ایجاد برش زهکشی نشده در توده خاک شوند. پ) تنش‌های وارد شده اخیر به توده خاک آنقدر بزرگ باشد که باعث ایجاد کرنش‌های فراتر از کرنش حداکثر و تغییر شکل پایدار در توده خاک گردد (نشریه شماره ۵۲۵ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور).

۲-۲ سازوکار روانگرایی خاک

بررسی سازوکار روانگرایی خاک و دانستن اینکه در چه محل‌هایی امکان روی دادن این اتفاق وجود دارد اهمیت دارد. اگر بارهای دینامیکی بصورت متناوب به خاک اعمال شوند (رخ دادن زلزله، موج دریا، انفجار و بار وسایل نقلیه باعث ایجاد بار دینامیکی می‌شوند) سرعت وارد شدن این بار دینامیکی آنقدر بالا است که در خاک‌های با خصوصیات زهکشی مناسب نیز امکان تقلیل فشار آب حفره‌ای اضافی

بوجود آمده، به خوبی وجود ندارد. از این رو تحت بارهایی نظیر زلزله، خاک‌ها بطور متناوب و زهکشی نشده، بارگذاری می‌شوند. بارهای تناوبی باعث کاهش سختی و مقاومت برشی خاک می‌شوند. در خاک‌هایی که درشت‌دانه هستند، فشار آب حفره‌ای اضافی ایجاد شده حتی می‌تواند باعث شود تنش موثر خاک کاهش و به صفر میل کند و روانگرایی دینامیکی رخ دهد. در مورد خاک‌های خشک درشت‌دانه نیز می‌توان گفت این خاک‌ها می‌توانند بصورت موقت مثل سیال لزجی در طول اعمال بار دینامیکی عمل کنند ولی رفتار آن‌ها با خاک‌های اشباع در طول روانگرایی متفاوت خواهد بود. از لحاظ استاتیکی اگر در عمق z از سطح زمین و در زمانی که سطح آب زیرزمینی بر روی سطح زمین باشد یک جز خاک داشته باشیم، طبق رابطه (۱-۲) داریم:

$$\sigma'_{z0} = \sigma_{z0} - U_0 \quad (1-2)$$

که در آن:

σ'_{z0} : تنش اولیه موثر قائم

σ_{z0} : تنش اولیه کل قائم

U_0 : فشار آب منفذی اولیه

با اعمال بار دینامیکی، تنش موثر در خاک بصورت رابطه (۲-۲) کاهش می‌یابد:

$$\sigma'_z = \sigma_{z0} - u_0 - \Delta u_d = \sigma_{z0} - (u_0 + \Delta u_d) \quad (2-2)$$

که در آن ΔU_d فشار آب حفره‌ای اضافه شده در هنگام اعمال بار دینامیکی است و اگر این افزایش بصورتی باشد که $\sigma_{z0} = U_0 + \Delta U_d$ ، در این حالت تنش قائم موثر خاک صفر خواهد شد و خاک روانگرا و بصورت سیالی لزج تبدیل خواهد شد (نشریه شماره ۵۲۵ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور).

۲-۳ عوامل مؤثر بر روانگرایی خاکها

برای بررسی اینکه خاک یک منطقه خاص دارای استعداد روانگرایی هست یا خیر، معیارها و شاخص‌های متفاوتی وجود دارد. بر اساس پژوهش محققین مختلف چه به صورت آزمون‌های آزمایشگاهی و مطالعات در محل مشخص شده است که عوامل مختلفی از خاک بر روی روانگرایی موثر است. که در ادامه به بررسی آن‌ها می‌پردازیم. علاوه بر ویژگی‌های خاک، ویژگی‌های بار دینامیکی نیز بر روی روانگرایی خاک موثر است مثلاً اگر بار دینامیکی زلزله باشد بزرگی و مدت دوام زلزله بر روی روانگرایی موثر است.

نکته مهم آن است که هر کدام از عواملی که در ذیل آمده اگرچه بر روی روانگرایی خاک موثر است اما واضح است که بررسی روانگرایی خاک یک منطقه نیاز به اطلاعات بیشتر دارد و فقط با این معیارها امکان‌پذیر نیست.

۲-۳-۱ دانه‌بندی ذرات ماسه

دانه‌بندی ذرات ماسه در یک توده خاک بر رفتار آن در حین اعمال بارهای ارتعاشی موثر است. در شرایط یکسان باید گفت ماسه‌های یکنواخت و ریزدانه در مقایسه با ماسه‌هایی که درشت‌دانه‌تر، استعداد بیشتری برای روان‌شدگی دارند. دلیل این امر نیز این است که نفوذپذیری در مصالح درشت‌دانه به مراتب از مصالحی که ریزدانه هستند بیشتر است. اگر توده ماسه از ذرات یک‌دست و یکنواخت نیز تشکیل شده باشد در مقایسه با ماسه‌هایی که دارای دانه‌بندی گسترده هستند، استعداد بیشتری برای روانگرایی خواهند داشت (حسینی، ۱۳۷۲).

۲-۳-۲ چگالی نسبی اولیه

از عوامل مهمی که بر روی روانگرایی خاک اثر دارد می‌توان به مولفه دانسیته نسبی اشاره کرد. اگر چگالی نسبی اولیه توده خاک افزایش یابد، در حین اعمال بارهای ارتعاشی، مقادیر فشار آب منفذی و نشست بصورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج بدست‌آمده برای منحنی‌های

تنش در مقابل تغییر شکل برای یک نوع ماسه در دو حالت متراکم و متخلخل و بر اساس شیب این منحنی که در واقع نشان‌دهنده میزان مقاومت نمونه‌ها است مشخص می‌شود در ماسه‌ی متراکم مقدار مقاومت از ماسه‌ی متخلخل بیشتر است. پس اگر تمام عوامل دیگر دخیل در روانگرایی یکسان باشد آنگاه ماسه با دانسیته نسبی بالاتر میزان تغییرشکل و نشست کمتری نسبت به ماسه با دانسیته نسبی پایین‌تر خواهد داشت (حسینی، ۱۳۷۲).

۳-۳-۲ چگونگی شکل‌گیری خاک

خاک‌های ماسه‌ای بر عکس خاک‌های رسی دارای ویژگی‌های ساختمانی و بافت معین نیستند. بر اساس تحقیقات انجام شده مشخص شده است که روانگرایی ماسه‌های اشباع بوسیله بارهای سیکلی وابسته به روش و چگونگی شکل‌گیری، ساختمان، بافت خاک و تهیه نمونه ماسه می‌باشد. طبق مطالعات انجام شده مشخص شد که تنش لازم برای ایجاد روانگرایی در اثر تعداد معینی از سیکل بار تحت روش‌های مختلف تهیه نمونه تا ۲۰۰ درصد تغییر را نشان می‌دهد. اما در مورد تاثیر جهات قرارگیری و بافت دانه‌های ماسه نیاز به بررسی بیشتر می‌باشد (حسینی، ۱۳۷۲).

۴-۳-۲ ابعاد توده ماسه و موقعیت زهکشی

در ماسه‌های قدیمی احتمال وقوع پدیده روانگرایی بیشتر است. این ماسه‌ها عموماً ریزدانه هستند و در اینگونه مصالح زمانی که ابعاد لایه و سیع باشد، مسیر زهکشی طولانی شده و در طول بارگذاری دینامیکی توده ماسه ممکن است شبیه یک لایه غیرزهکش عمل کند. جهت پایدار ساختن توده‌های ماسه‌ای که استعداد روانگرا شدن دارند برخی از پژوهشگران استفاده از زهکش شنی را پیشنهاد داده‌اند. چنانچه مصالح مورد استفاده برای زهکشی دارای نفوذپذیری ۲۰۰ برابری نسبت به مصالح اصلی باشند آن‌گاه عمل زهکشی بصورت کامل انجام خواهد گرفت. لذا با تعبیه و پیش‌بینی زهکش‌های مصنوعی مانند آن‌چه گفته شد طول مسیر زهکشی کم شده و پایداری توده خاک افزایش می‌یابد (حسینی، ۱۳۷۲).

۲-۳-۵ ماهیت و مقدار بارهای وارده

چنانچه تنش‌های همگن بر توده خاک ماسه‌ای اعمال شد آن‌گاه تنش‌های موثر اولیه در آن بوجود خواهد آمد. برای انتقال این تنش‌های بزرگ به آب‌های حفره‌ای یا باید تعداد زیادی سیکل از بار ارتعاشی به خاک وارد شود یا شدت ارتعاشات وارده بزرگ باشد. پس می‌توان گفت احتمال روانگرایی با اعمال تنش‌های موثر اولیه بزرگ، کاهش می‌یابد.

اگر طبق شرایط طبیعی که مقدار تنش‌های اولیه در یک توده خاک همگن در تمام جهت‌ها یکسان نیست، آن‌گاه روانگرایی خاک وابسته به ضریب رانش خاک در حالت سکون خواهد بود. اگر مقدار این ضریب بزرگ‌تر از $0/5$ باشد تنش‌های اولیه لازم برای روانگرایی خاک در حدود 50 درصد افزایش پیدا می‌کند. پس می‌توان گفت آزمایش سه محوری بصورت دقیق و واقعی شرایط تنش‌ها را بر اساس واقعیت برقرار نمی‌کند و نتایج بدست آمده از آن در خصوص روانگرایی دست‌بالا و محافظه‌کارانه است. چنانچه اندازه تنش‌های بین ذره‌ای اولیه در هنگام بارگذاری بر خاک بزرگ باشد، باید خاک را با مصالحی هم‌چون قلوه سنگ که دارای نفوذپذیری زیادی است ترکیب کرد تا فشار آب منفذی به راحتی و سرعت بیشتری تقلیل یابد (حسینی، ۱۳۷۲).

۲-۳-۶ مدت زمان شکل‌گیری توده ماسه

عمر توده ماسه‌ای که در گذشته و به شکل کاملاً طبیعی ایجاد شده ممکن است بر روی ویژگی روان‌شدگی آن تاثیرگذار باشد. بر اساس پژوهشی که بر روی یک ماسه در حالت دست نخورده و هم‌چنین بازسازی شده از همان نوع ماسه انجام شده، مشخص گردید که مقاومت در برابر روانگرایی در حدود 75 افزایش یافته است. گروهی این مقدار افزایش را به جوش خوردگی و در هم رفتن ذرات خاک نسبت داده‌اند. این آیتم باید از موضوع قبلی یعنی جهات شکل‌گیری ذرات و بافت خاک تفکیک شود (حسینی، ۱۳۷۲).

۷-۳-۲ سابقه تغییر شکل‌های نسبی قبلی

در هنگام وقوع زلزله توده‌های ماسه تحت تاثیر تغییر شکل‌هایی قرار می‌گیرند. برای تعیین اثر سابقه تغییر شکل‌های قبلی بر روی ویژگی روانگرایی خاک‌های ماسه با استفاده از آزمایش برش ساده تحقیقاتی بر روی نمونه‌هایی که قبلاً تحت تاثیر تغییر شکل قرار گرفته‌اند و نمونه‌های جدید مشابه آن انجام گرفت. بر اساس این پژوهش‌ها مشخص شد که تغییر شکل‌هایی که قبلاً بر نمونه وارد شده بر ویژگی روانگرایی خاک تاثیرگذار است. seed نشان داد که اثر تغییر شکل‌های قبلی بر روی دانسیته ماسه قابل ملاحظه نمی‌باشد اما باعث افزایش ۱/۵ برابری تنش‌هایی که مولد روانگرایی می‌باشند، خواهد گردید. توسط پژوهشگران دیگر نیز مقادیری حتی بالاتر از مقدار ذکر شده برای حالاتی که تغییر شکل‌های گذشته جدی‌تر بوده‌اند بدست آمد (حسینی، ۱۳۷۲).

۸-۳-۲ حباب‌های هوای محبوس بین ذرات

اگر داخل آب حباب‌های هوایی داشته باشیم که تحت تاثیر تنش‌ها و فشارهای اضافی بصورت مرتب قرار گیرد بخاطر ویژگی‌های تراکمی، این حباب‌ها دارای سهمی از فشار اضافی جذب شده خواهند داشت و متراکم خواهند شد ازین رو هوای محبوس در بین ذرات ماسه موجب کاهش احتمال پدیده روانگرایی خواهد شد (حسینی، ۱۳۷۲).

۴-۲ خطرات روانگرایی خاک

روانگرایی خاک باعث تاثیر بر سازه‌های مختلف می‌شود. روانگرایی در خاک باعث بروز پدیده‌هایی مثل جوشش ماسه، افزایش فشار آب حفره‌ای و تغییر شکل‌های مختلف می‌شود البته این تغییر شکل‌ها اگر معنادار و بزرگ باشد برای مهندسان قابل تامل است. بطور کلی روانگرایی باعث پدیده‌هایی می‌شود که در ذیل مورد بررسی قرار می‌گیرد (نشریه شماره ۵۲۵ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور).

جوشش ماسه ۱-۴-۲

آب زیرزمینی واقع در یک لایه خاک سست ولی اشباع در شرایط ایستابی قبل از وقوع تکان‌های لرزه‌ای قرار دارد. اما حرکات لرزه‌ای در حین لرزش و پس از اتمام آن موجب می‌شود آب منفذی به سمت کناره‌ها و بالا در پراکنده گردد. اگر زمین مسطح باشد این جریان رو به بالا باعث ایجاد گرادیان هیدرولیکی خواهد شد و پس از مدتی با رسیدن این گرادیان به مقدار گرادیان بحرانی مقدار تنش موثر قائم صفر به سمت صفر میل خواهد کرد و اگر تمام شرایط لازم برقرار باشد، سرعت آب باعث خواهد شد تا مخلوط ذرات معلق توده خاک و آب به سطح زمین برسد. این مخلوط همان‌طور که در شکل (۲-۱) نشان داده شده به دو صورت برجستگی‌های خطی ماسه‌ای و ستون‌های مخروطی شکل ماسه‌ای بر روی زمین پدیدار می‌شود. به این عارضه‌ها جوشش ماسه گفته می‌شود که باعث صدمات اقتصادی و آسیب به سازه خواهد گردید (نشریه شماره ۵۲۵ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور).



شکل ۱-۲ برجستگی‌های خطی ماسه‌ای و ستون‌های مخروطی شکل ماسه‌ای ناشی از پدیده جوشش ماسه (نشریه

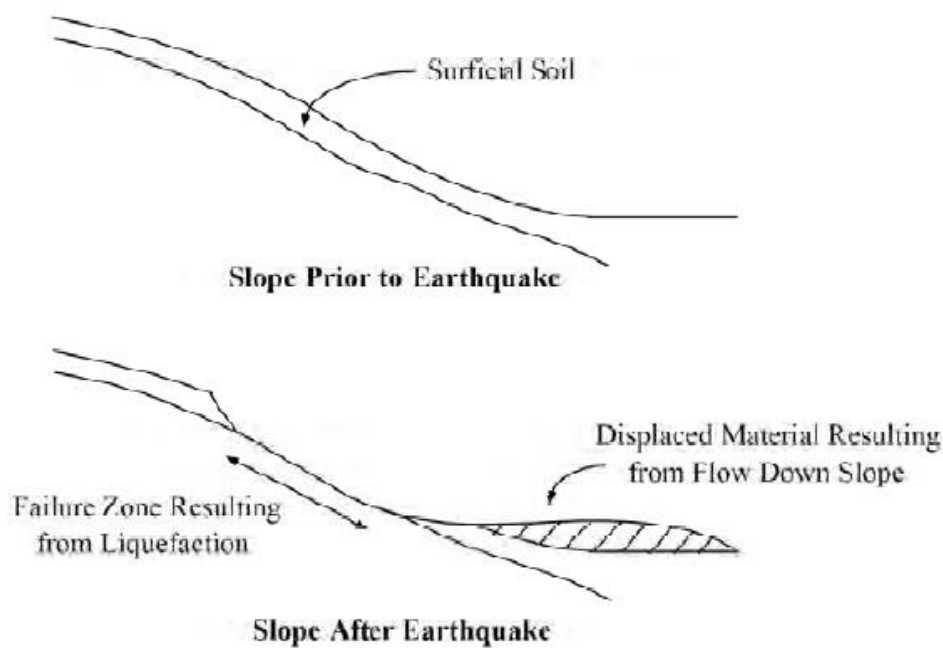
شماره ۵۲۵ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور)

۲-۴-۲ گسیختگی جریان‌ی

این نوع گسیختگی که در اثر روانگرایی خاک بوجود می‌آید بدترین نوع گسیختگی زمین است.

گسیختگی جریان‌ی باعث جابجایی حتی توده‌های بزرگ خاک در طول ده‌ها متر می‌شود این اتفاق ممکن

است با سرعت بسیار زیاد نیز رخ دهد. در واقع طبق شکل (۲-۲) که نشان‌دهنده گسیختگی جریان‌ی است، روانگرایی خاک باعث حرکت خاک به سمت پایین شیب خواهد شد. از معروف‌ترین مثال‌های این نوع گسیختگی می‌توان به گسیختگی ناشی از زلزله سال ۱۹۷۱ در شیب بالا دست سد سان فرناندو اشاره کرد (نشریه شماره ۵۲۵ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور).



شکل ۲-۲ گسیختگی جریان‌ی ناشی از پدیده روانگرایی (نشریه شماره ۵۲۵ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور)

۲-۴-۲ گسترش جانبی

به تغییر مکان جانبی بلوک‌های سطحی بزرگ توده خاک که بخاطر پدیده روانگرایی در لایه‌های زیرین خاک اتفاق می‌افتد، گسترش جانبی گویند. وقتی خاک در لایه زیرین روانگرا می‌شود، لایه بالایی آن با شیب ملایم به شکل جانبی به سمت پایین زمین بدلیل ترکیب نیروهای ثقلی و اینرسی حرکت می‌کند. گسترش جانبی زمانی رخ می‌دهد که شیب زمین ملائم و در محدوده سه دهم تا ۳ درجه باشد. تغییر مکان‌های افقی که بخاطر گسترش جانبی اتفاق می‌افتد به چند متر نیز خواهد رسید. خاکی که

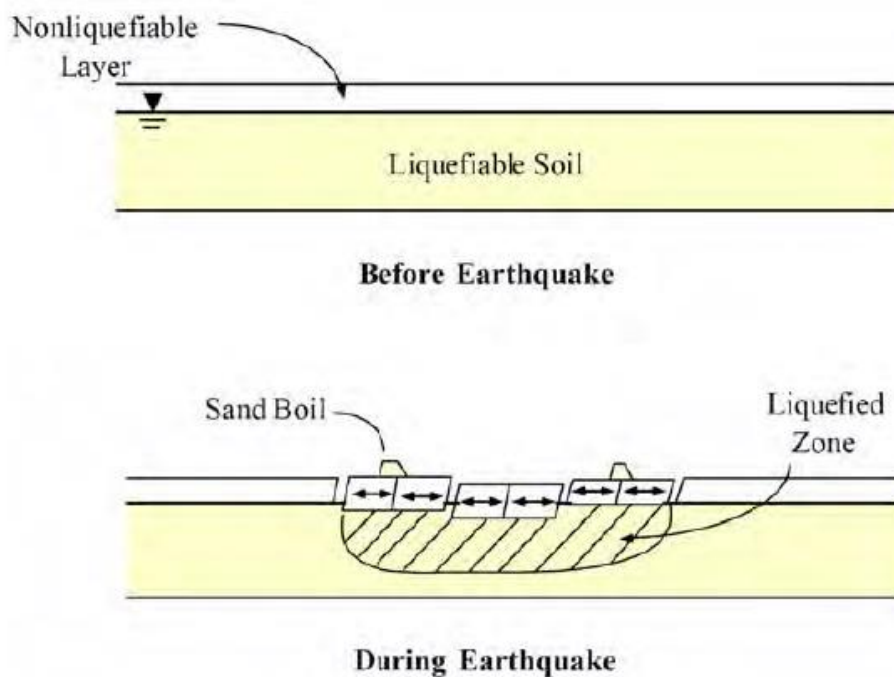
در اثر گسترش جانبی جابجا می‌شود از درون گسیخته خواهد شد و این اتفاق باعث ایجاد خندق، فرورفتگی و بیرون زدگی زمین و ترک‌های با عمق زیاد بر روی سطحی که دچار گسیختگی شده، خواهد شد که نمایی از آن در شکل (۲-۳) نمایش داده شده است. این اتفاق موجب آسیب به سازه‌ها و پی‌ها و تاسیسات می‌شود (نشریه شماره ۵۲۵ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور).



شکل ۲-۳ ایجاد فرورفتگی در زمین ناشی از پدیده گسترش جانبی (نشریه شماره ۵۲۵ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور)

۴-۴-۲ نوسان زمین

اگر شیب زمین طبیعی خیلی ملائم باشد، روانگرایی در عمق، باعث این خواهد شد که بلوک‌های بالایی خاک جدا شده و این اجازه به آن‌ها داده خواهد شد که در مدت زمانی که زلزله رخ می‌دهد بر روی لایه روانگرا همانطور که در شکل (۲-۴) نشان داده شده به سمت جلو و عقب تکان بخورد. این امر باعث ایجاد نوسانی می‌شود که در اغلب موارد به صورت موج در سطح زمین پدیدار می‌شود. همزمان با این نوسان‌ها، نشست‌هایی بر روی زمین ایجاد می‌شود و ترک‌ها نیز باز و بسته می‌شود که باعث بروز خسارت به سازه‌ها، لوله‌ها و تاسیسات خواهد گردید (نشریه شماره ۵۲۵ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت

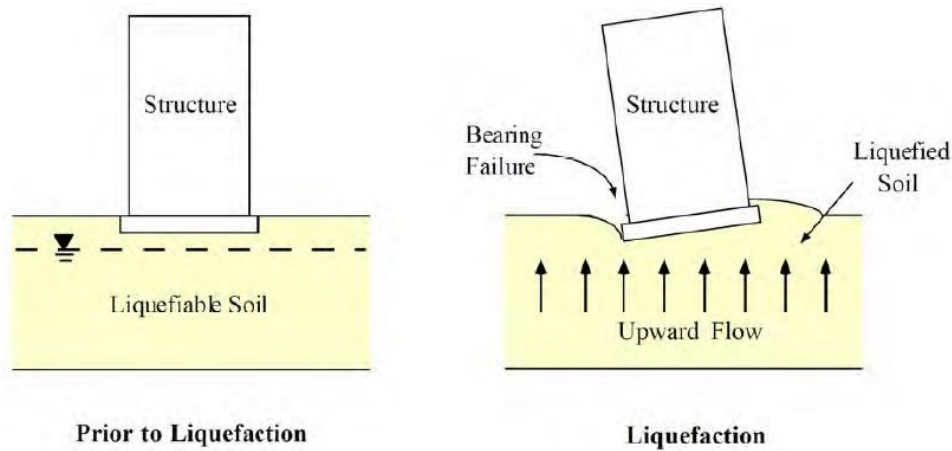


شکل ۴-۲ مکانیسم نوسان زمین (نشریه شماره ۵۲۵ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور)

۵-۴-۲ از دست رفتن ظرفیت باربری

پدیده روانگرایی در خاک به طرق مختلف می‌تواند منجر به گسیختگی پی‌های سطحی و عمیق شود. از دست رفتن ظرفیت باربری خاک‌های اشباع با مقاومت پس‌ماند کم، آشکارترین سازوکار گسیختگی پی‌های سطحی می‌باشد. زمانی که خاک تکیه‌گاه سازه‌ای روانگرا می‌شود ضمن از دست دادن مقاومت خود باعث ایجاد تغییرشکل‌های بزرگ در خاک و کج‌شدگی و نشست سازه خواهد شد (شکل ۵-۲). همان‌طور که در زلزله نیگاتای ژاپن دیده شد ساختمان‌های ۴ طبقه تا ۶۰ درجه دچار کج‌شدگی شدند. در این زلزله روانگرایی در ابتدا در لایه ماسه‌ای که در عمق چند متری زمین بوده شروع شده و به سمت بالا حرکت کرده و موج ناشی از روانگرایی که در حال حرکت به بالا بوده باعث تضعیف خاک تکیه‌گاه ساختمان و کج شدن و نشست در سازه‌ها بصورت آرام شد. هم‌چنین روانگرایی بر روی شمع‌ها یا همان پی‌های سطحی نیز اثرگذار است به عنوان مثال در همان زلزله نیگاتای روانگرایی و گسترش

جانبی ناشی از زلزله باعث گسیختگی ساختمان‌ها و پل‌ها شد.



شکل ۲-۵ مکانیسم از دست رفتن ظرفیت باربری در اثر کج‌شدگی ناشی از روانگرایی (نشریه شماره ۵۲۵ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور)

۶-۴-۲ نشست زمین

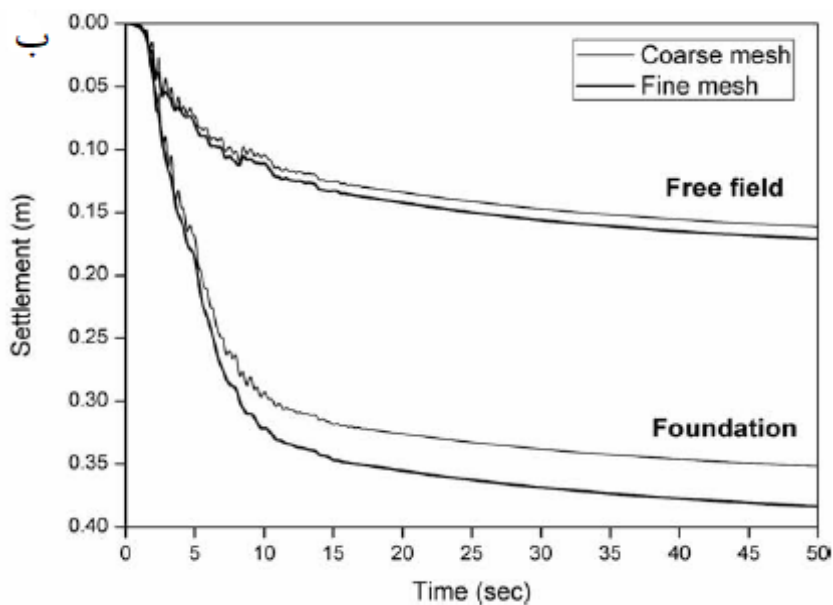
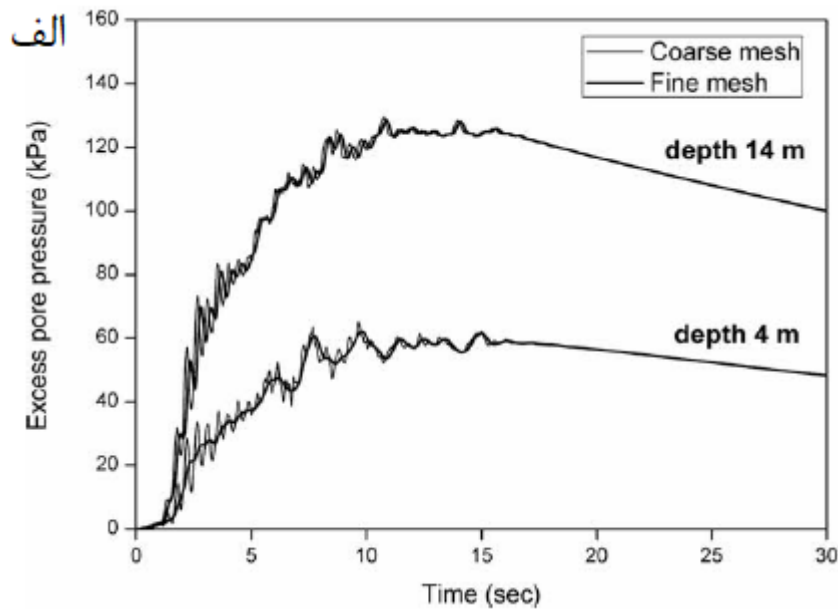
در پی زلزله آلاسکا در سال ۱۹۶۴، چندین مورد نشست زمین بخاطر تکان‌های لرزه‌ای روی داد. در برخی نواحی موضعی، نشست ناشی از تراکم رسوبات نیز به نشست کل اضافه شد یعنی مثلا اختلاف سطح ایجاد شده در هنگام انجام عملیات لوله‌گذاری چاه در اطراف شهر پرتیج، نشان‌دهنده سهمی از نشست کل است که آن را می‌توان به تراکم خاک نسبت داد. نشست ایجاد شده باعث شد که سطح زمین آنقدر پایین بیاید که خانه‌ها و اتوبان‌ها در مدت زمان رخ دادن جزر و مدهای بزرگ به زیر آب روند. از جمله دیگر خرابی‌های ناشی از نشست خاک می‌توان به نشست زمین در طی زلزله سان فرانسیسکو در محل تصفیه‌خانه جنسن اشاره کرد که باعث صدمات زیادی شد. نشست زمین و تراکم خاک با روانگرایی در ارتباط بوده و با رخ دادن پدیده روانگرایی افزایش خواهند داشت. در هنگام رخ دادن زلزله می‌توان نشست را به دو بخش شامل نشست خاک اشباع و نشست خاک خشک تقسیم کرد. نشست در خاک‌های خشک در هنگام رخ دادن حرکات لرزه‌ای تحت تاثیر شرایط تنش موثر ثابت روی می‌دهد. در خاکی که زهکشی محدود شده و اشباع است، شرایط حجم ثابت ادامه‌دار است و تولید اضافه

فشار آب حفره‌ای اثر اولیه لرزش خواهد بود. در ادامه با پراکنده شدن اضافه فشار آب حفره‌ای، نشست در خاک روی می‌دهد. محاسبه نشست خاک در هنگام وقوع زلزله سخت است اما با این وجود روش‌های مختلفی از سوی پژوهشگران ارائه شده که تطابق مناسبی با موارد دیده شده در محل دارند (نشریه شماره ۵۲۵ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور).

علاوه بر مخاطرات گفته شده خطرات دیگری شامل خرابی سازه‌های ساحلی، شناوری سازه‌های مدفون و تاثیر بر روی پاسخ ساختگاه نیز وجود دارد که از بحث و بررسی آن‌ها در این جا صرف نظر شده است (نشریه شماره ۵۲۵ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور).

۲-۵ پیشینه پژوهش

(Shahir and Pak, 2010) با توجه به این که روش‌های اندکی با کاربرد محدود در عمل برای تخمین نشست پی‌ها در زمین‌های با خاک روانگرا وجود دارد، به بررسی یک رابطه کلی برای این موضوع پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود پاسخ دینامیکی پی‌های سطحی بر روی خاک‌های روانگرا را با استفاده از یک تحلیل دینامیکی ۳ بعدی بررسی کردند. آن‌ها برای صحت سنجی مدل عددی خود، آن را با نتایج آزمایش سانتریفیوژ حاصل از تحقیق دیگر محققین مقایسه کردند. با مقایسه نتایج عددی با اندازه‌گیری‌های آزمایش سانتریفیوژ مشخص شد که نتایج قابل قبولی برای تغییر فشار آب منفذی در لایه‌های خاک و نشست ناشی از روانگرایی که در شکل (۲-۶) نشان داده شده است به دست آمد. پس از تائید مدل عددی، یک رابطه عملی برای تخمین روانگرایی-نشست پی‌های صلب قرار گرفته بر روی ماسه خوب دانه‌بندی شده تا خاک سست همگن ارائه کردند.



شکل ۲-۶ مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده با مش‌های درشت و ریز، الف) تاریخچه فشار آب منفذی اضافی زیر پی

ب) تاریخچه نشست در زمین آزاد و زیر پی (Shahir and Pak, 2010)

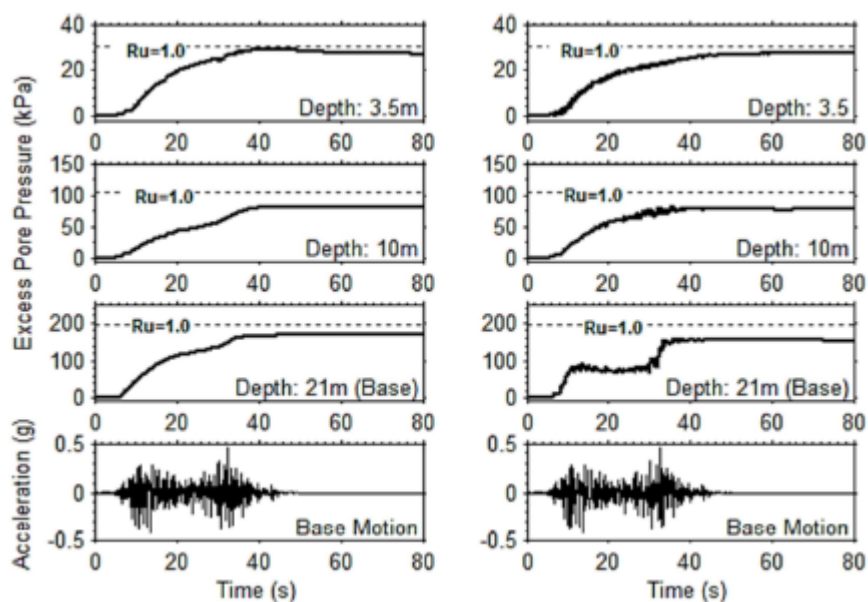
(Karimi and Dashti, 2015) به شبیه‌سازی عددی پدیده روانگرایی خاک در هنگام زلزله و

مقایسه و صحت سنجی آن با آزمایش سانتریفیوژ پرداختند. آن‌ها از نتایج دو آزمایش سانتریفیوژ که

در دانشگاه کلرادو برای پاسخ دینامیکی خاک و سازه بر روی ماسه اشباع، با تراکم متوسط و یکنواخت

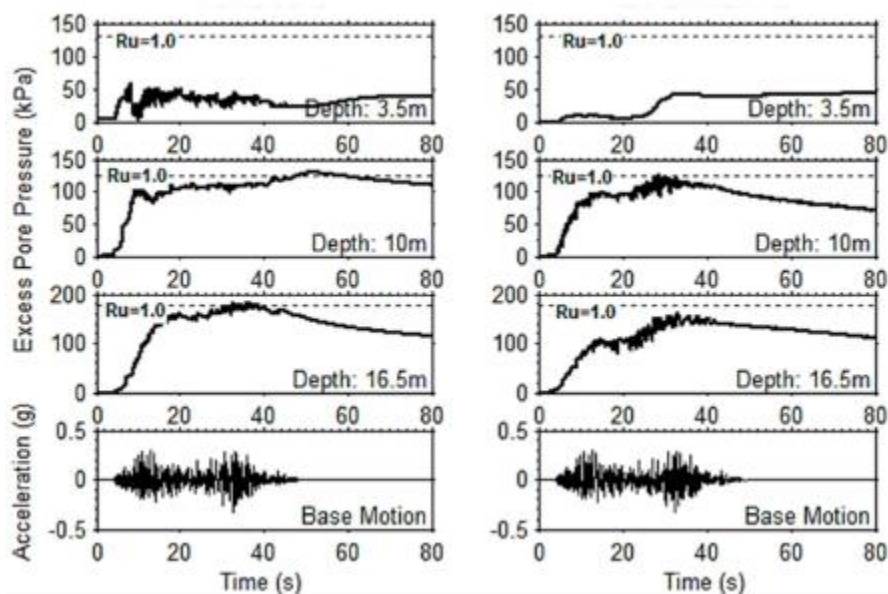
در محدوده وسیعی از حرکات زلزله باندپهن به دست آمده بود، استفاده کردند. آن‌ها در پژوهش خود

فشارهای آب منفذی اضافی و شتاب را در داخل خاک میدان آزاد و زیر پی به صورت عددی محاسبه کرده و با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی مقایسه کردند و مطابقت مناسبی همان‌طور که در شکل‌های (۷-۲) تا (۸-۲) مشاهده شد، به دست آمد. نتایج آزمایش تجربی و عددی هر دو نشان‌دهنده عدم کاهش شتاب در زیر پی در مقایسه با خاک میدان آزاد در فرکانس‌های بالا بود که آن‌ها دلیل این امر را نیز درجه بزرگ‌تر تولید فشار آب منفذی اضافی و کاهش قدرت در میدان آزاد در مقایسه با خاک تحت فشار محصور سازه دانستند.



شکل ۷-۲ مقایسه نتایج عددی (چپ) با نتایج آزمایشگاهی (راست) در عمق‌های مختلف در مدل میدان آزاد برای

اضافه فشار آب منفذی و شتاب (Karimi and Dashti, 2015)



شکل ۸-۲ مقایسه نتایج عددی (چپ) با نتایج آزمایشگاهی (راست) در عمق‌های مختلف زیر مرکز پی برای اضافه فشار آب منفذی و شتاب (Karimi and Dashti, 2015)

(Ayoubi and Pak, 2017) با بیان این‌که نشست پی‌های سطحی در معرض بارگذاری زلزله و پیامدهای آن یکی از مهم‌ترین مسائلی است که باید در طراحی سازه‌های مختلف در نظر گرفته شود به بررسی یک پی سطحی که بر روی دو لایه خاک قرار گرفته و تحت بارگذاری لرزه‌ای است پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود از آنالیز دینامیکی سه‌بعدی u-p در نرم‌افزار Opensees برای بررسی اثرات پارامترهای مختلف بر روی نشست پی سطحی واقع بر روی دو لایه خاک پرداختند. طبق نتایج پژوهش آن‌ها نتایج زیر حاصل شد:

۱- اگرچه مقدار I_u در زیر پی‌های سطحی کمتر از مقدار آن در میدان آزاد بود ولی با

توجه به وزن سازه، نشست زیر پی بزرگ‌تر از نشست میدان آزاد بود.

۲- از منظر نشست، وجود یک لایه ماسه متراکم باعث بهبود عملکرد پی شد.

۳- اگر لایه بالایی خاک متراکم باشد، نشست حاصل از روانگرایی با افزایش عمق لایه

متراکم، تقریباً به صورت خطی کاهش یافت و از آنجایی که حداکثر نشست در فصل

مشترک دو لایه رخ داد باید از قرار دادن تأسیسات زیرزمینی مثل خطوط لوله در این

ناحیه خودداری کرد.

۴- نشست حاصل از روانگرایی به‌طور کلی با افزایش عمق پی افزایش یافت.

۵- میزان نشست زمانی که پی بر روی یک لایه روانگرایی سست که این لایه در بالای یک لایه غیرروانگرایی متراکم قرار گرفت نسبت به زمانی که لایه متراکم در بالای لایه سست قرار می‌گیرد، بیشتر بود.

۶- حداکثر شتاب زمین (PGA) و فشار در سطح تماس هر دو بر روی نشست حاصل از روانگرایی تأثیر افزایشی داشتند اگرچه به نظر رسید که تأثیرات PGA زمانی که لایه سست در بالا قرار گرفت بیشتر بود.

(Tang et al., 2015) با توجه به اینکه ستون سنگی محصور شده با ژئوسنتتیک (ESC)

به‌طور گسترده برای بهبود عملکرد خاک‌های نرم مورد استفاده قرار می‌گیرد به مطالعه عددی در مورد کاهش روانگرایی با استفاده از این روش در خاک‌های ماسه‌ای پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود از آنالیز سه‌بعدی اجزا محدود برای تحقیق در خصوص رفتار ماسه اشباع با استفاده از روش ESC پرداختند و تأثیر پارامترهای ضخامت (t)، سختی کششی (j)، نفوذپذیری ژئوسنتتیک و قطر ESC را بر روی تغییر شکل جانبی زمین بررسی کردند. طبق نتایج آن‌ها:

۱- استفاده از هر دو روش ستون سنگی (SC) و ستون سنگی محصور شده با ژئوسنتتیک

(ESC) باعث کاهش تغییر شکل جانبی لایه ماسه شد ولی روش ESC تقویت‌کننده سفت‌تری برای زمین بود که باعث جابجایی کمتری نسبت به SC شد که دلیل آن نیز محصورشدگی توسط ژئوسنتتیک‌ها بود.

۲- برای یک لایه ماسه با استفاده از ژئوسنتتیک با افزایش مقادیر t و j، به‌طور قابل توجهی میزان تغییر شکل جانبی زمین کاهش یافت.

۳- ژئوسنتتیک با نفوذپذیری کمتر از ۰/۱ متر بر ثانیه نسبت به تغییر شکل دائمی بی‌تأثیر

بود و با افزایش نفوذپذیری به بالاتر از ۱ متر بر ثانیه، تغییر شکل جانبی را کاهش داد.

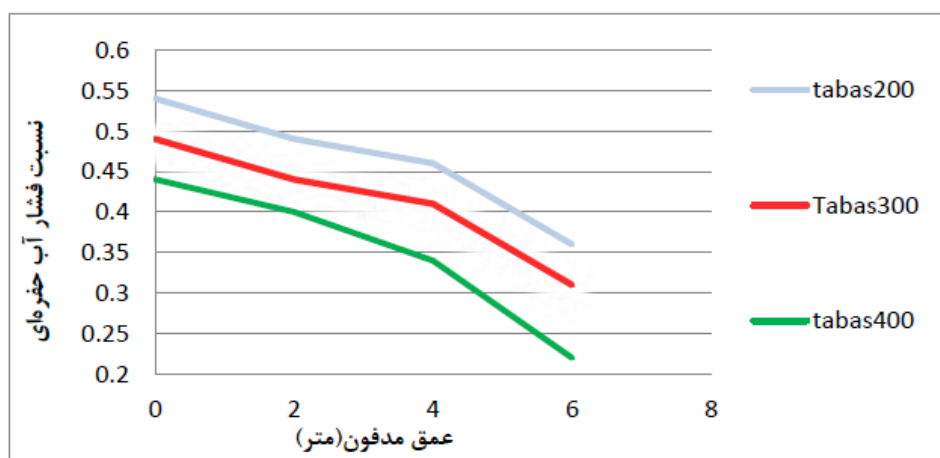
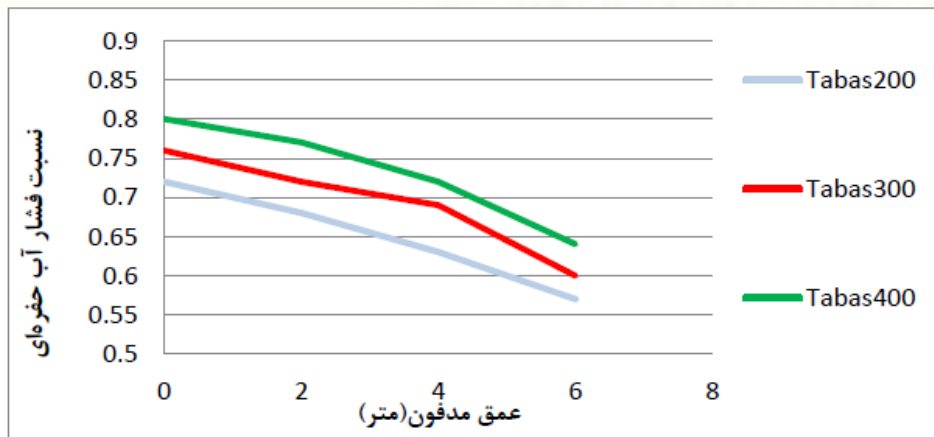
۴- افزایش قطر SC به طور مؤثری باعث کاهش تغییر جانبی لایه ماسه شد.

(Hashash et al., 2015) پاسخ یک نهشته با ضخامت ۲۶ متر از جنس ماسه نوادا خشک و با تراکم متوسط و چگالی نسبی ۶۰ درصد را با استفاده از آزمایش سانتریفیوژ و روش‌های عددی تحت حرکات افقی ۶ زلزله مختلف مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها پس از محاسبه پاسخ نهشته با استفاده از آزمایش سانتریفیوژ، نتایج خود را با استفاده از روش‌های مختلف آنالیز عددی شامل سه روش الف) آنالیز خطی ویسکوالاستیک و خطی معادل، ب) آنالیز غیرخطی، ج) آنالیز اجزا محدود در نرم‌افزار Opensees مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها اقدام به محاسبه پاسخ کلی خاک شامل پروفیل جابجایی خاک، پروفیل PGA، پروفیل حداکثر کرنش و طیف پاسخ شتاب با ۵٪ میرایی از روش‌های عددی و آزمایشگاهی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که آنالیز غیرخطی بیشترین همگرایی را با نتایج آزمایش سانتریفیوژ داشته که این مطابقت برای پروفیل حداکثر جابجایی خاک و پروفیل PGA بیشتر نمود داشته است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که آنالیز خطی در صورتی که حرکت زمین دارای PGA کمتر از ۰/۵g باشد تخمین معقولی برای جابجایی و PGA را نشان می‌دهد. آن‌ها معتقد بودند که روش خطی دارای محدودیت‌هایی است که شبیه‌سازی با این روش را زیر سؤال می‌برد که از جمله این محدودیت‌های آن‌ها به استفاده از یک مدول برشی و میرایی ثابت در کل زمان، ناچیز گرفتن مدول برشی و زیاد برآورد کردن میرایی در کرنش‌های کوچک اشاره کردند.

(Zeybek and Madabhushi, 2017) به بررسی استفاده از روش تزریق هوا برای به‌سازی خاک‌های روانگرا پرداختند. برای این منظور از ۵ سری آزمایش سانتریفیوژ در درجه‌های اشباع مختلف و فشار پی مختلف استفاده کردند. خاک مورد استفاده دارای تراکم نسبی ۴۰ درصد و ۲۴۰ میلی‌متر ارتفاع بود. شتاب هدف مورد استفاده ۷۰g بود. هوا در شتاب هدف و پیش از اینکه لرزشی به خاک اعمال شود برای اینکه نمونه‌ها غیراشباع گردند به آن تزریق شد. ابتدا فشار هوا به سرعت زیاد شد و

آن امر موجب مشاهده حباب‌های هوا در سطح خاک و نشست ۲/۵۷ پی (در مقیاس واقعی ۱۸۰ میلی متری) شد که به هیچ وجه مورد پذیرش نبود. سپس فشار هوا به صورت آرام و تدریجی اضافه شد که باعث نشست ۰/۲ میلی متری پی (در مقیاس واقعی ۱۴ میلی متری) شد. لذا مشخص شد که اثر تزریق هوا و کنترل دقیق آن در کاهش نشست موثر است. در نمونه‌های اشباع مشخص شد که نشست متقارن و تغییر شکل‌ها بیشتر در دو لبه پی و خاک زیر آن رخ داده اما در نمونه‌های غیر اشباع تغییر شکل موضعی و نامتقارن بود و تغییر شکل به سمت پایین و در واقع قائم بود.

(آریج و جانعلی زاده چوب بستی، ۱۳۹۸) در شهر محمودآباد به بررسی تاثیر دو عامل عمق مدفون و سربار بر پتانسیل روانگرایی پرداختند. در پژوهش آن‌ها از نرم افزار FLAC 2D که بر اساس روش تفاضل محدود کار می‌کند استفاده گردید. در این نرم‌افزار برای ایجاد تغییرات فشار آب منفذی از مدل رفتاری فین استفاده گردید. بر اساس گزارشات جمع‌آوری شده با کمک آزمایشات ژئوتکنیکی، پروفیل قالب و مستعدترین تیپ خاک جهت روانگرایی در منطقه محمودآباد و همچنین تغییرات سطح آب زیرزمینی در این منطقه مشخص شد و بدترین شرایط برای بررسی انتخاب شد. مراحل انجام کار شامل ایجاد هندسه مدل، اعمال شرایط اولیه یا همان بارهای استاتیکی و تحلیل آن، اختصاص شرایط وزه تحلیل دینامیکی به مدل، نحوه اعمال بار، میرایی، انتخاب و اختصاص مدل رفتاری مناسب و انجام تحلیل بود. شتاب‌نگاشت‌های موردنظر نیز طیس، کوبه و منجیل بودند. بر اساس نتایج مشخص شد که در خاک متراکم با افزایش میزان سربار کاهش روانگرایی بصورت مرتب وجود دارد اما اگر خاک سست باشد همواره افزایش پتانسیل روانگرایی رخ خواهد داد و در خاک سست و متراکم با افزایش عمق مدفون همواره کاهش پتانسیل روانگرایی رخ داد (شکل ۲-۹). با افزایش عمق مدفون و افزایش سربار در اعماقی که خاک متراکم است میزان کرنش برشی ماکزیمم همواره کاهش یافت که این مساله در اعماقی که خاک سست نیز بود عینا مشاهده شد.

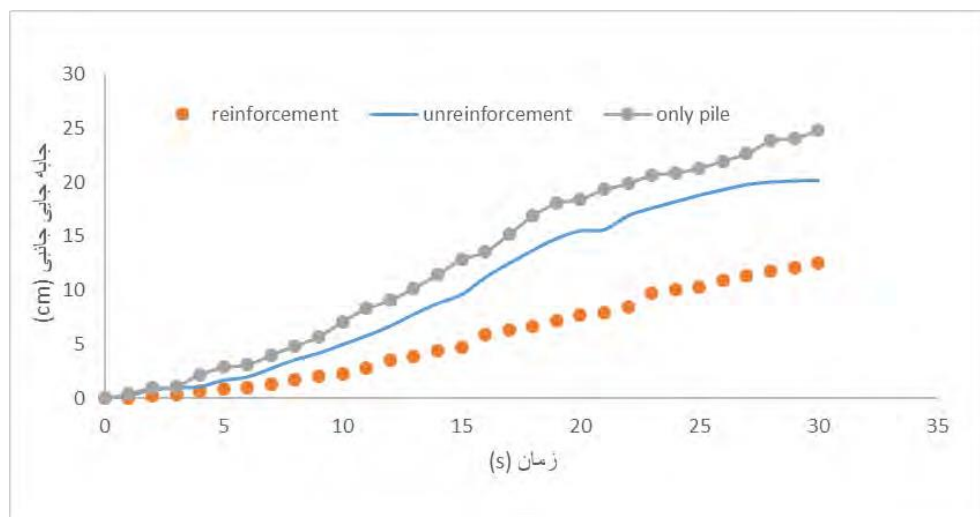


شکل ۲-۹ نسبت فشار آب منفذی برای سرباره‌های مختلف در اعماق مدفون مختلف در خاک سست و متراکم (آریج و

جانعلی زاده چوب بستی، ۱۳۹۸)

(شرقی و کرمی، ۱۳۹۸) در پژوهش خود تاثیر تسلیح ستون سنگی و تغییرات قطر آن را در افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست و ظرفیت روانگرایی خاک به صورت سه بعدی در یک مجموعه مرکب از شمع و ستون بررسی کردند. در این پژوهش برای مدل‌سازی به روش عددی از نرم‌افزار FLAC 3D استفاده شد. با توجه به بررسی‌های انجام شده ابعاد مناسب بصورت ۸*۸ متر بین ستون سنگی و شمع‌ها انتخاب شد تا کمترین اندرکنش بین آن‌ها بوجود آید. ابعاد کلی مدل نیز ۲۰*۲۰ بود. ماسه انتخاب شده نوادا، زلزله انتخاب شده زلزله ال‌سنتر و مدل رفتاری انتخاب شده مدل موهر کلمب بود. بر اساس نتایج بدست آمده مشخص شد که استفاده از ستون سنگی غیرمسلح به همراه گروه شمع می‌تواند جابه‌جایی جانبی کل مجموعه را ۲۰ درصد کاهش دهد. کاهش جابه‌جایی

۵۰ درصدی در زمانی که از ستون سنگی مسلح شده در مجموعه شمع و ستون سنگی استفاده شد، رخ داد (شکل ۲-۱۱). استفاده از ستون سنگی غیر مسلح و مسلح در مجموعه ترکیبی شمع و ستون سنگی باعث افزایش ظرفیت باربری به ترتیب تا ۱۰ درصد و ۵۰ درصد شد. بالارفتن قطر سنگی در مجموعه ترکیبی شمع و ستون سنگی باعث کاهش ۱۲ تا ۱۵ درصدی در میزان جابه‌جایی جانبی مجموعه شد. افزایش قطر ستون سنگی در حالت بدون مسلح کننده ظرفیت باربری را ۷ درصد افزایش داد. استفاده از ستون سنگی غیرمسلح نشست حاصل از روانگرایی و زلزله را در مجموعه ترکیبی شمع و ستون سنگی نسبت به حالت شمع بتنی تنها تا ۵۰ درصد کاهش داد.



شکل ۲-۱۰ مقایسه جابجایی جانبی در اثر روانگرایی در سه حالت استفاده از: ستون سنگی غیرمسلح، ستون سنگی

مسلح و بدون ستون سنگی (شرقی و کرمی، ۱۳۹۸)

(خادمی دستجردی و همکاران، ۱۳۹۸) با کمک مدل رفتاری NTUA-SAND در نرم افزار

FLAC 3D به پژوهش در مورد تاثیر بارهای لرزه‌ای بر روی مقدار نشست ناشی از روانگرایی در بستر

همگن ماسه‌ای پرداختند. برای بررسی صحت‌سنجی در این پژوهش از آزمایش شماره یک VELACS

این مسئله تطابق دارد، استفاده شد. در این آزمایش رفتار خاک روانگرا شونده یعنی ماسه نوادا تحت

شتاب ۵۰g مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۲-۱۰) نشان‌دهنده کلیه نتایج این پژوهش بود که طبق

آن:

✓ با افزایش میزان سختی خاک، مقادیر نشست کاهش یافت که البته این دور از انتظار نبود.

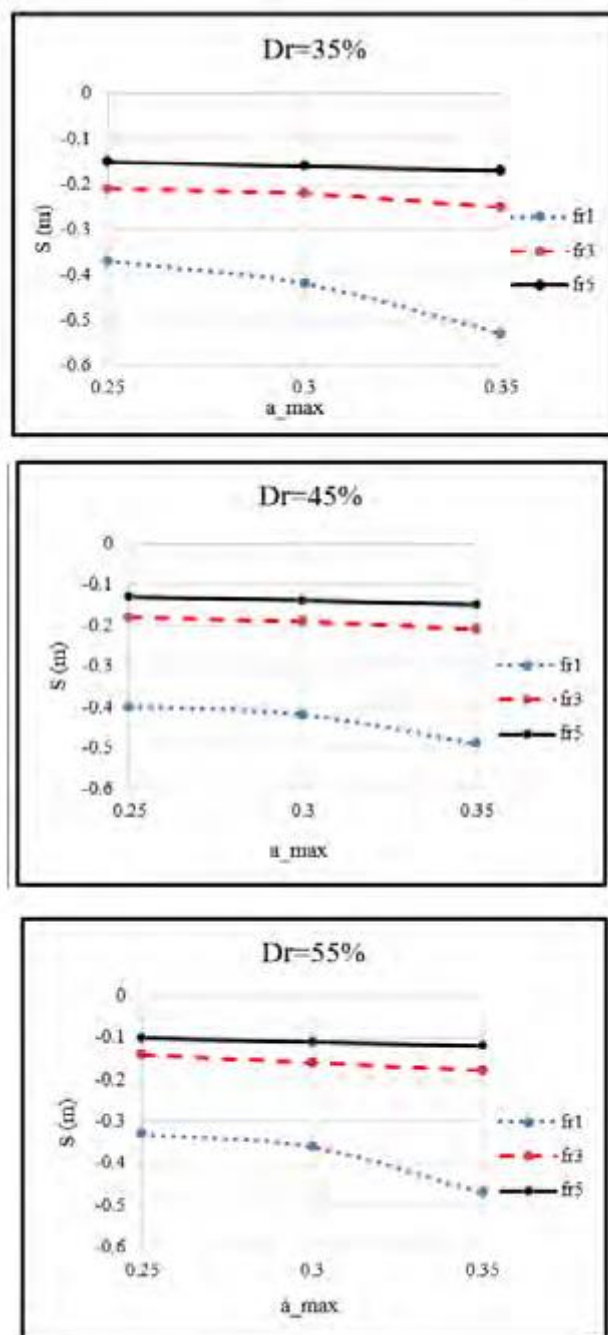
✓ انرژی موج با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد از این رو مقدار نشست خاک نیز کاهش می‌یابد.

✓ با افزایش زمان اعمال بار لرزه‌ای و همچنین شدت آن، فشار آب منفذی افزایش می‌یابد که دلیل آن نیز افزایش تنش برشی سیکلی می‌باشد و در نتیجه اسکلت خاک از بین می‌رود و نشست خاک افزایش می‌یابد

✓ هر دو پارامتر فرکانس و بارگذاری شتاب بیشینه بصورت کاملاً مستقل از یکدیگر تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر میزان نشست دارند.

(حاجتی ضیابری و میراعلمی، ۱۳۹۸) در پژوهش خود به بررسی رفتار لرزه‌ای پی‌های سطحی که بر روی ماسه روانگرا قرار گرفته به شیوه عددی پرداختند. آن‌ها با کمک نمونه‌برداری از خاک و تحقیقات صحرایی و آزمایشگاهی بر روی ماسه شهر آستانه و سپس تعیین پارامترهای مقاومتی خاک و مدلسازی شرایط پی به بررسی نمودارهای مختلفی شامل جابجایی در مقابل زمان، ظرفیت باربری در مقابل زمان، کانتورهای تنش فن میسز و تغییر مکان پرداختند. آن‌ها جهت مدلسازی از نرم افزار آباکوس استفاده کردند و مقطع ستون فولادی از نوع قوطی، پی بتنی را از نوع مستطیلی و ابعاد باکس خاک را $100 * 70 * 20$ انتخاب کردند. طبق پژوهش بیشترین تنش فن میسز در ستون‌های گوشه رخ داد. بیشترین تنش در پی بتنی نیز در نقاطی رخ داد که تنش فن میسز بیشینه بود. مقادیر تنش‌ها در محل قرار گرفتن پی بتنی و هم‌چنین المان خاک قابل توجه بوده است. مقادیر تغییر مکان‌ها در پی بتنی، ستون‌ها و بصورت ویژه در المان خاک قابل توجه بود بگونه‌ای که در نقاطی از المان خاک میزان جابه‌جایی‌های قائم تا حدود ۲۰ سانتی‌متر نیز می‌شد. نحوه تغییرات جابه‌جایی قائم بصورت غیرخطی بود. در مرحله‌ای که ۸۰ درصد بارگذاری به نمونه شبیه‌سازی شده وارد شد، یک پرش در تغییر مکان مشاهده شد و تغییر مکان قائم با شیب تندتری افزایش یافت. با اعمال شرایط مرزی و بارگذاری نمونه

شبيه سازى شده، ظرفيت باربرى کاهش قابل توجهى داشته است و اين کاهش در حدود ۸۰ بود. دو معيار تسليم موهر كولمب و دراگر پراگر تفاوت چندانى در نتايج ايجاد نكردند. گرچه ظرفيت باربرى برآورد شده از معيار تسليم موهر كولمب اندكى بيشتر از معيار تسليم دراگر پراگر بوده است.

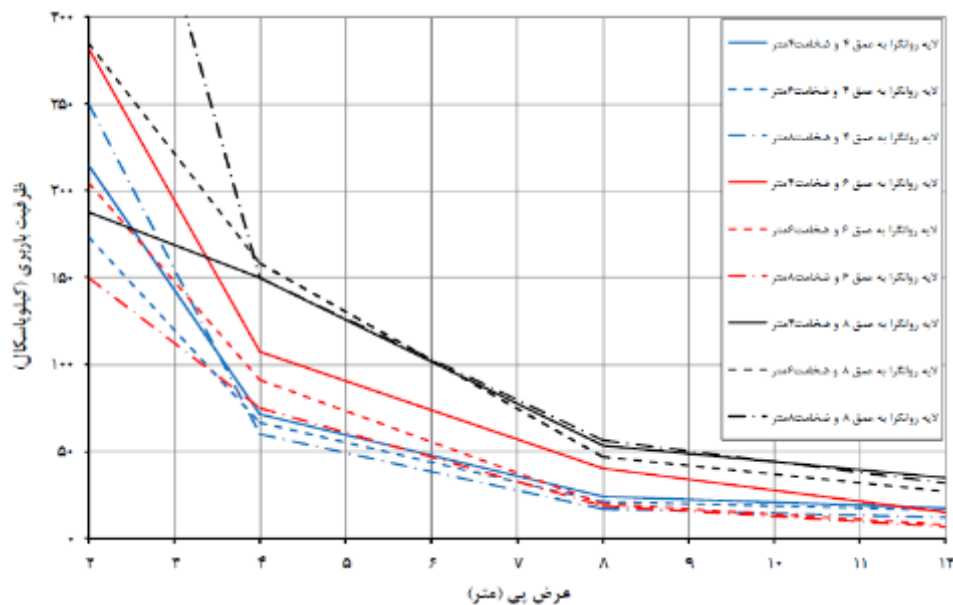


شکل ۱۱-۲ بررسی تاثیر تراکم و فرکانس زلزله بر روی نشست خاک روانگرا (خادمی دستجردی و همکاران، ۱۳۹۸)

(مرادی و جعفریان، ۱۳۹۴) بیان کردند که پارامترهای مختلفی بر مقادیر نشست پی‌های سطحی متکی بر خاک‌های روانگرا تأثیرگذار است که در این میان، اثر پارامترهای موج ورودی زلزله به خوبی شناخته نشده است. در این تحقیق به بررسی اثر پارامترهای موج ورودی بر مقادیر نشست سازه پرداخته شد. برای این منظور، در ابتدا مدل عددی پیشنهاد شده با نتایج آزمایش سانتریفیوژ مورد صحت سنجی قرار گرفت و سپس مقادیر نشست سازه تحت سه زلزله متفاوت با ۵ سطح شتاب بیشینه با هم مقایسه شدند. نتایج نشان داد که پارامترهای شتاب بیشینه و محتوای فرکانسی موج ورودی، بر روی مقادیر نشست تأثیرگذار هستند؛ اما به تنهایی هیچکدام برای تخمین اثر موج ورودی بر مقادیر نشست نمی‌توانند معیار مناسبی باشند. در مقابل، پارامترهای دارای واحد سرعت دارای تطابق مناسبی با مقادیر نشست هستند و به تنهایی می‌توانند معیار خوبی برای تخمین اثر موج ورودی بر مقدار نشست باشند که دلیل این امر نیز این است که پارامترهای دارای واحد سرعت و پروفیل خاک روانگرا شده هر دو از نوع پارامترهای فرکانس متوسط می‌باشند. در ضمن باید گفت که برای شرایط متفاوت نظیر استفاده از ماسه‌های با تراکم بالاتر و پی‌های دارای عرض بیشتر نیازه بررسی‌های بیشتر و دقیق‌تری است. اما با این وجود می‌توان پارامتری را یافت که همبستگی مناسبی با مقادیر نشست پی‌های سطحی متکی بر خاک روانگرا که پدیده‌های پیچیده است، داشته باشد.

(صفرپور و همکاران، ۱۳۹۱) در پژوهش خود به بررسی عوامل موثر بر ظرفیت باربری پی‌ها شامل عمق و ضخامت لایه روانگرا پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود از نرم‌افزار FLAC 3D استفاده کردند. برای بررسی این موضوع از پارامترهای ماسه بابلسر که از طریق آزمایشات صحرایی و آزمایشگاهی مجتمع نخل طلایی بابلسر بدست آمده بود، استفاده گردید. برای مدلسازی از چهار نوع پی سطحی مربعی با عرض‌های متغیر ۲، ۴، ۸ و ۱۲ متر واقع بر سطح زمین استفاده شد. بار اعمالی به پی‌ها بصورت گسترده و برابر با ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ کیلو پاسکال فرض شد. ارتفاع مدل ۲۰ متر در نظر گرفته شد و فرض شد که دو لایه ماسه متراکم و یک لایه سست وجود داشته باشد. نتایج بدست آمده

طبق شکل (۲-۱۲) نشان دهنده آن بود که با افزایش عرض پی مقدار ظرفیت باربری کم می شود که علت آن نیز این اعلام شد که عمق موثر با افزایش عرض پی، افزایش می یابد. تاثیر افزایش عمق لایه روانگرا بر افزایش ظرفیت باربری در مورد پی های با عرض کمتر بیشتر بود. در خاک های لایه ای مستعد روانگرایی، آن چه کنترل کننده ظرفیت باربری خواهد بود معیار نشست است در حقیقت مقدار ظرفیت باربری محاسبه شده بر اساس معیار نشست کمتر از معیار گسیختگی خواهد بود که این امر در پی های با عرض بالاتر نمود بیشتری خواهد داشت.



شکل ۲-۱۲ رابطه عرض پی و ظرفیت باربری به ازای عمق و ضخامت های مختلف روانگرایی (صفرپور و همکاران،

(۱۳۹۱)

به عنوان یک جمع بندی از پژوهش های انجام شده می توان گفت که، Shahir and Pak به بررسی یک رابطه کلی برای تخمین نشست پی قرار گرفته با خاک روانگرا و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی پرداختند. Karimi and Dashti به بررسی فشارهای آب منفذی و شتاب در خاک میدان آزاد و زیر پی به دو صورت عددی و آزمایشگاهی پرداختند. علاوه بر تطابق این دو روش، نتایج

نشان‌دهنده عدم کاهش شتاب در زیر پی در مقایسه با خاک میدان آزاد بود. Ayoubi and Pak به بررسی نشست پی سطحی واقع بر ۲ لایه خاک پرداختند و مشخص شد لایه ماسه متراکم باعث بهبود عملکرد پی از نظر نشست می‌شود بطوریکه میزان نشست با عمق افزایش می‌یابد ولی زمانی که لایه روانگرا در پایین لایه غیرروانگرا قرار می‌گیرد این میزان نشست کمتر از حالت عکس قرارگیری لایه‌ها می‌شود. Tang et al. به بررسی اثر پارامترهای مختلف مثل قطر، ضخامت، سختی کششی و ... در اثر استفاده از ستون سنگی محصور شده با ژئوسنتتیک بر روی کاهش روانگرایی خاک پرداختند. Hashash et al. پاسخ کلی خاک شامل جابجایی، پروفیل PGA و ... را با روش‌های عددی مختلف و آزمایشگاهی مقایسه کردند و مشخص شد که از بین روش‌های عددی، روش آنالیز غیرخطی بهترین همگرایی را با نتایج آزمایشگاهی دارد. Zeybek and Madabhushi به بررسی اثر تزریق هوا برای بهسازی خاک روانگرا پرداختند برای این منظور نشست پی قرار گرفته بر روی خاک روانگرا را در اثر تزریق هوا مورد محاسبه و کارایی این روش را تایید کردند.

۳- فصل سوم

روش تحقیق

۱-۳ مقدمه

مسائل ژئوتکنیکی شامل سازه‌های بزرگ و غیر همگن، دارای محیط چند فازه با اندرکنش با یکدیگر هستند. رفتار خاک، غیرخطی، غیرهمسان، تابع مسیر بارگذاری است که این موارد، در مورد مسائل دینامیکی از اهمیت بیشتری برخوردار است ازین رو حل مسائل مهندسی ژئوتکنیک پیچیده گردیده است.

مدل‌های رفتاری که مشخصه‌های بیشتری از رفتار ماسه را در بردارند، همواره قادر به پیش‌بینی نتایج دقیق‌تر در مدل‌سازی عددی هستند. لذا مدل رفتاری مورد استفاده در این تحقیق بایستی قادر به مدل‌سازی خصوصیات رفتاری اصلی ماسه اشباع تحت بارگذاری لرزه‌ای باشد لذا در این فصل به معرفی اجزا و عناصر تحقیق و توضیحات راجع به آن‌ها پرداخته شده است.

۲-۳ تئوری محیط‌های متخلخل اشباع

خاک اشباع به صورت یک محیط دو فازه است که تغییر شکل فاز جامد و جریان فاز سیال به صورت همبسته هستند. توده خاک هنگام زلزله تحت تأثیر بارگذاری متناوب با شدت زیاد قرار می‌گیرد که در این محدوده رفتار خاک غیرالاستیک است. بنابراین، توده خاک بایستی به صورت یک محیط پیوسته و با در نظر گرفتن اندرکنش فازهای جامد و سیال مدل‌سازی گردد. به این نوع از تحلیل، تحلیل تنش مؤثر گفته می‌شود که به دو دسته کلی روش‌های همبسته و غیرهمبسته، قابل تقسیم هستند. در روش‌های غیرهمبسته تغییر شکل فاز جامد و ایجاد فشار آب حفره‌ای به صورت مستقل از هم بررسی می‌شوند. روش کار بدین صورت است که ابتدا تغییر شکل‌های ایجاد شده در توده خاک با تحلیل تک‌فازه به دست می‌آید. سپس اضافه فشار آب حفره‌ای با به‌کارگیری یک روش مناسب بر اساس تغییر شکل‌های فاز جامد محاسبه می‌گردد. شایان ذکر است که این روش زمانی که حرکت سیال در خاک به صورت ماندگار باشد قابل توجیه است اما در روش‌های همبسته تغییر شکل فاز جامد و اضافه فشار آب حفره‌ای به صورت همبسته محاسبه می‌گردند. فرمولاسیون همبسته، فیزیک حاکم بر محیط

متخلخل اشباع را بصورت کامل بیان می‌کند، لذا تحلیل‌هایی که در آنها از فرمولاسیون همبسته استفاده می‌شود، نتایج بهتری بدست می‌دهد (Elgamal et al. 2005).

در تحقیق حاضر سیستم خاک اشباع بر اساس سیستم دوفازی بر پایه تئوری بایوت برای محیط‌های متخلخل مدل‌سازی شده است. فرمولاسیون عددی این روش به $u-p$ شهرت دارد، که بر پایه فرضیات زیر بنا شده است (Elgamal et al. 2005):

✓ چگالی فاز مایع و جامد در فضا و زمان ثابت هستند.

✓ تخلخل در زمان ثابت است.

✓ ذرات خاک غیرقابل تراکم هستند.

✓ دو فاز مایع و جامد هر دو شتاب یکسان دارند.

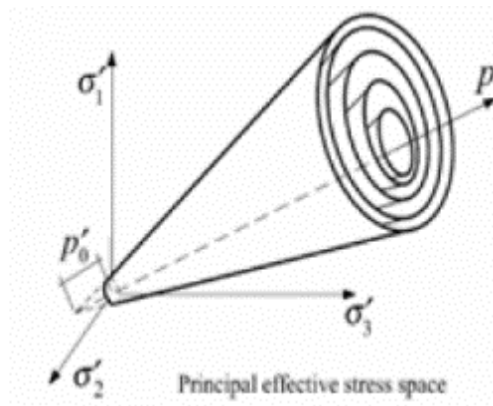
طبق فرمولاسیون $u-p$ خاک شامل سه فاز مایع، جامد و گاز است. به منظور آنالیز برای این مخلوط باید تعادل برای کل جرم رعایت شود. مجهولات ما در این مسئله تعادل شامل جابه‌جایی فاز مایع (u_s)، جابه‌جایی فاز مایع نسبت به فاز جامد (u_{rf}) و فشار فاز مایع (P) است. به منظور راحتی، می‌توان متغیرهایی که تأثیر کم و ناچیزی بر مسئله دارند را حذف نمود، به همین منظور با حذف جابه‌جایی فاز مایع نسبت به فاز جامد (u_{rf}) تعداد معادلات مسئله تعادل به دو عدد کاهش می‌یابد. از آنجایی که با توجه به الویت متغیرها اول معادله جابه‌جایی فاز جامد و سپس معادله جابه‌جایی فاز مایع قرار دارد. بنابراین به این‌ها معادلات $u_s - P$ یا به اختصار معادلات $u-p$ می‌گویند. که فرمول $u-p$ به صورت رابطه (۱-۳) است (Shahir & Pak, 2010):

$$M\ddot{U} + \int_V B^T \sigma^s dV - QP - f^{(s)} = 0 \quad (1-3)$$

$$Q^T \dot{U} + HP + SP - f^{(s)} = 0$$

در معادله (۱-۳)، M ماتریس جرم، U بردار جابه‌جایی فاز جامد، B ماتریس کرنش-جابه‌جایی،

σ' ماتریس تنش مؤثر، Q اپراتور گرادیان و معادلات جریان، P بردار فشار آب حفره‌ای، S ماتریس تحکیم، و H ماتریس نشت پذیری است. f^p و f^s اثرات بارهای خارجی و جریان مایعات هستند. خاک با استفاده از مدل چندصفحه‌ای یانگ با کمک نرم‌افزار اجزاء محدود $OPENSEES^{\circledR}$ مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌سازی خاک بر مبنای روش یانگ برای خاک‌های روانگرا صورت پذیرفته است. در این روش بر شبیه‌سازی بر مبنای مکانیسم کرنش برشی انباشته ناشی از روانگرایی در ماسه تمیز تأکید شده است. همچنین توجه ویژه‌ای بر اتساع تحت بارگذاری سیکلی شده است. بر اساس آنچه در تئوری پلاستیسیته کلاسیک مورد پذیرش قرار گرفته است، این‌طور فرض می‌شود که متریکال به‌کاررفته خطی و ایزوتروپیک هستند و غیرخطی شدن و غیرایزوتروپیک شدن در نتیجه پلاستیسیته است. تابع تسلیمی که در اینجا مورد استفاده قرار گرفته است به شکل و به فرم سطوح مخروطی در محیط تنش است، که نوک این مخروط‌ها در امتداد محور هیدرواستاتیک است. بر اساس مفهوم چند سطحی پلاستیسیته شاهد تعدادی از سطوح مشابه تسلیم با نوک مشابه و در اندازه‌های متفاوت به مانند شکل (۱-۳) هستیم. همان‌طور که در شکل (۱-۳) نشان داده شده است، خارجی‌ترین سطح نشان‌دهنده مقاومت برشی اوج است (Elgamal, 2005).

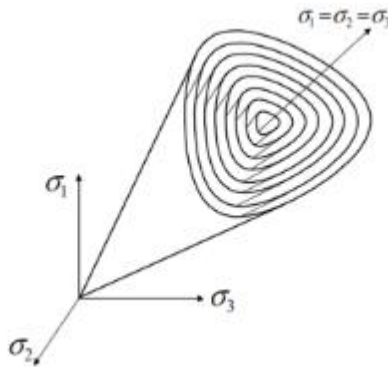


شکل ۱-۳ سطوح تسلیم مخروطی در محیط تنش‌های مؤثر اصلی (Elgamal, 2005)

در صورتی که ما شکل (۱-۳) را در محیط تنش‌های کلی اصلی رسم کنیم تابع تسلیم ما از

معیار شکستی که توسط Lade و Duncan پیشنهاد داده شد پیروی می‌کند. معادله این معیار شکست به صورت رابطه (۲-۳) خواهد بود:

$$f = \frac{I_1^3}{I_3} - k_1 = 0 \quad (2-3)$$



شکل ۲-۳ صفحات تسلیم Lade-Duncan در فضای تنش‌های اصلی

که I_3, I_1 به ترتیب اولین و سومین تنش ثابت‌اند و $k_1 (>27)$ پارامتر وابسته به مقاومت برشی خاک است (یا زاویه شکست Φ). مفهوم چندصفحه‌ای پلاستیسیته بدین صورت است که تعداد مشابه سطح مخروطی با نوک یکسان در ناحیه سخت‌شدگی هستند. در هر سطح مقدار مدول پلاستیسیته ثابت است. به صورت قراردادی مدول الاستیک با کرنش پایین است و در مورد مدول پلاستیک این‌طور فرض شده که همراه با تنش مؤثر همه‌جانبه اصلی به توان دو گسترش می‌یابد.

۳-۳ مواد و مصالح مورد استفاده

ماسه مورد استفاده در اینجا از نوع اشباع است. طبق راهنمای اپنسیس مقادیری برای پارامترهای ورودی برحسب نوع ماسه پیشنهاد شده است. اپنسیس ماسه با تراکم ۱۵ تا ۳۵ درصد را ماسه سست، تراکم ۳۵ تا ۶۵ درصد را ماسه متوسط و تراکم ۶۵ تا ۸۵ درصد را ماسه نسبتاً متراکم و ۸۵ تا ۱۰۰ درصد را ماسه متراکم می‌داند. اما این پارامترهای ورودی به اپنسیس وابسته تراکم خاک نیستند و بر مبنای توصیه‌های قسمت راهنمای اپنسیس استخراج شده‌اند. برای محاسبه دقیق پارامترها مقادیر ذیل که نتیجه کار (Chen et al., 2010) است و در جدول (۱-۳) آورده شده است، استفاده شده است.

جدول ۱-۳ روابط پارامترهای PDMY (Chen et al., 2010)

پارامتر	فرمول
$\rho(\frac{ton}{m^3})$	$2.11(D_r)^{0.1567}$
$G_{max}(kPa)$	$G_r = 10500 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} P_r^{0.4}$
$B_{max}(kPa)$	$B_r = G_r \frac{2(1 + \vartheta)}{3(1 - 2\vartheta)}$
$\varphi(\text{degree})$	$\varphi = 16.2D_r + 25$
$\varphi_{PT}(\text{degree})$	$\varphi_{PT} = 16.2D_r + 25$
$p_r(kPa)$	Constant
γ_{max}	Constant
N	Constant
c	$c = 0.0288D_r^{-1.4172}$
d1	$d_1 = 1.147D_r - 0.2454 \geq 0$
d2	$d_2 = 6.9686D_r - 1.7187 \geq 0$
l1	$l_1 = 10 \quad (D_r < 65\%)$ $l_1 = -35.484D_r + 32.5 \quad (D_r \geq 65\%)$
l2	$l_2 = -0.0154LnD_r - 0.0012$
l3	$l_3 = 1 \quad (D_r \leq 85\%)$ $l_3 = 0 \quad (D_r > 85\%)$
$k_h = k_v(\frac{m}{s} * 10^{-5})$	-
e	-
ϑ	-

که در آن ρ چگالی خاک، p_r فشار همه‌جانبه مرجع، G_{max} ماکزیمم اضافه فشار آب منفذی نسبت به فشار p_r ، B_{max} ماکزیمم مدول بالک به نسبت مقدار φ, p_r زاویه شکست، φ_{PT} زاویه فاز انتقال یا مرز میان اتساع و انقباض، N ضریب وابسته به فشار، C پارامتر انقباض، d_1 و d_2 پارامترهای اتساع، $11, 12$ و 13 پارامترهای روانگرایی، k_h و k_v ضرایب قائم و افقی نفوذپذیری، e نسبت تخلخل خاک و در نهایت ν ضریب پواسون خاک است (Chen et al. 2010).

در نرم‌افزار OpenSees از متریال PressureDependMultiYield که به‌اختصار متریال PDMY نام دارد، برای تعریف خاک ماسه استفاده می‌کنیم. این دستور دارای ویژگی‌هایی است که در ادامه بیان می‌شود. این متریال یک متریال الاستوپلاستیک می‌باشد که برای شبیه‌سازی پاسخ‌های خاک از قبیل اتساع انقباض و... تحت بارگذاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حین اعمال بار گرویتی (یا بار استاتیکی) رفتار خاک به‌صورت خطی الاستیک بوده و در بارگذاری سریع دینامیکی واکنش تنش-کرنش الاستوپلاستیک است. پلاستیسیته بر اساس اصل چند صفحه‌ای و همراه با قانون شرکت ناپذیری جریان است تا اثر اتساع را بازتولید کند. سطوح تسلیم بر اساس معیار دراگر-پراگر بیان شده‌اند. معیار دراگر-پراگر یک مدل وابسته به تنش است که برای مشخص کردن اینکه چه زمانی متریال وارد مرحله شکست می‌شوند. یا تحت تسلیم پلاستیک هستند استفاده می‌شود. این معیار برای استفاده در تغییر شکل‌های خاک‌ها معرفی شدند (Chen et al. 2010).

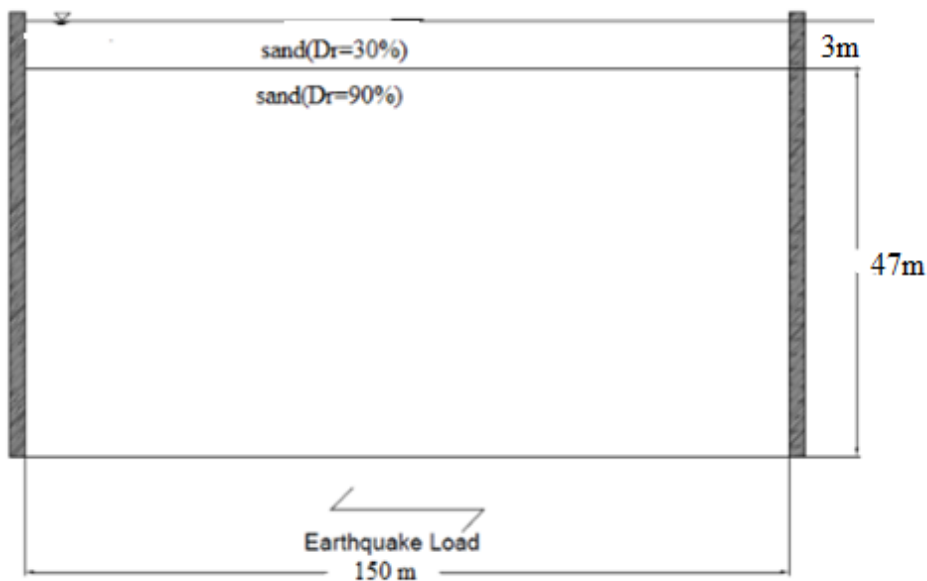
۴-۳ مدل‌سازی

مدل‌سازی بصورت دوبعدی بوده و مدل شامل یک باکس با ارتفاع ۵۰ متر و عرض ۱۵۰ متر هست. مش بندی المان‌ها متغیر بوده و از بالا به پایین ابعاد مش بندی بزرگ‌تر می‌شود. خاک کاملاً اشباع بوده و از کف و در جهت X تحت اثر بار لرزه‌ای (زلزله کوبه) با ماکزیمم شتاب $0.3g$ قرار می‌گیرد. زهکشی نمونه‌ها از انتها نبوده و فقط از سطح خاک امکان زهکشی وجود خواهد داشت. دیواره‌ها فرض

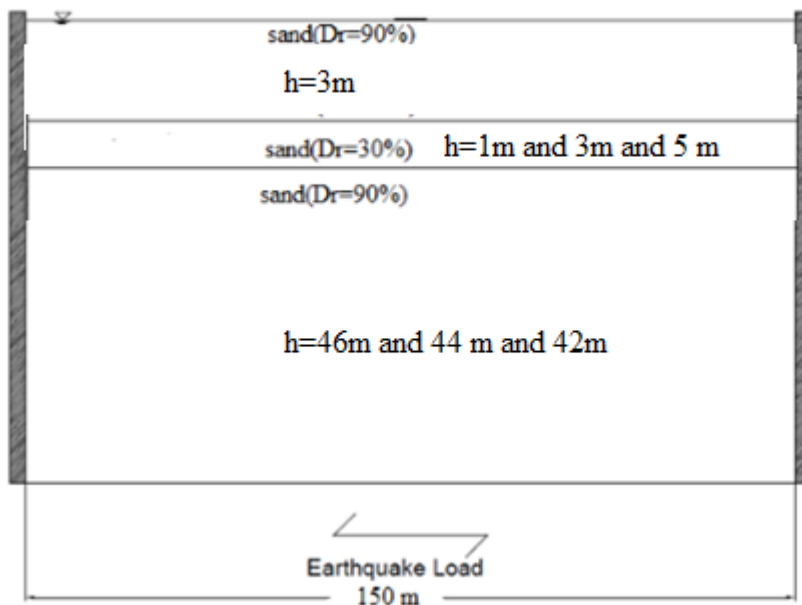
شده منعطف باشد و به جوانب توانایی جابه‌جایی دارند و هم چنین کف فیکس در جهت X و Y می‌باشد. نودهای همراستا به هم متصل شده‌اند تا رفتار یکسان وجود داشته باشد.

در نرم‌افزار OpenSees از متریال PressureDependMultiYield که به اختصار متریال PDMY نام دارد، برای تعریف خاک ماسه استفاده شده‌است. تراکم خاک برای کل لایه ۹۰ درصد و برای قسمت ماسه روانگرا این مقدار ۳۰ درصد در نظر گرفته شد. در ابتدا اثر عمق لایه روانگرا مورد بررسی قرار گرفت برای این منظور ضخامت لایه روانگرا ۳ متر در نظر گرفته می‌شود و از عمق ۱۵ متر به سمت سطح زمین جابجا می‌شود (شکل ۳-۳) تا اثر عمق لایه روانگرا بر روی نشست خاک، اضافه فشار آب حفره‌ای، شتاب نگاشت زلزله و پارامتر Γ_u بررسی شود. در مرحله دوم برای بررسی اثر ضخامت لایه روانگرا بر روی نشست خاک، اضافه فشار آب حفره‌ای، شتاب نگاشت زلزله و پارامتر Γ_u در یک عمق مشخص که در اینجا عمق تراز منفی ۳ متر و مقدار ضخامت لایه روانگرا ۱، ۳ و ۵ متر فرض شده است (شکل ۳-۴).

نحوه معرفی مدل به نرم‌افزار اپنسیس از طریق `code comment` یعنی تایپ دستورات در محیط نرم‌افزار می‌باشد.



شکل ۳-۳ شمای کلی باکس خاک برای لایه روانگرایی با ضخامت ۳ متر بین سطح زمین و تراز منفی ۳ متر

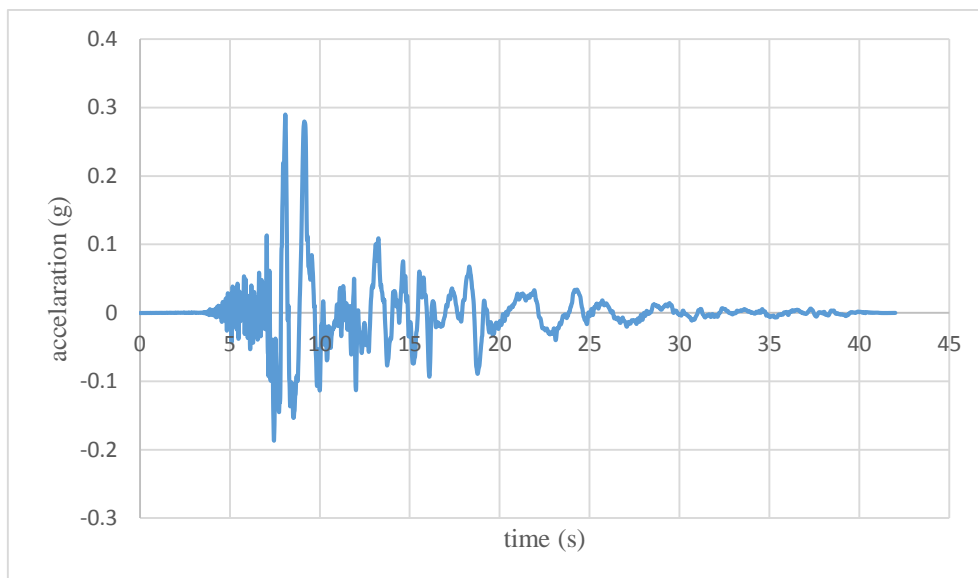


شکل ۳-۴ شمای کلی باکس خاک برای لایه روانگرایی با ضخامت ۱، ۳، ۵ متر در تراز منفی ۴، ۶ و ۸ متر

مدل سازی توسط نرم افزار اجزا محدود OpenSees به صورت دوبعدی صورت پذیرفته است.

نمودار شتاب نگاشت اعمالی در جهت افقی به باکس خاک در شکل (۳-۵) مطابق با شتاب نگاشت زلزله

کوبه نشان داده شده است.



شکل ۳-۵ شتاب‌نگاشت اعمالی به مدل

۳-۵ راستی آزمایشی مدل

از نتایج آزمون velcas شماره یک (No,1) بر اساس مقاله (Arulmoli et al, 1992) برای راستی آزمایشی استفاده شده است. در این مدل این طور فرض شده است که مترپال خطی و ایزوتروپیک‌اند و رفتار پلاستیک خاک موجب غیرخطی شدن و غیر ایزوتروپیک شدن می‌شود. مدل فرضی یک جعبه خاک ۱۰*۵۰ متر بوده که این ابعاد برای اینکه اثر امواج برگشتی حداقل باشد انتخاب شده‌اند. یک لایه غیرقابل نفوذ نیز انتخاب شد که نودهایی که کاملاً ثابت هستند در کف آن قرار دارند. نودهای سطحی امکان زهکشی آب را دارند (Esmaili & Hakimpour, 2015).

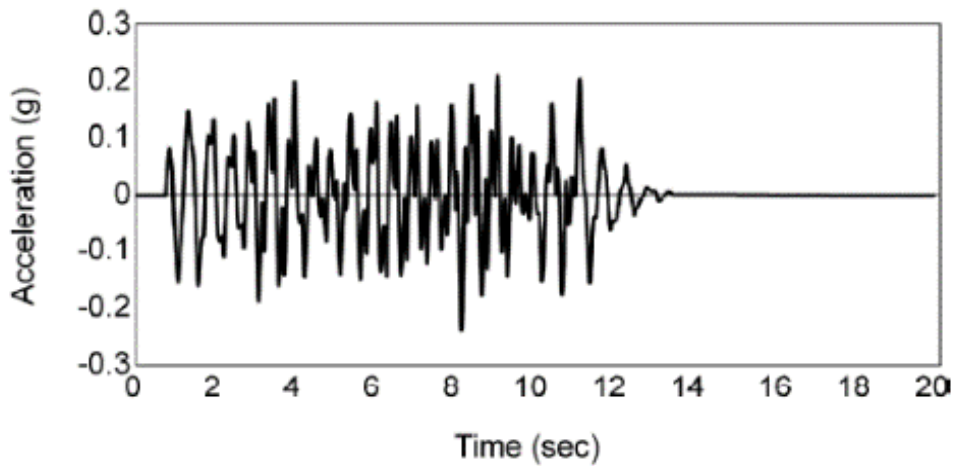
ماسه نوادا با تراکم $Dr=40\%$ در باکس استفاده شده است و مشخصات مترپال بر اساس مقاله

Arulmoli و همکاران بصورت جدول (۳-۲) است:

جدول ۲-۳ مشخصات ماسه نوادا با تراکم ۴۰ درصد (Arulmoli et al,1992)

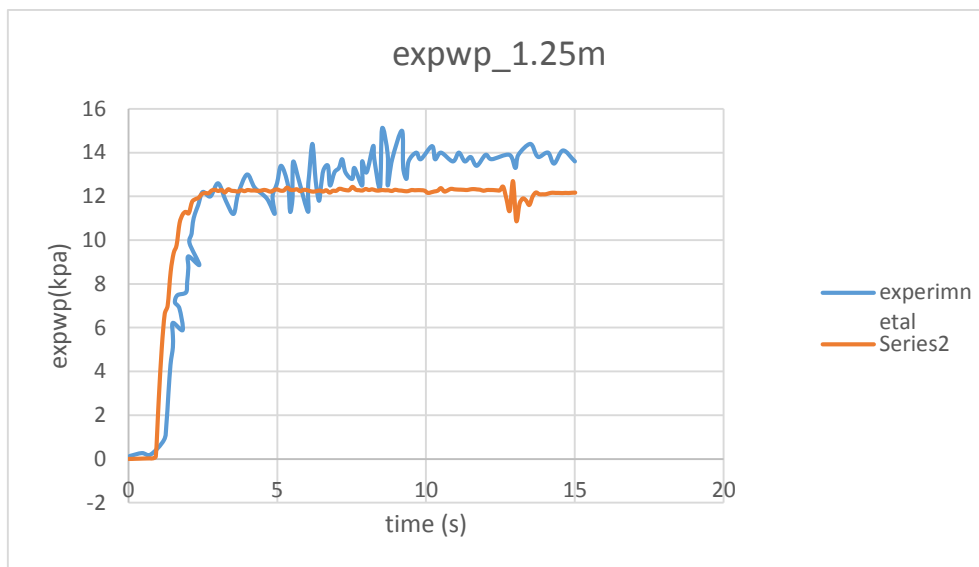
Characteristics	Cohesion	Permeability	N-SPT	Friction Angle	Shear Modulus	Dry Density	Poisson's Ratio	Porosity
Unit	kPa	m/s	Blows	Degree	MPa	Kg/m ³	-	-
Values	0	6×10^{-5}	7	30	3.85	1500	0.3	0.42

زلزله از کف و در جهت افقی به باکس اعمال شده است و در جهت عمودی شتابی به مدل اعمال نشده است. ماکزیمم شتاب زلزله $0.235g$ است و نمودار شتاب نگاشت بصورت شکل (۳-۳) می باشد (Esmaili & Hakimpour, 2015):

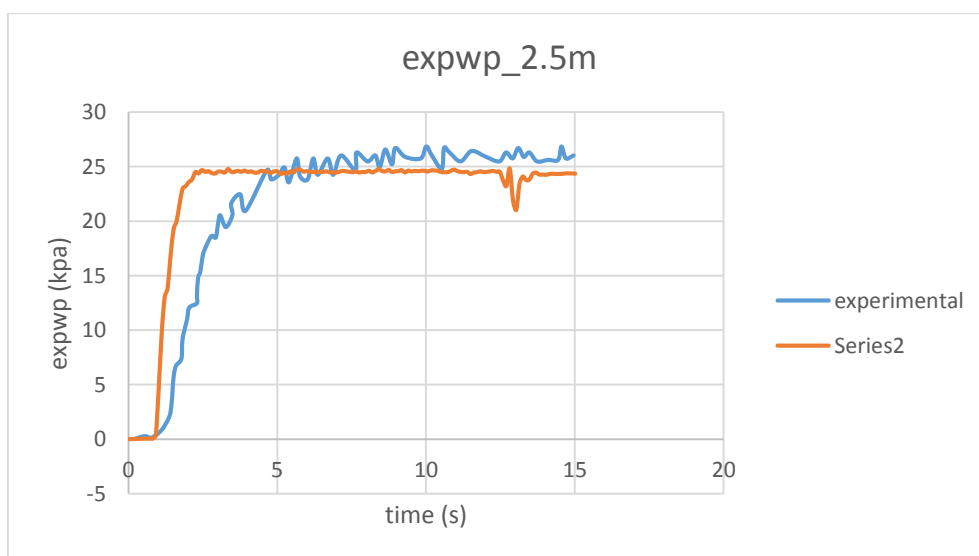


شکل ۳-۶ شتاب نگاشت اعمالی در جهت افقی به مدل (Esmaili & Hakimpour, 2015)

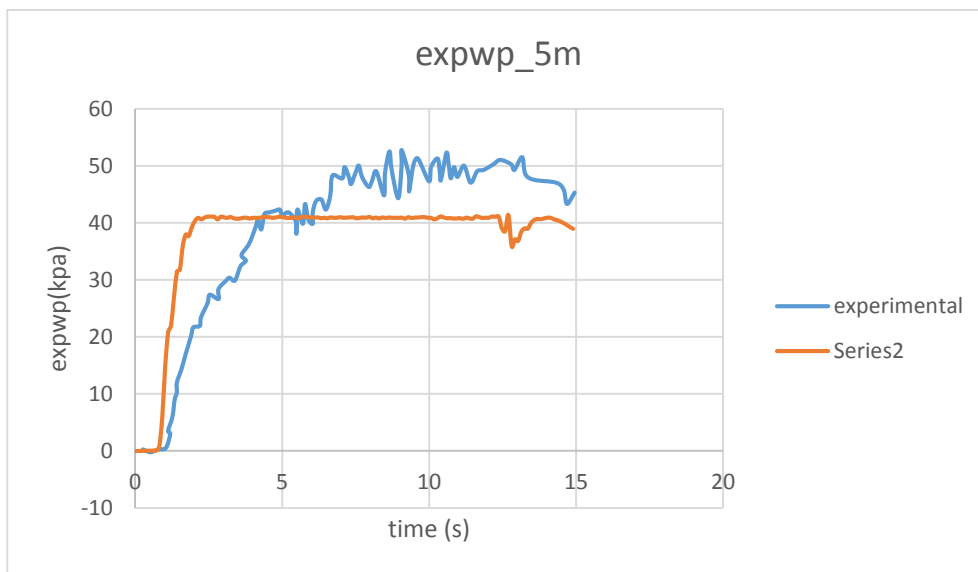
مقایسه نتایج اضافه فشار آب حفره‌ای در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی در اشکال (۳-۷، ۳-۸، ۳-۹ و ۳-۱۰) در اعماق مختلف، نشانگر نزدیک بودن دو مدل است و اختلاف نتایج کمتر از ۱۰ درصد می باشد که ثابت می کند مدل سازی استفاده شده در این مطالعه روند صحیحی را طی می کند. لازم به ذکر است نمودارهای قرمز رنگ مربوط به نتایج عددی و آبی رنگ مربوط به نتایج آزمایشگاهی هستند.



شکل ۳-۷ صحت‌سنجی مدل عددی با مدل آزمایشگاهی velcas برای اضافه فشار آب منفذی در عمق ۱/۲۵ متری سطح زمین

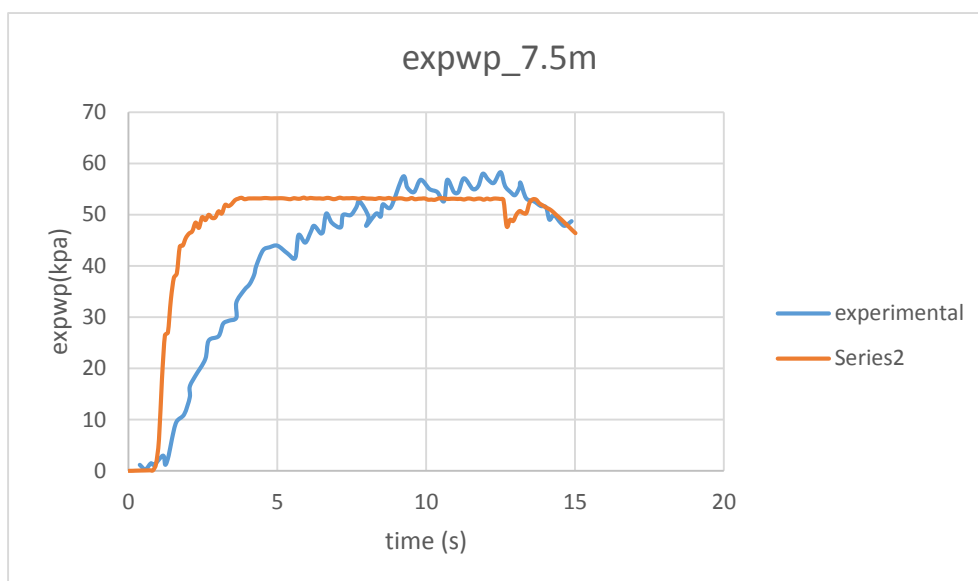


شکل ۳-۸ صحت‌سنجی مدل عددی با مدل آزمایشگاهی velcas برای اضافه فشار آب منفذی در عمق ۲/۵ متری سطح زمین



شکل ۳-۹ صحت‌سنجی مدل عددی با مدل آزمایشگاهی velcas برای اضافه فشار آب منفذی در عمق ۵ متری

سطح زمین



شکل ۳-۱۰ صحت‌سنجی مدل عددی با مدل آزمایشگاهی velcas برای اضافه فشار آب منفذی در عمق ۷/۵ متری

متری سطح زمین

۴- فصل چهارم

بررسی نتایج مدل سازی ها

۱-۴ مقدمه

در فصل‌های گذشته، به تعریف و بررسی مکانیسم پدیده روانگرایی و عوامل موثر بر آن پرداخته شده و سپس به مطالعات مختلف صورت گرفته بر روی خاک‌های روانگرا در شرایط مختلف پرداخته شد سپس به بررسی مواد و روش‌های بکار رفته در آنالیز پرداخته شد. تئوری محیط‌های متخلخل اشباع به‌عنوان تئوری حاکم بر فضای آنالیز ما توضیح داده شد و در نهایت مش بندی باکس بکار رفته در آنالیز، شرایط مرزی باکس و نوع بارگذاری آورده شد. در این فصل نتایج مربوط به مدل‌سازی‌ها بررسی می‌شود و نتایج به‌دست‌آمده مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

۲-۴ نتایج مربوط به اثر عمق لایه روانگرا

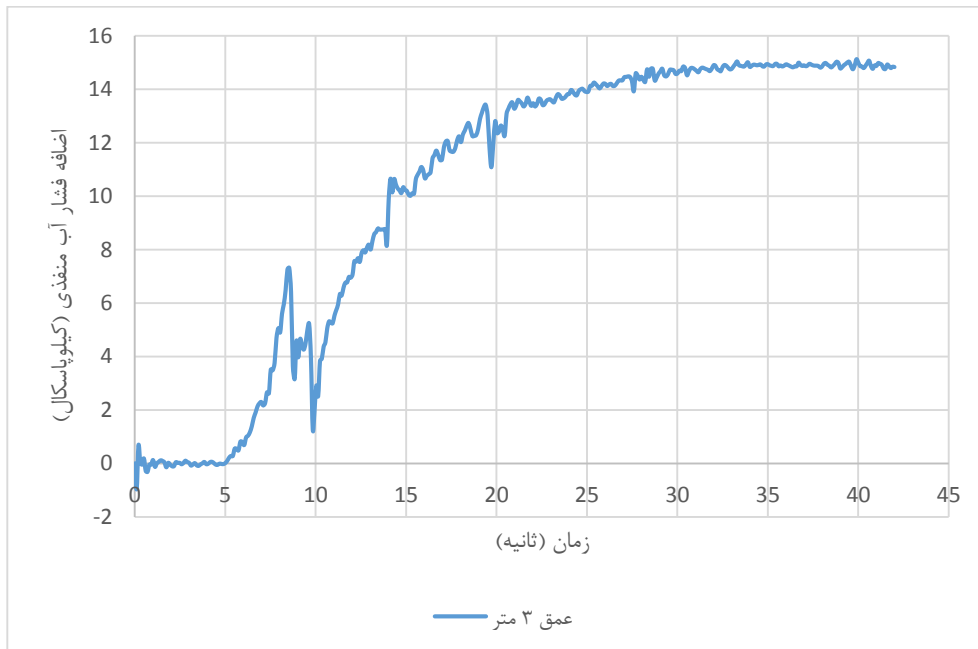
تراکم خاک برای کل لایه ۹۰ در صد و برای قسمت ما سه روانگرا این مقدار ۳۰ در صد در نظر گرفته شد. در ابتدا اثر عمق لایه روانگرا مورد بررسی قرار گرفت برای این منظور ضخامت لایه روانگرا ۳ متر در نظر گرفته می‌شود و از عمق ۱۵ متر به سمت سطح زمین جابجا می‌شود تا اثر عمق لایه روانگرا بر روی نشست خاک، اضافه فشار آب حفره‌ای، شتاب نگاشت زلزله و پارامتر I_u بررسی شود. نتایج حاصل به شرح ذیل بدست آمد.

۱-۲-۴ اضافه فشار آب حفره‌ای نسبت به زمان برای اعماق

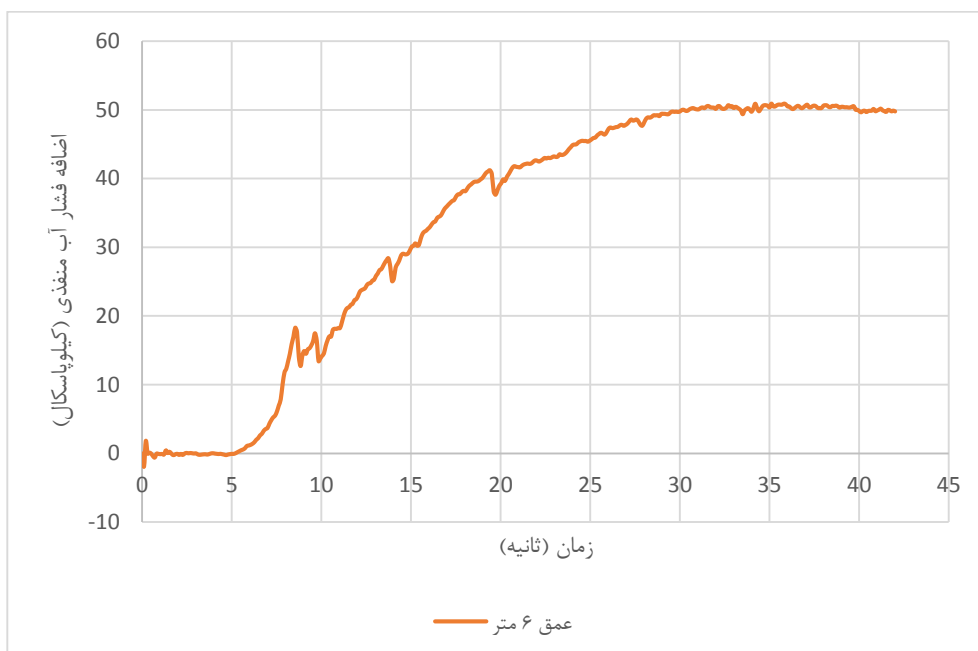
مختلف

در شکل‌های (۱-۴، ۲-۴، ۳-۴، ۴-۴ و ۵-۴) نسبت تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در زمین آزاد برای زمانی که لایه روانگرا به ضخامت ۳ متر به ترتیب در اعماق ۰ تا ۳، ۳ تا ۶، ۶ تا ۹، ۹ تا ۱۲ و ۱۲ تا ۱۵ متر قرار دارد، نشان داده شده است. بر اساس شتاب‌نگاشت ماکزیمم تغییرات شتاب نگاشت در بازه زمانی ۶ تا ۲۵ ثانیه رخ داده است و بر اساس این اشکال نیز می‌توان نتیجه گرفت در این بازه

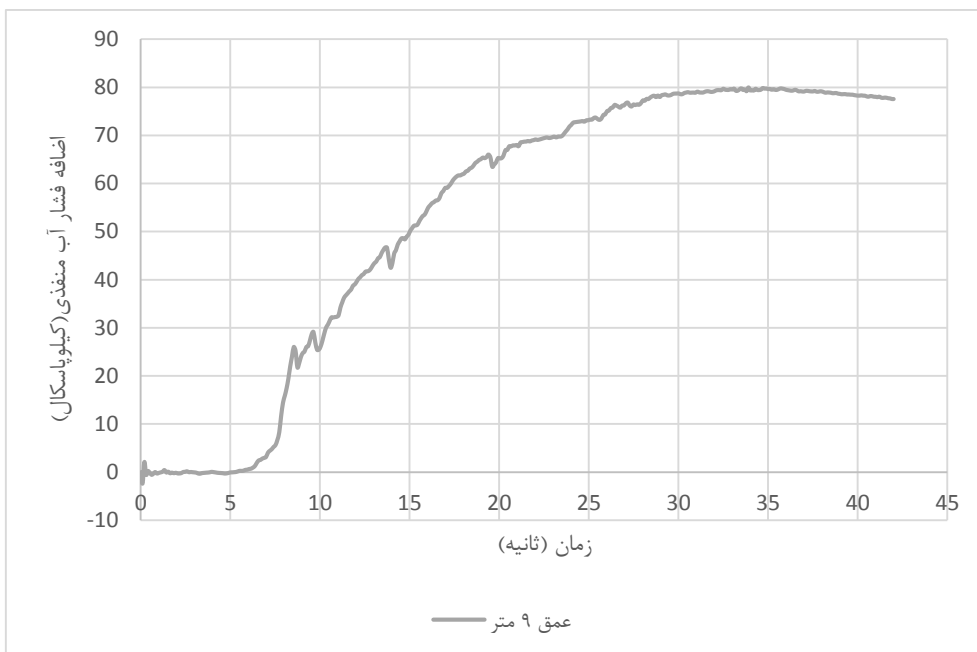
زمانی بیشترین تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در تمام عمق‌ها رخ داده است. پس از فروکش کردن شتاب‌های ماکزیمم زلزله، به تدریج روند تخلیه اضافه فشار آب حفره‌ای در تمام عمق‌ها آغاز می‌شود.



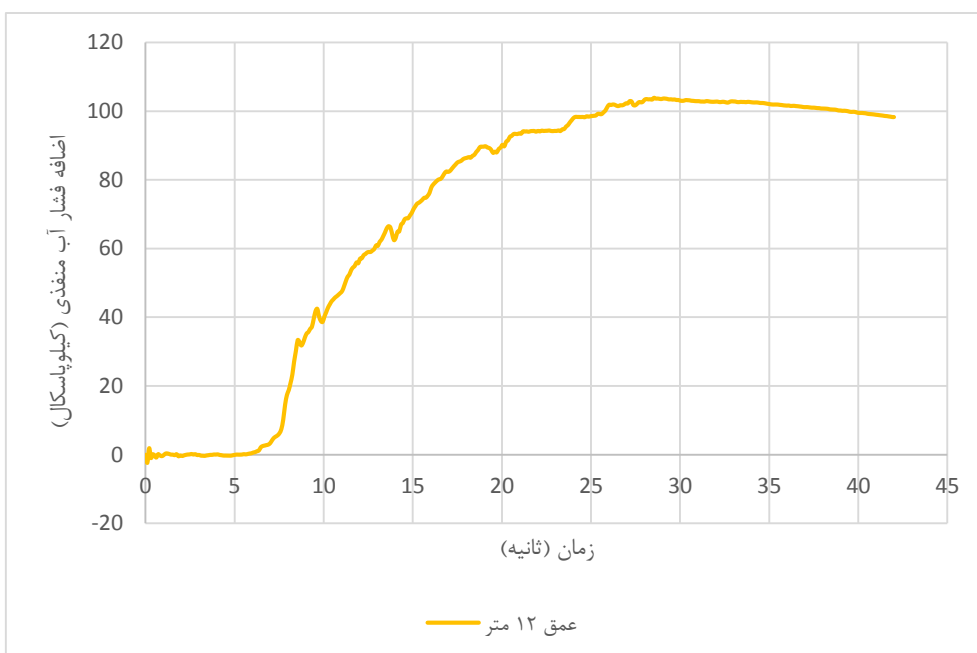
شکل ۴-۱ نمودار اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک روانگرایی موجود در عمق ۰ تا ۳ متر



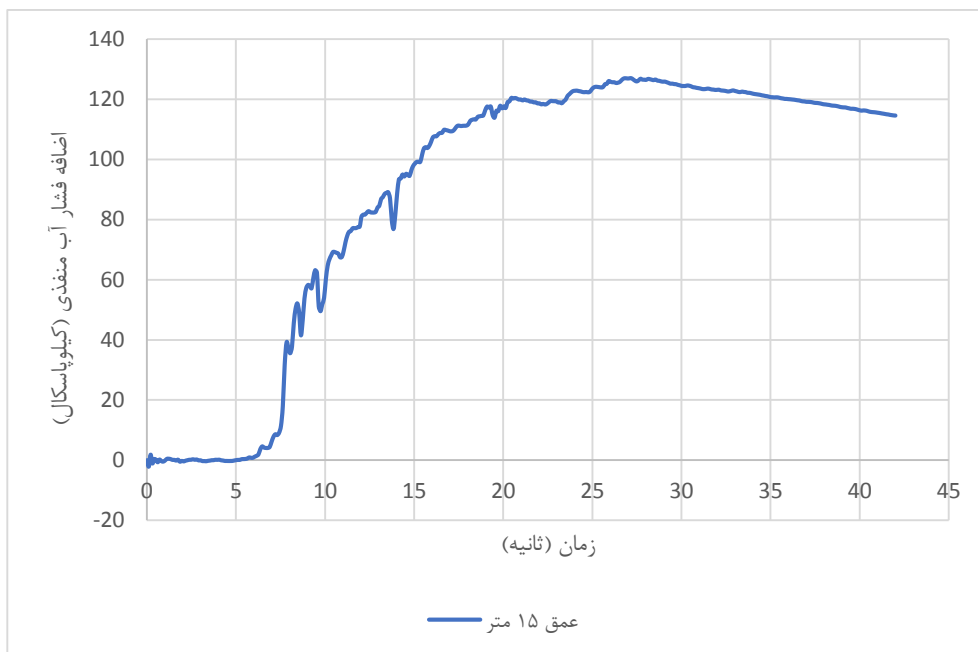
شکل ۴-۲ نمودار اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک روانگرایی موجود در عمق ۳ تا ۶ متر



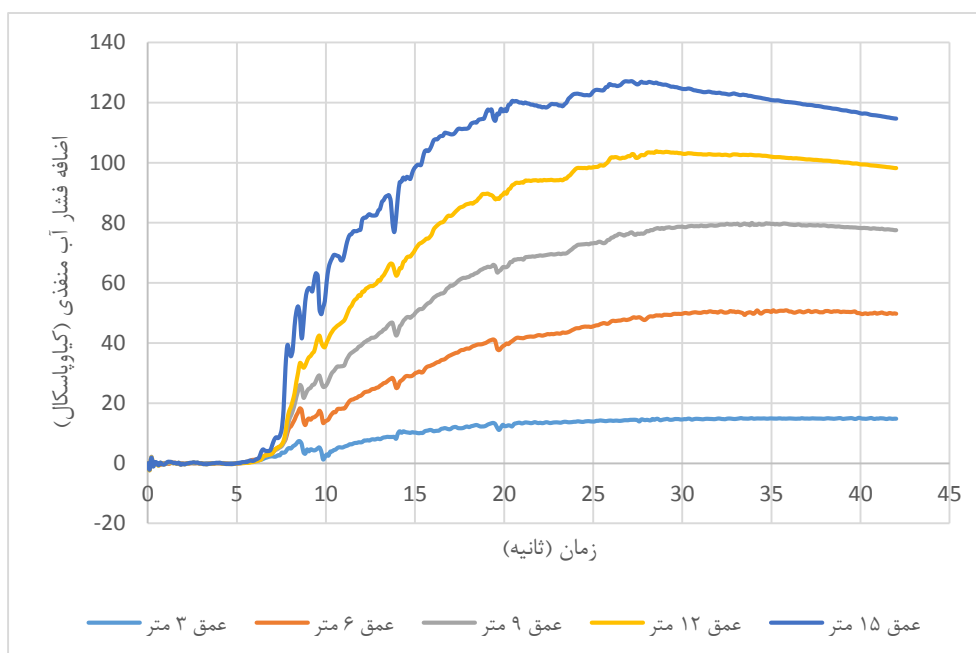
شکل ۳-۴ نمودار اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک روانگرایی موجود در عمق ۶ تا ۹ متر



شکل ۴-۴ نمودار اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک روانگرایی موجود در عمق ۹ تا ۱۲ متر



شکل ۴-۵ نمودار اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک روانگرای موجود در عمق ۱۲ تا ۱۵ متر



شکل ۴-۶ نمودار مقایسه‌ای اضافه فشار آب حفره‌ای در اعماق مختلف برای خاک دارای لایه روانگرا با ضخامت

۳ متر

همان‌طور که در شکل (۴-۶) دیده می‌شود با افزایش عمق لایه خاک روانگرا و دور شدن آن از

سطح زمین، به‌واسطه افزایش تنش مؤثر، میزان اضافه فشار آب حفره‌ای افزایش می‌یابد. طبق این شکل

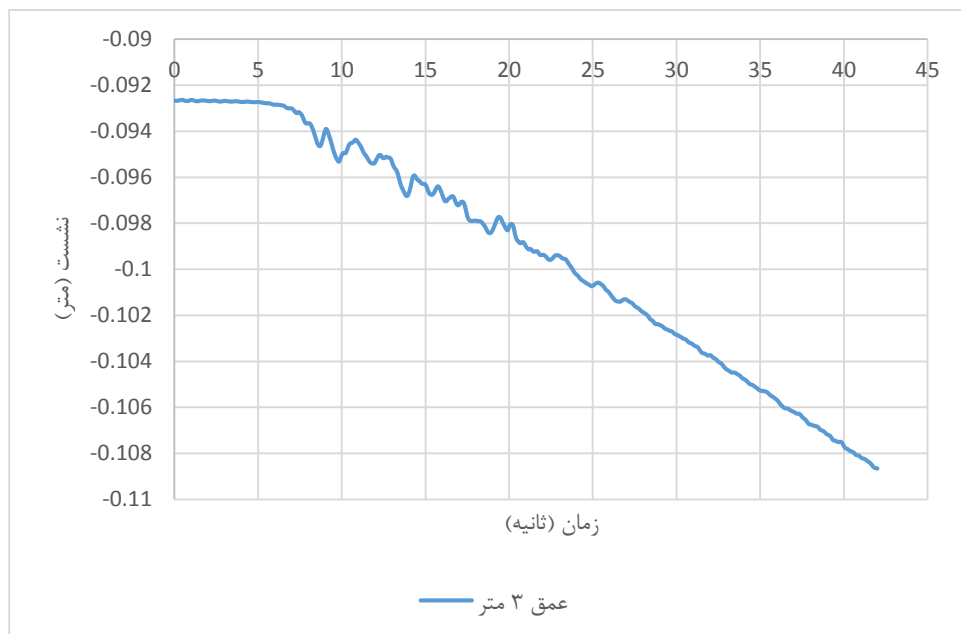
پس از فروکش کردن شتاب‌های ماکزیمم زلزله، به تدریج روند تخلیه اضافه فشار آب حفره‌ای در تمام عمق‌ها آغاز می‌شود اما شیب این کاهش در عمق‌های بیشتر، تندتر می‌باشد اما اختلاف اضافه فشار آب حفره‌ای هر چقدر عمق لایه روانگرا بیشتر می‌شود، کمتر می‌شود یعنی این انتظار وجود دارد در عمق‌های بیشتر از ۱۵ متر نمودارهای اضافه فشار آب منفذی بر هم بصورت نسبی منطبق گردند. دلیل مقدار زیاد فشار آب حفره‌ای نیز بخاطر شدت شتاب بالای زلزله اعمال شده و هم‌چنین عدم امکان تخلیه فشار آب حفره‌ای در زمان کم بوده است.

۲-۲-۴ نشست سطح زمین نسبت به زمان

در شکل‌های (۷-۴، ۸-۴، ۹-۴، ۱۰-۴ و ۱۱-۴) تغییرات نشست سطح زمین نسبت به زمانی که لایه روانگرا به ضخامت ۳ متر به ترتیب در اعماق ۰ تا ۳، ۳ تا ۶، ۶ تا ۹، ۹ تا ۱۲ و ۱۲ تا ۱۵ متر قرار دارد، نشان داده شده است. طبق این اشکال در تمام اعماق با گذشت زمان مقدار نشست بیشتر می‌شود. باید توجه داشت که برای به دست آوردن مقادیر واقعی نشست به دلیل تغییرات میزان نفوذپذیری در حین روانگرایی، میزان نفوذپذیری با توجه به مقاله رحمانی و همکاران (۲۰۱۲) ۲۰ برابر شده است و سپس نشست اندازه‌گیری شده است.

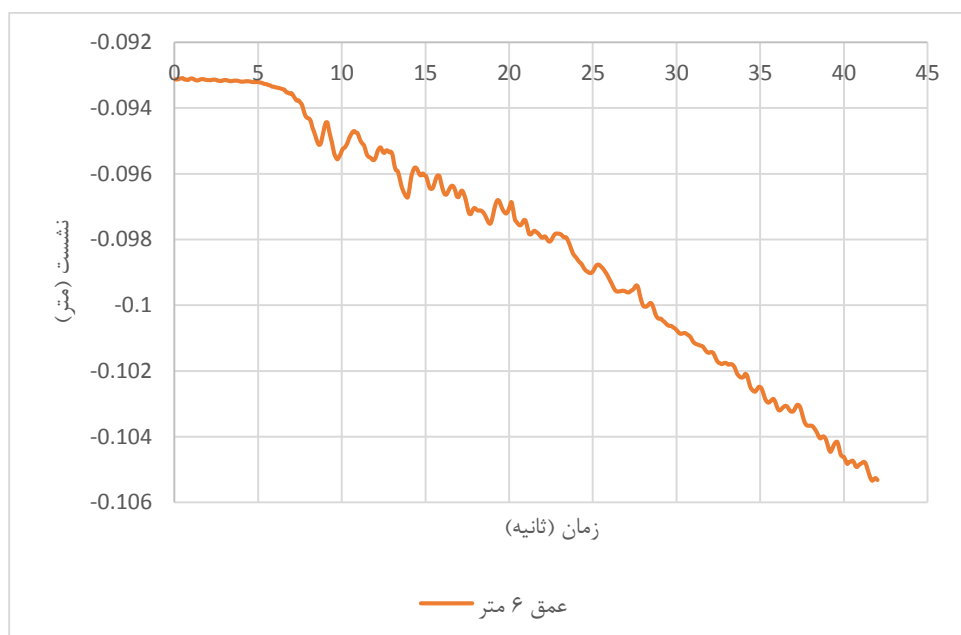
علت این امر که نشست از صفر شروع نشده ایت را می‌توان به علت رخ دادن نشست اولیه ناشی از وزن خاک دانست (در واقع در این پژوهش مقدار نشست نشان داده شده از نشست اولیه ناشی از وزن خاک کسر نشده است).

علت افزایش نشست در طی زمان نیز تخلیه فشار آب حفره‌ای پس از اعمال شتاب زلزله و زهکش شدن و در نتیجه خالی شدن فضای خالی بین ذرات خاک می‌تواند باشد.



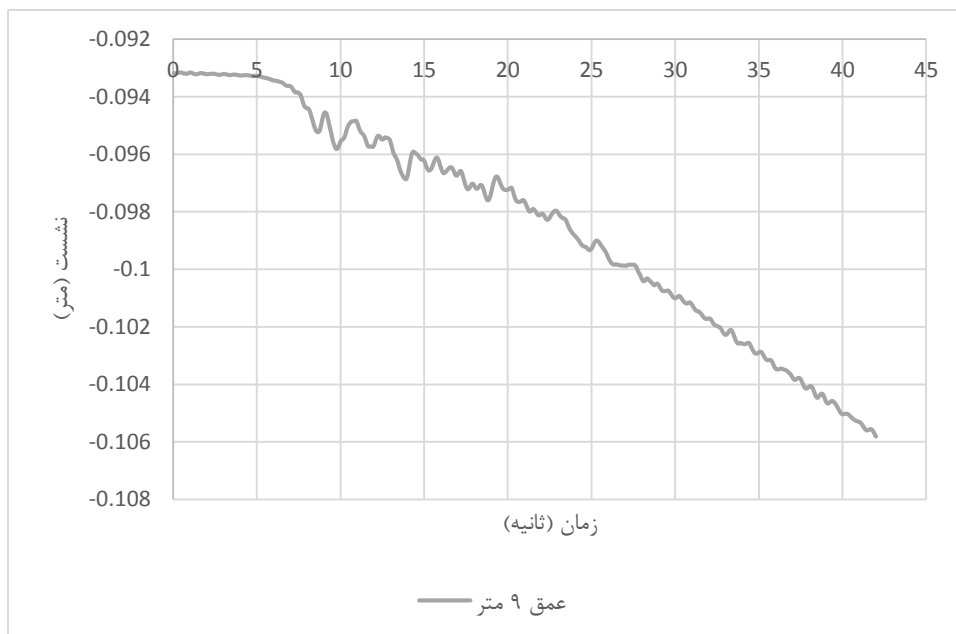
شکل ۷-۴ نمودار تغییرات نشست سطح زمین نسبت به زمان در اعماق مختلف برای خاک دارای لایه روانگرا با

ضخامت ۳ متر در عمق ۰ تا ۳ متر



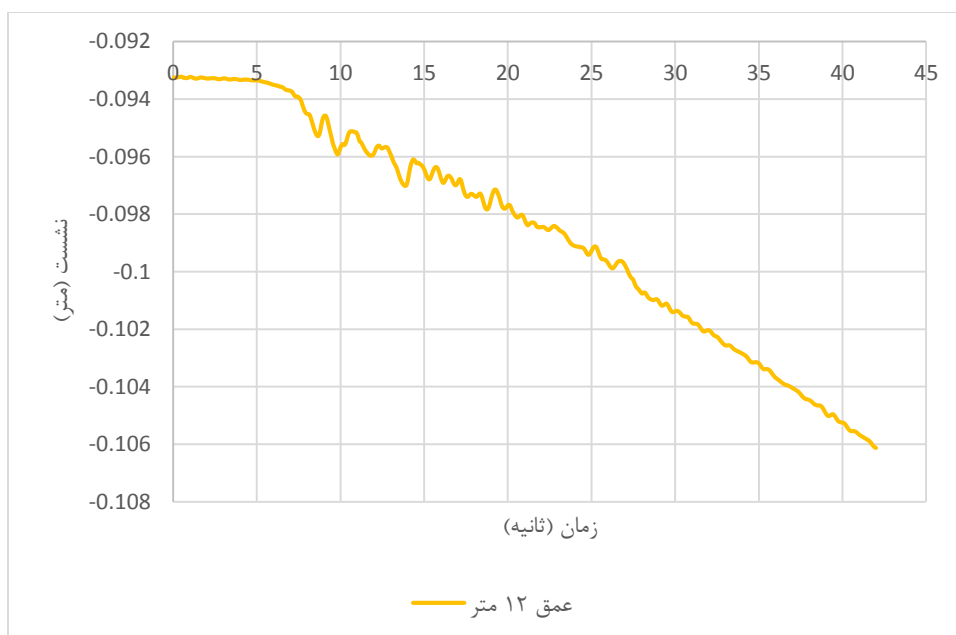
شکل ۸-۴ نمودار تغییرات نشست سطح زمین نسبت به زمان در اعماق مختلف برای خاک دارای لایه روانگرا

با ضخامت ۳ متر در عمق ۳ تا ۶ متر



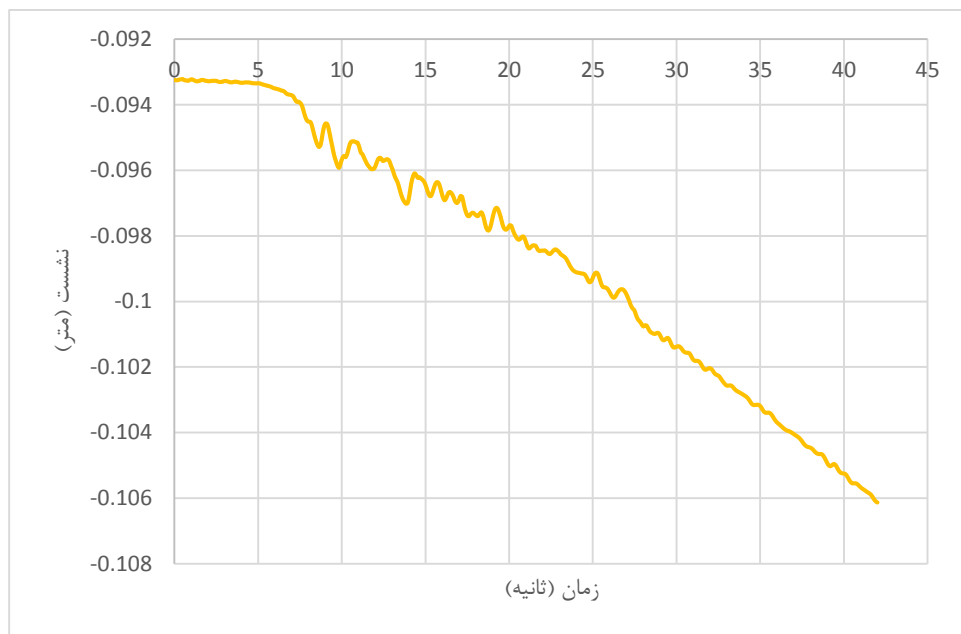
شکل ۴-۹ نمودار تغییرات نشست سطح زمین نسبت به زمان در اعماق مختلف برای خاک دارای لایه روانگرا با

ضخامت ۳ متر در عمق ۶ تا ۹ متر

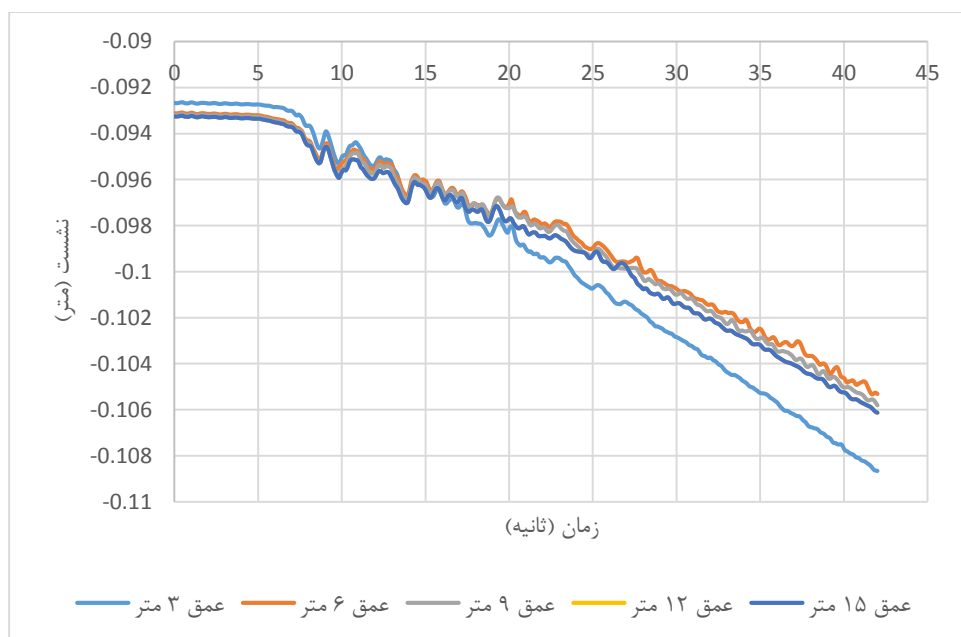


شکل ۴-۱۰ نمودار تغییرات نشست سطح زمین نسبت به زمان در اعماق مختلف برای خاک دارای لایه روانگرا

با ضخامت ۳ متر در عمق ۹ تا ۱۲ متر



شکل ۴-۱۱ نمودار تغییرات نشست سطح زمین نسبت به زمان در اعماق مختلف برای خاک دارای لایه روانگرا با ضخامت ۳ متر در عمق ۱۲ تا ۱۵ متر



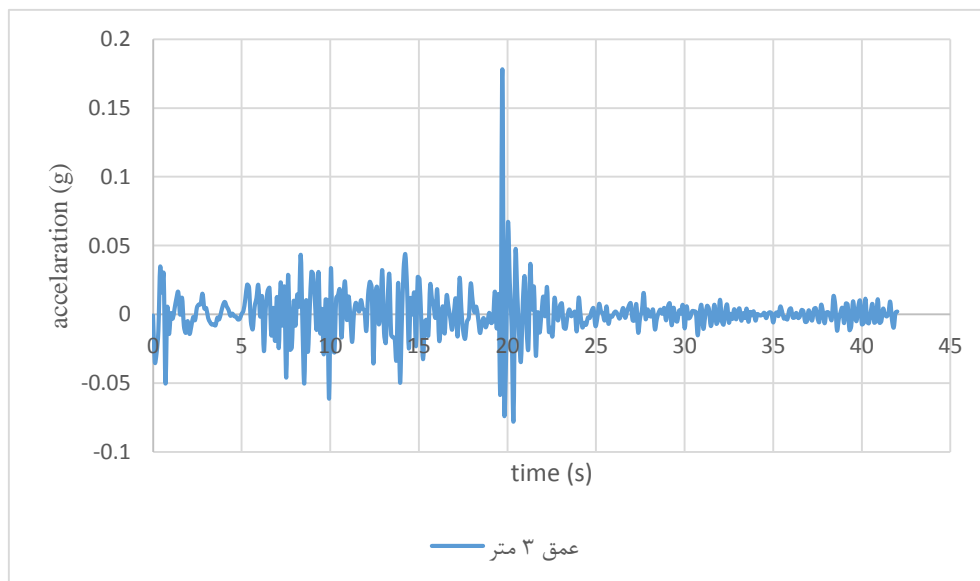
شکل ۴-۱۲ نمودار مقایسه‌ای تغییرات نشست سطح زمین نسبت به زمان در اعماق مختلف برای خاک دارای لایه روانگرا با ضخامت ۳ متر

در شکل (۴-۱۲) مشاهده می‌شود با افزایش عمق و با در نظر گرفتن یک لایه روانگرا با ضخامت

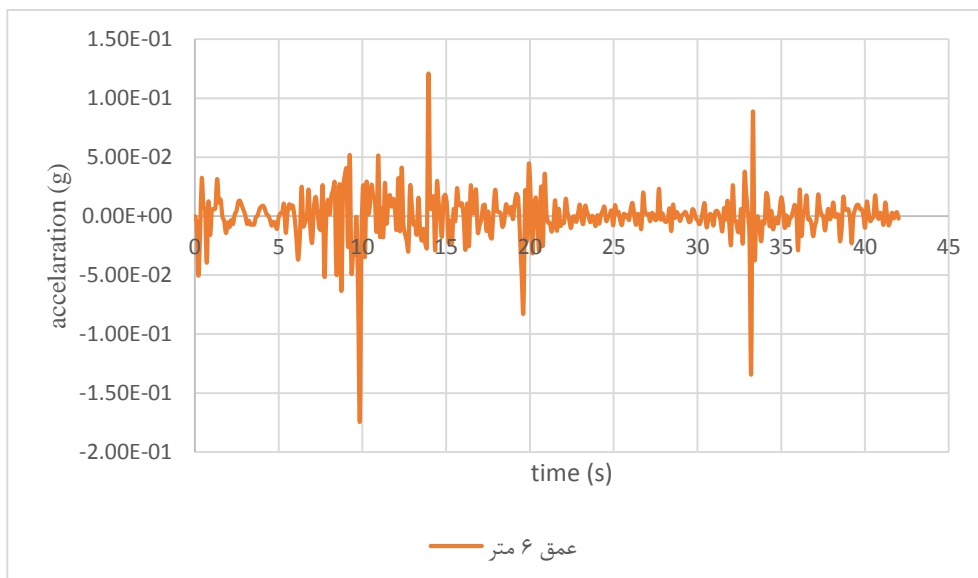
۳ متر مقدار نشست در تمام اعماق افزایش می‌یابد و بیشترین مقدار روانگرایی نیز مربوط به زمانی است که لایه روانگرا بین ۰ تا ۳ متر از سطح زمین قرار می‌گیرد و در اعماق بیشترین مقدار ماکزیمم نشست کاهش می‌یابد. به ازای عمق‌های بیشتر از ۶ متر همگرایی در نشست خاک به وجود می‌آید. یعنی می‌توان گفت اگر لایه روانگرا در عمق ۶ متری سطح زمین و بعد از آن قرار گیرد تاثیری بر نشست سطح زمین ندارد.

۳-۲-۴ شتاب نگاشت در سطح زمین

در شکل (۴-۱۳) تا شکل (۴-۱۷) شتاب نگاشت در سطح زمین در لایه خاک برای عمق‌های مختلف روانگرایی نمایش داده شده است.

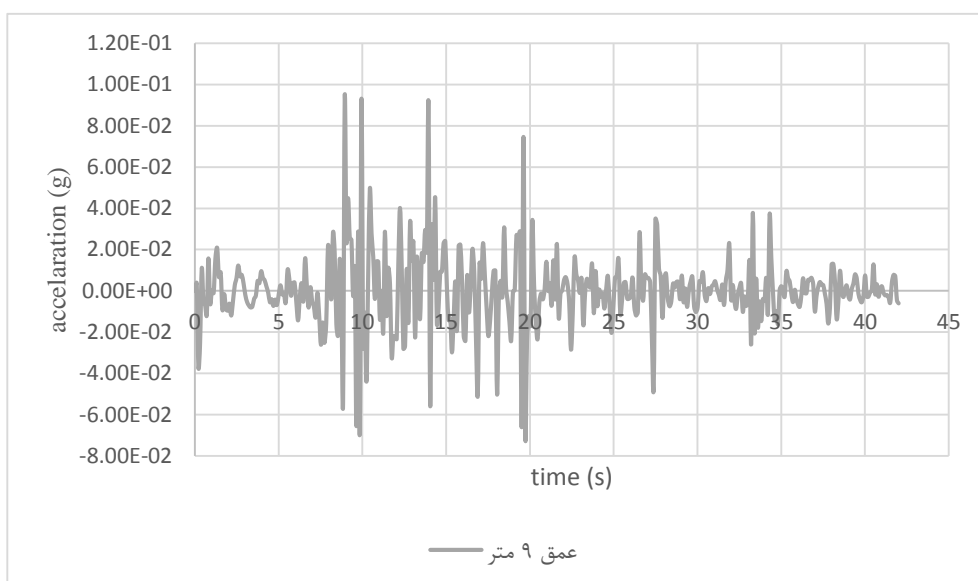


شکل ۴-۱۳ نمودار شتاب نگاشت در سطح زمین برای خاک دارای لایه روانگرایی با ضخامت ۳ متر واقع در ۳ متری سطح زمین



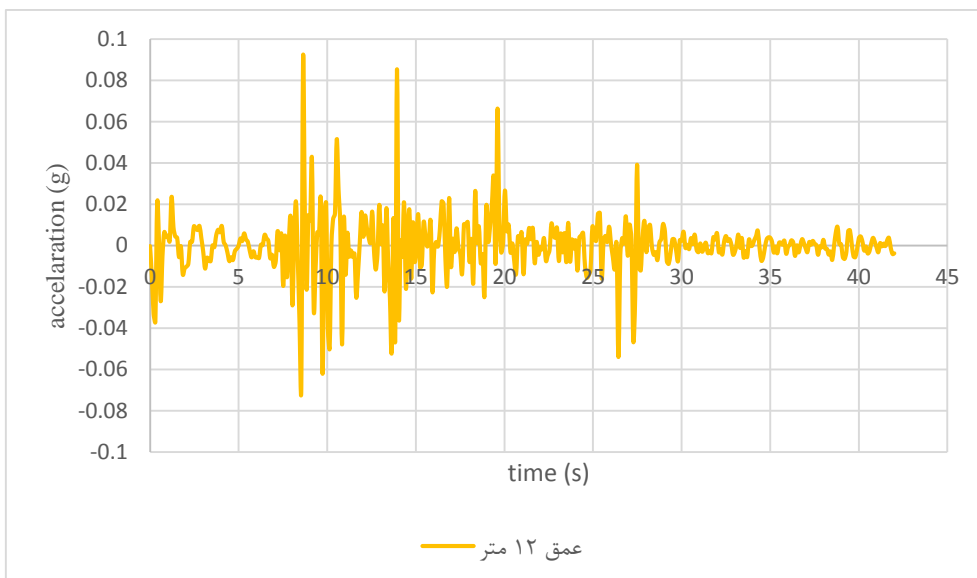
شکل ۴-۱۴ نمودار شتاب نگاشت در سطح زمین برای خاک دارای لایه روانگرایی با ضخامت ۳ متر واقع در ۶

متری سطح زمین



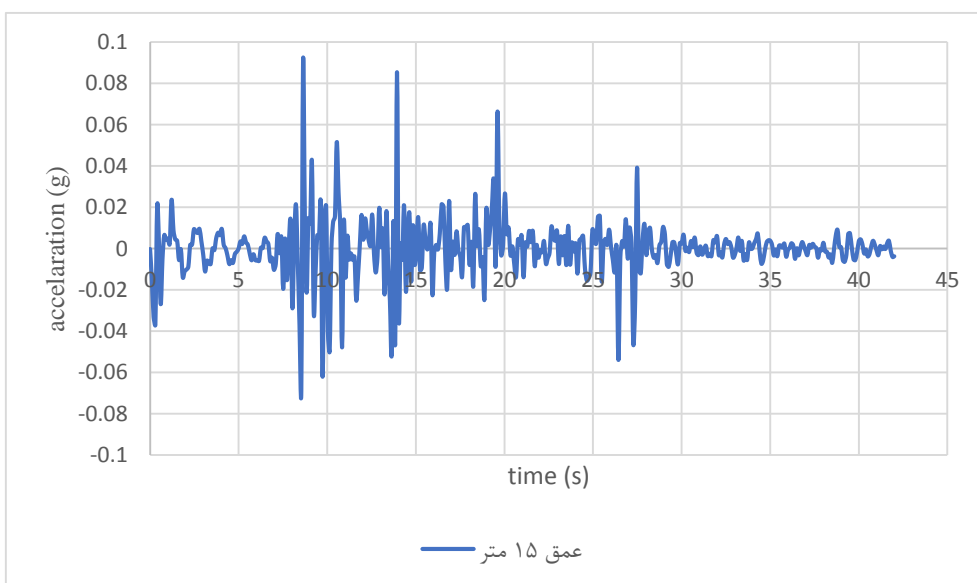
شکل ۴-۱۵ نمودار شتاب نگاشت در سطح زمین برای خاک دارای لایه روانگرایی با ضخامت ۳ متر واقع در ۹

متری سطح زمین



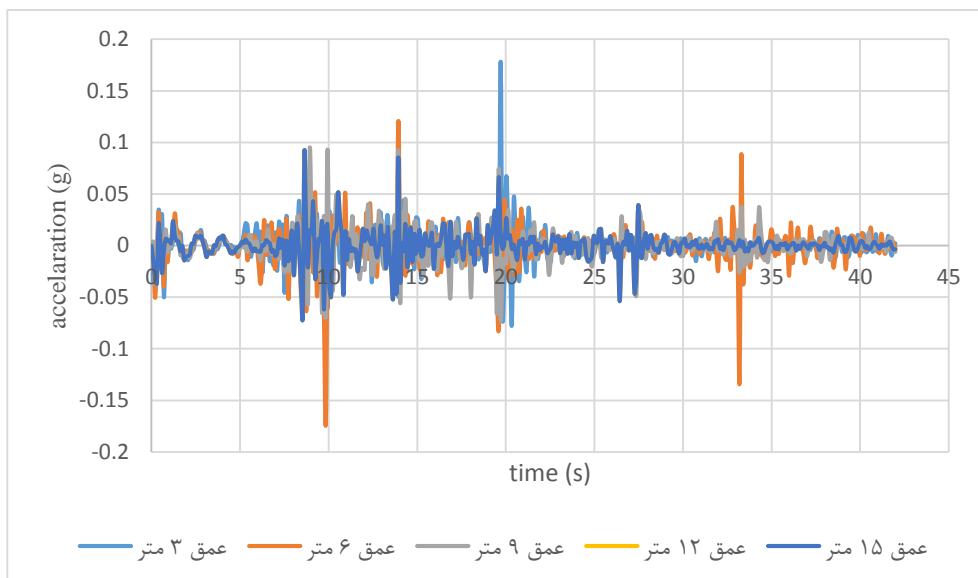
شکل ۴-۱۶ نمودار شتاب نگاشت در سطح زمین برای خاک دارای لایه روانگرایی با ضخامت ۳ متر واقع در ۱۲

متری سطح زمین



شکل ۴-۱۷ نمودار شتاب نگاشت در سطح زمین برای خاک دارای لایه روانگرایی با ضخامت ۳ متر واقع در ۱۵

متری سطح زمین



شکل ۴-۱۸ نمودار مقایسه‌ای شتاب نگاشت در سطح زمین برای خاک دارای لایه روانگرایی با ضخامت ۳ متر واقع در عمق‌های مختلف

در شکل (۴-۱۸) تمام نمودارهای مربوط به شتاب‌نگاشت در سطح زمین در اعماق مختلف نمایش داده شده است. بر اساس این نتایج هرچه لایه روانگرا از سطح زمین دورتر می‌شود مقدار ماکزیمم شتاب‌نگاشت از سطح زمین کمتر می‌شود ولی زمانی که لایه روانگرا در عمق بین ۹ تا ۱۲ متر و ۱۲ تا ۱۵ متر قرار گرفت کاملاً نمودار شتاب نگاشت بر یکدیگر منطبق شد و مشخص شد از این عمق به بعد دیگر وجود لایه روانگرا تاثیری بر نمودار شتاب‌نگاشت سطح زمین ندارد.

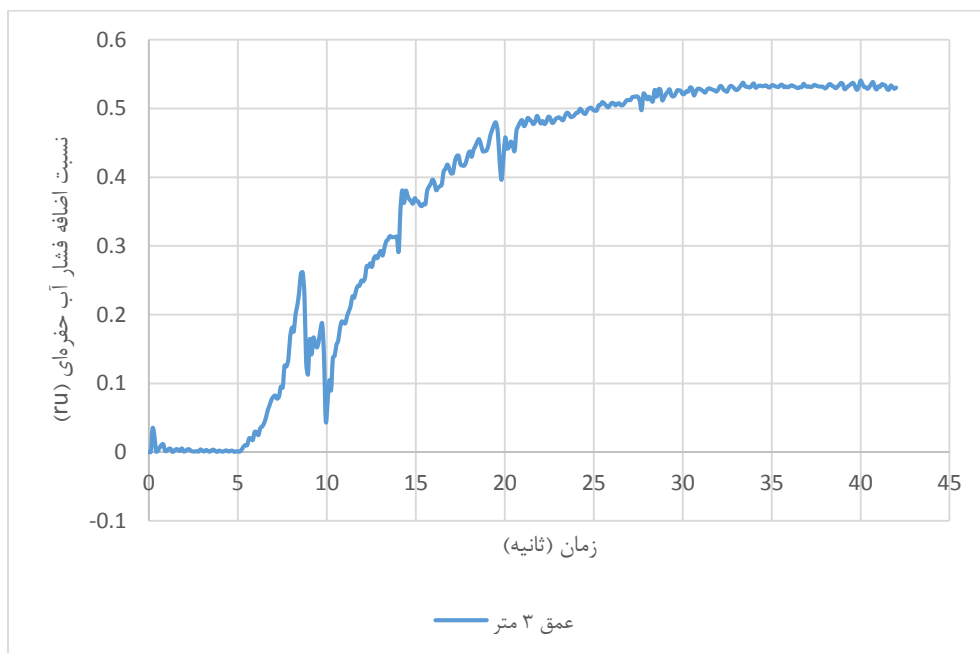
۴-۲-۴ نمودار عمق نسبت به اضافه فشار آب حفره‌ای

در ادامه به مقایسه نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای یا ru در عمق‌های مختلف برای یک لایه روانگرایی ۳ متری می‌پردازیم. یکی از موارد مهم و تعیین‌کننده در تشخیص وقوع روانگرایی، نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای ru است. در واقع نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای حاصل تقسیم اضافه فشار آب حفره‌ای بر تنش مؤثر اولیه است (رابطه ۴-۱). مقدار این پارامتر بین صفر تا یک متغیر است و از نظر تئوری نمی‌تواند بزرگ‌تر از یک باشد. در صورتی که این نسبت یک یا عددی بسیار نزدیک به یک شد، می‌توان نتیجه گرفت که خاک ما روانگرا شده است (Shahir et al., 2012). در واقع اگر مقدار $ru=1$

باشد یعنی بصورت کامل خاک روانگرا شده و اگر $ru=0$ باشد نشان دهنده عدم تولید فشار آب خواهد بود.

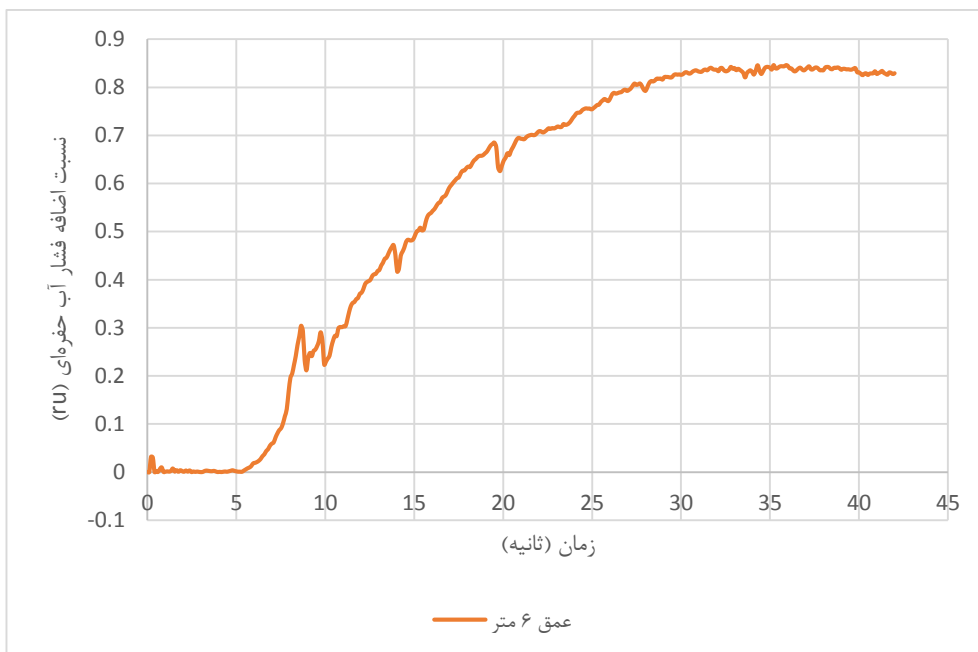
$$r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_{v0}} \quad (1-4)$$

در شکل‌های (۴-۱۹، ۴-۲۰، ۴-۲۱، ۴-۲۲ و ۴-۲۳) نسبت تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در زمین آزاد در زمانی که لایه روانگرا به ضخامت ۳ متر به ترتیب در اعماق ۰ تا ۳، ۳ تا ۶، ۶ تا ۹، ۹ تا ۱۲ و ۱۲ تا ۱۵ متر قرار دارد، نشان داده شده است. طبق این اشکال در تمام اعماق با گذشت زمان و با افزایش شتاب مقدار ru افزایش می‌یابد و در ثانیه‌های پایانی که شتاب زلزله در حال کاهش است مقدار ru کاهش می‌یابد.



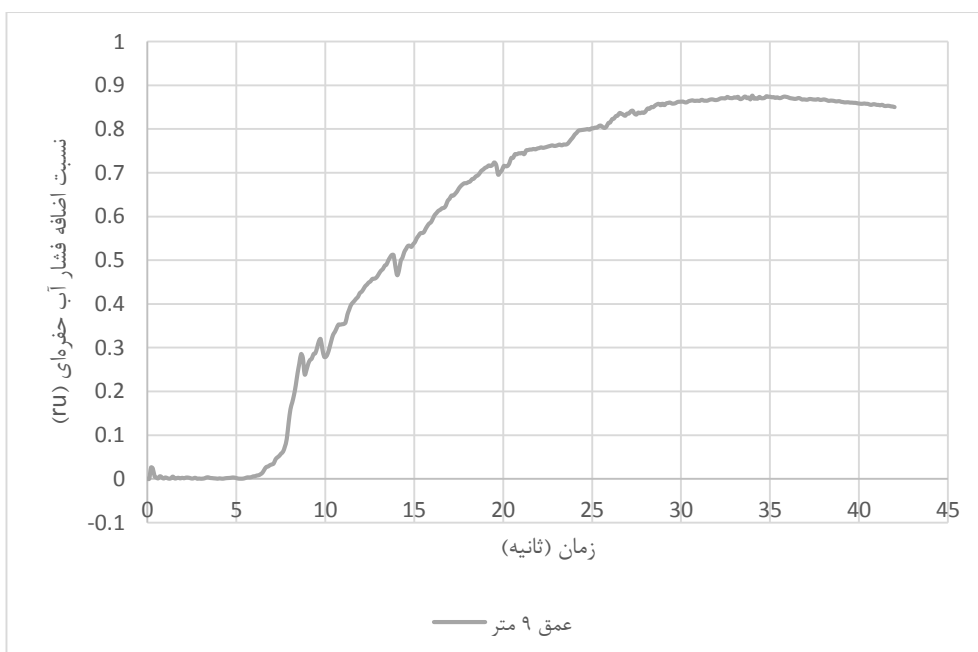
شکل ۴-۱۹ نمودار نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای نسبت به زمان در اعماق مختلف برای خاک دارای لایه

روانگرا با ضخامت ۳ متر در عمق ۰ تا ۳ متر



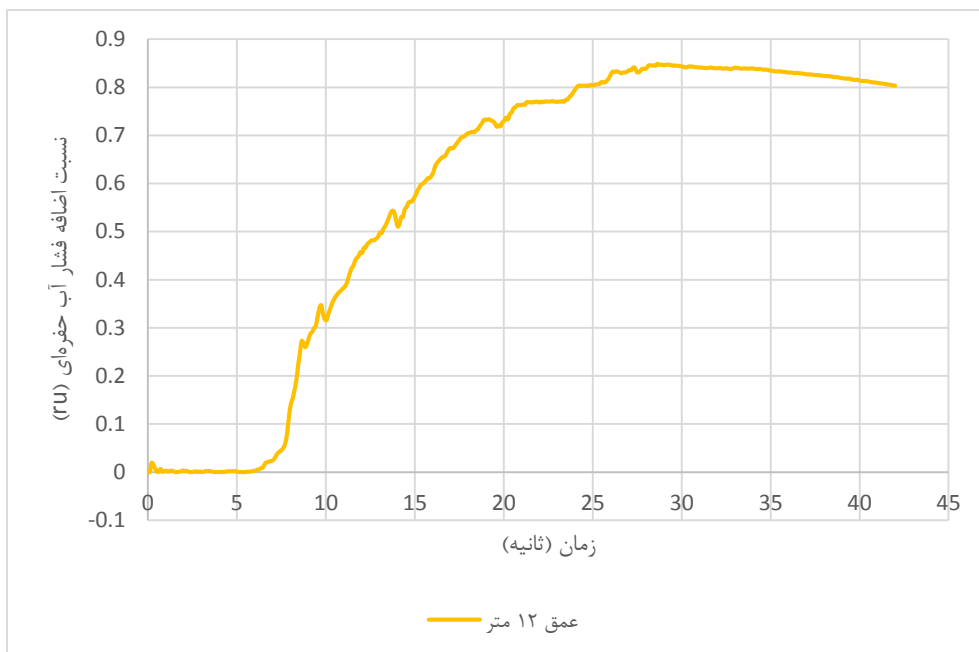
شکل ۲۰-۴ نمودار نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای نسبت به زمان در اعماق مختلف برای خاک دارای لایه

روانگرا با ضخامت ۳ متر در عمق ۳ تا ۶ متر



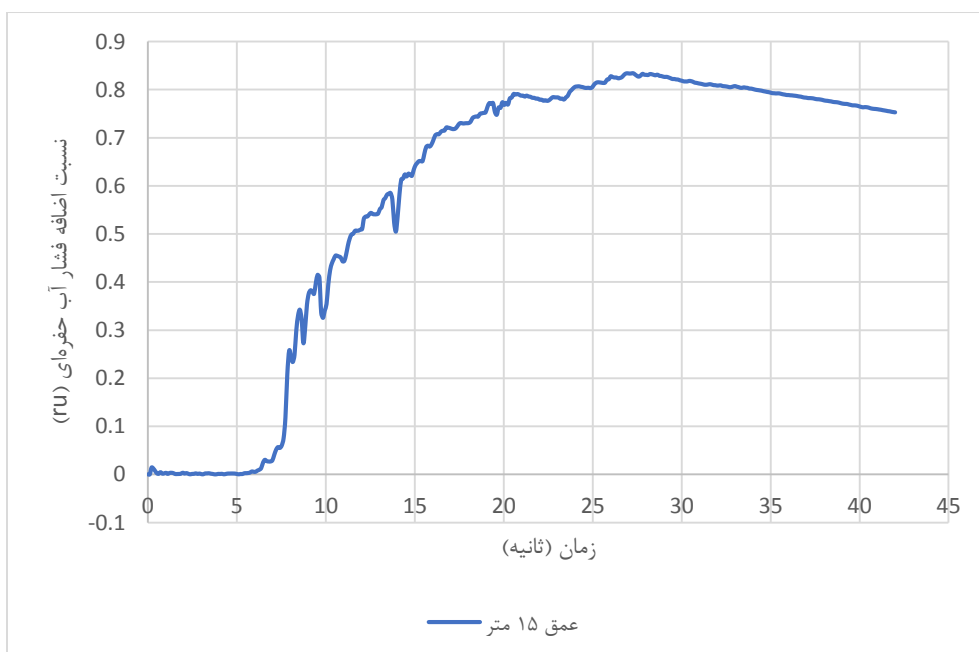
شکل ۲۱-۴ نمودار نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای نسبت به زمان در اعماق مختلف برای خاک دارای لایه

روانگرا با ضخامت ۳ متر در عمق ۶ تا ۹ متر



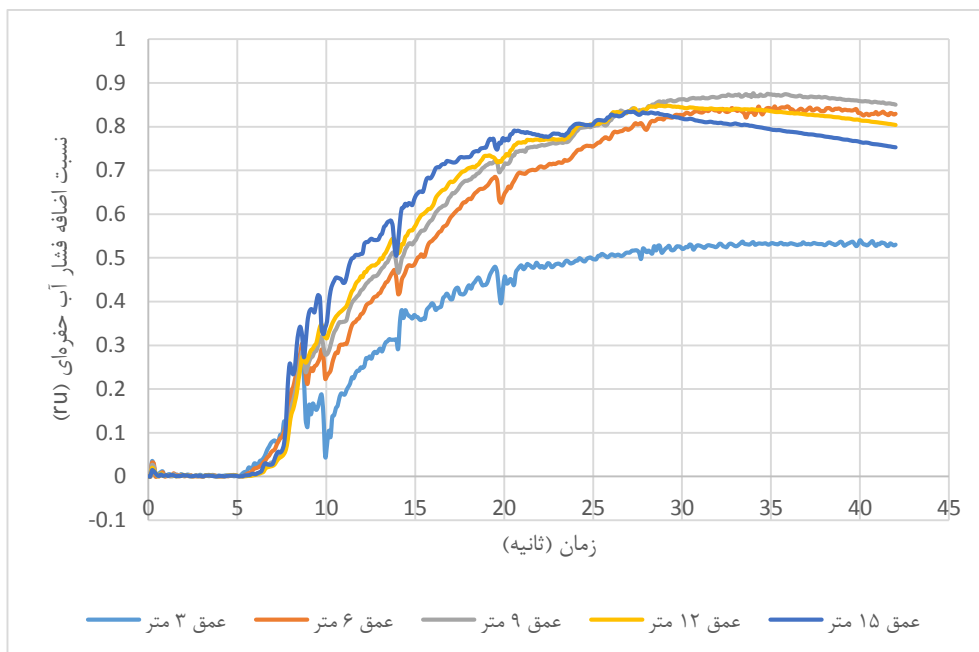
شکل ۲۲-۴ نمودار نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای نسبت به زمان در اعماق مختلف برای خاک دارای لایه

روانگرا با ضخامت ۳ متر در عمق ۹ تا ۱۲ متر



شکل ۲۳-۴ نمودار نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای نسبت به زمان در اعماق مختلف برای خاک دارای لایه

روانگرا با ضخامت ۳ متر در عمق ۱۲ تا ۱۵ متر



شکل ۴-۲۴ نمودار مقایسه‌ای نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در اعماق مختلف برای خاک دارای لایه روانگرا با

ضخامت ۳ متر

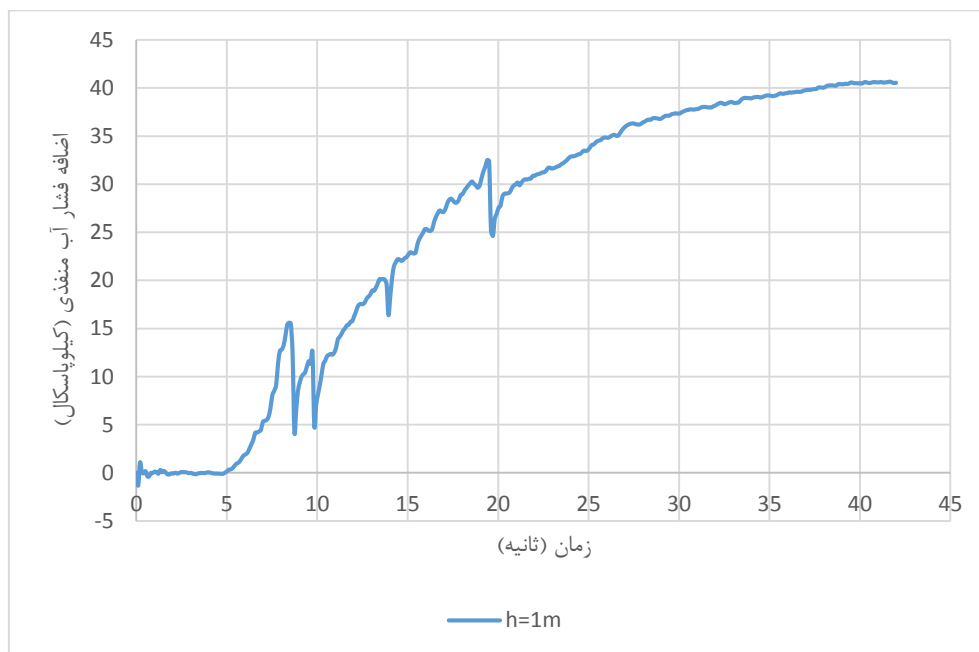
در شکل (۴-۲۴) نسبت تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در زمین آزاد در اعماق مختلف مشاهده می‌شود. طبق این شکل می‌توان گفت که در ثانیه‌های ابتدایی یک همبستگی و تطابق در مقدار IU در اعماق مختلف وجود دارد. با افزایش عمق لایه روانگرا مقدار IU افزایش می‌یابد ولی هیچگاه به عدد یک نمی‌رسد. طبق شکل مشخص است که شیب مربوط به کاهش IU در ثانیه‌های پایانی که مقدار شتاب در حال کم شدن است در لایه‌های عمیق‌تر بصورت تندتری اتفاق می‌افتد.

۳-۴ نتایج مربوط به اثر ضخامت لایه روانگرا

در مرحله دوم برای بررسی اثر ضخامت لایه روانگرا بر روی نشست خاک، اضافه فشار آب حفره‌ای، شتاب نگاشت زلزله و پارامتر IU در یک عمق مشخص که در اینجا عمق تراز منفی ۳ متر، مقدار ضخامت لایه روانگرا ۱، ۳ و ۵ متر فرض شده است تا اثر عمق لایه روانگرا بر روی نشست خاک، اضافه فشار آب حفره‌ای، شتاب نگاشت زلزله و پارامتر IU بررسی شود. تراکم خاک برای کل لایه ۹۰ درصد و برای قسمت ماسه روانگرا این مقدار ۳۰ درصد در نظر گرفته شد. نتایج حاصل به شرح ذیل

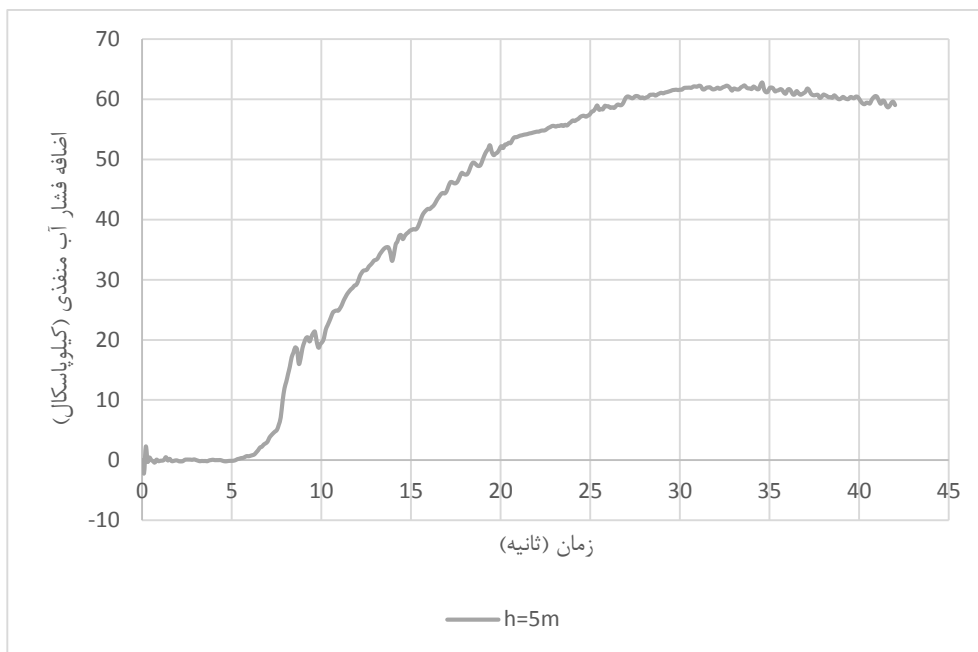
۱-۳-۴ اضافه فشار آب حفره‌ای نسبت به زمان

در شکل‌های (۴-۲۵ و ۴-۲۶) نسبت تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در زمین آزاد برای زمانی که لایه روانگرا در تراز منفی ۳ متر از سطح زمین قرار گرفته و به ترتیب دارای ضخامت ۱ و ۵ متر می‌باشد، نشان داده شده است. بر اساس شتاب‌نگاشت ماکزیمم تغییرات شتاب نگاشت در بازه زمانی ۶ تا ۲۵ ثانیه رخ داده است و بر اساس این اشکال نیز می‌توان نتیجه گرفت در این بازه زمانی بیشترین تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در تمام ضخامت‌ها رخ داده است. پس از فروکش کردن شتاب‌های ماکزیمم زلزله، به تدریج روند تخلیه اضافه فشار آب حفره‌ای در تمام ضخامت‌ها آغاز می‌شود.



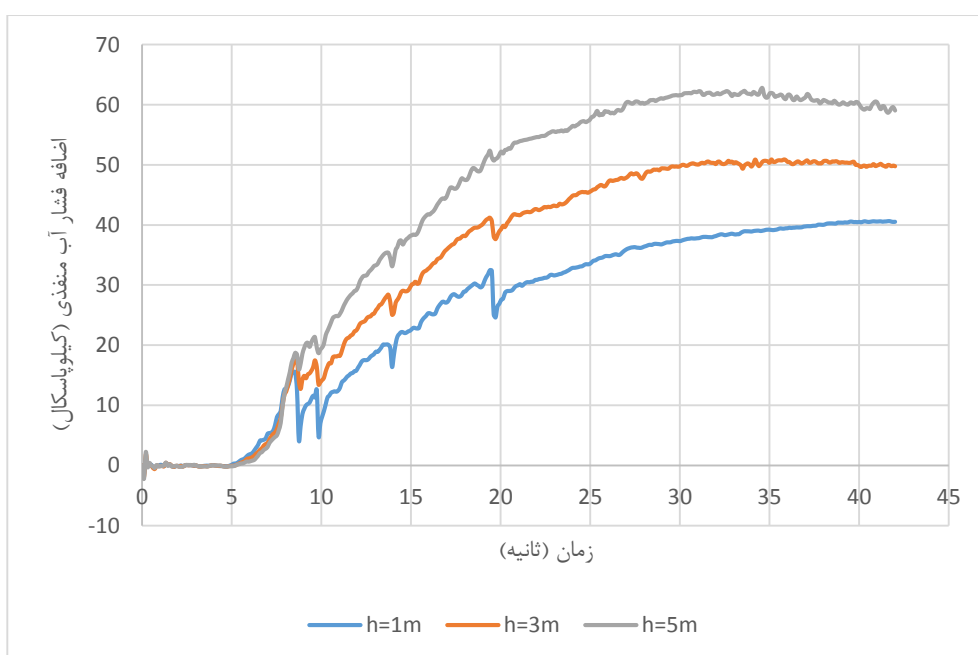
شکل ۴-۲۵ نمودار اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک دارای لایه روانگرا در زیر تراز منفی ۳ متر با ضخامت ۱

متر



شکل ۴-۲۶ نمودار اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک دارای لایه روانگرا در زیر تراز منفی ۳ متر با ضخامت ۵

متر



شکل ۴-۲۷ نمودار اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک دارای لایه روانگرا در زیر تراز منفی ۳ متر با ضخامت‌های

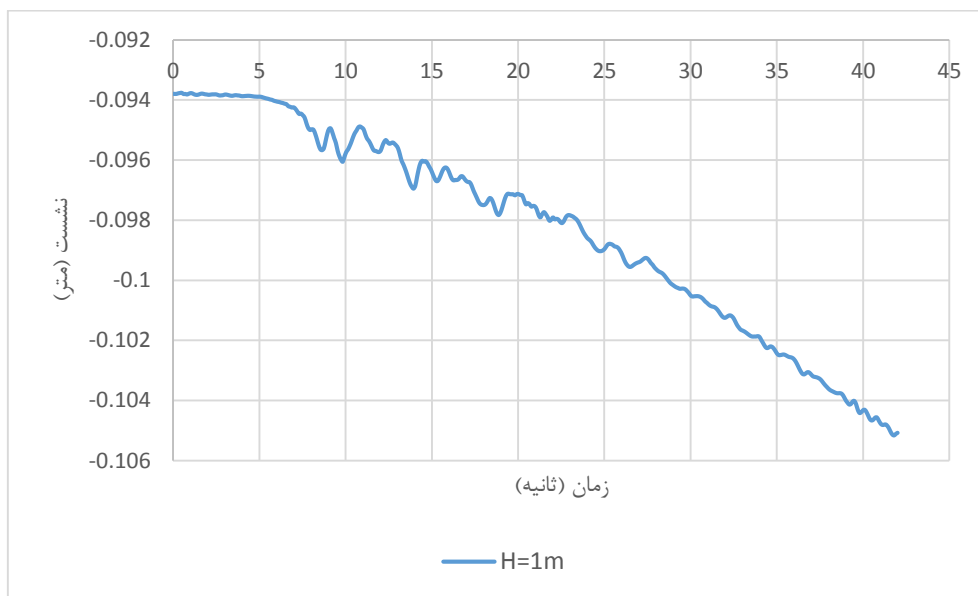
مختلف

طبق شکل (۴-۲۷) با افزایش ضخامت لایه خاک روانگرا و دور شدن آن از سطح زمین، به‌واسطه

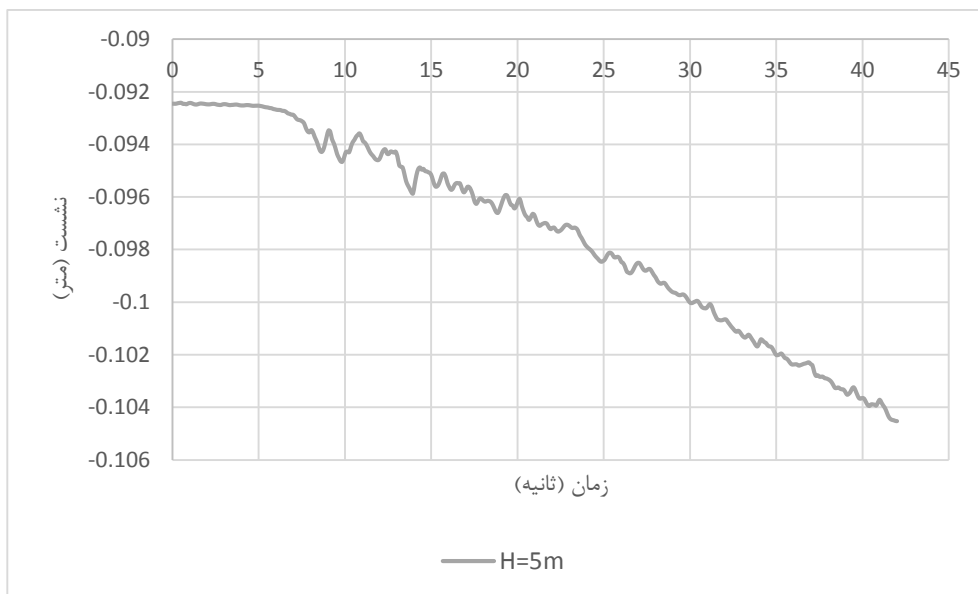
افزایش تنش مؤثر، میزان اضافه فشار آب حفره‌ای افزایش می‌یابد. طبق این شکل پس از فروکش کردن شتاب‌های ماکزیمم زلزله، به تدریج روند تخلیه اضافه فشار آب حفره‌ای در تمام عمق‌ها آغاز می‌شود اما شیب این کاهش در ضخامت‌های بیشتر، تندتر می‌باشد.

۲-۳-۴ نشست سطح زمین نسبت به زمان

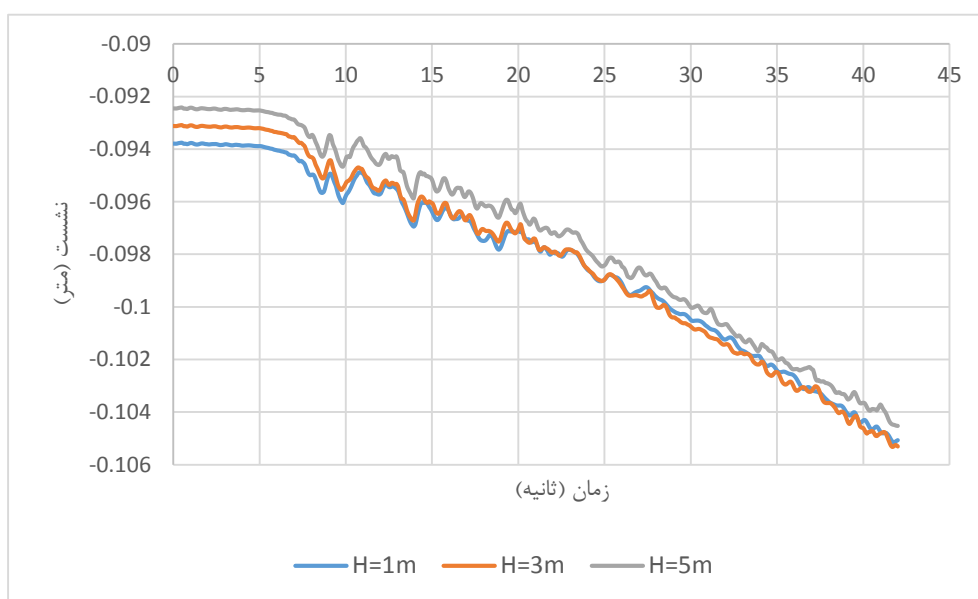
در شکل‌های (۲۸-۴ و ۲۹-۴) تغییرات نشست سطح زمین در زمین آزاد برای زمانی که لایه روانگرا در تراز منفی ۳ متر از سطح زمین قرار گرفته و به ترتیب دارای ضخامت ۱ و ۵ متر می‌باشد، نشان داده شده است. طبق این اشکال به ازای تمام ضخامت‌ها و با گذشت زمان مقدار نشست بیشتر می‌شود. باید توجه داشت که برای به دست آوردن مقادیر واقعی نشست به دلیل تغییرات میزان نفوذپذیری در حین روانگرایی، میزان نفوذپذیری با توجه به مقاله رحمانی و همکاران (۲۰۱۲) ۲۰ برابر شده است و سپس نشست اندازه‌گیری شده است.



شکل ۲۸-۴ نمودار تغییرات نشست سطح زمین نسبت به زمان در خاک دارای لایه روانگرا در زیر تراز منفی ۳ متر با ضخامت ۱ متر



شکل ۲۹-۴ نمودار تغییرات نشست سطح زمین نسبت به زمان در خاک دارای لایه روانگرا در زیر تراز منفی ۳ متر با ضخامت ۵ متر



شکل ۳۰-۴ نمودار مقایسه‌ای تغییرات نشست سطح زمین نسبت به زمان در خاک دارای لایه روانگرا در زیر تراز منفی ۳ متر با ضخامت‌های مختلف

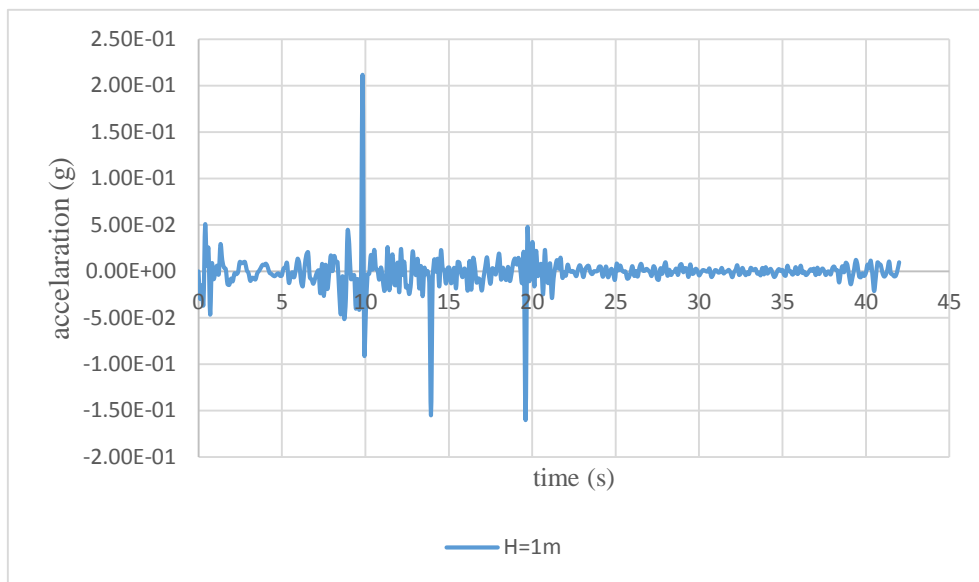
در شکل (۳۰-۴) مشاهده می‌شود، مقدار نشست با افزایش ضخامت لایه روانگرای قرار گرفته

در تراز منفی ۳ متر از سطح آزاد، مقدار نشست کاهش می‌یابد بطوریکه وقتی ضخامت لایه روانگرا ۱

متر بود مقدار نشست بیشترین میزان خود را داشت اما این موضوع بیشتر در زمان‌های اولیه نمود داشت و هرچه در زمان جلو می‌رود مقدار نشست برای تمام ضخامت‌ها به هم میل می‌کند.

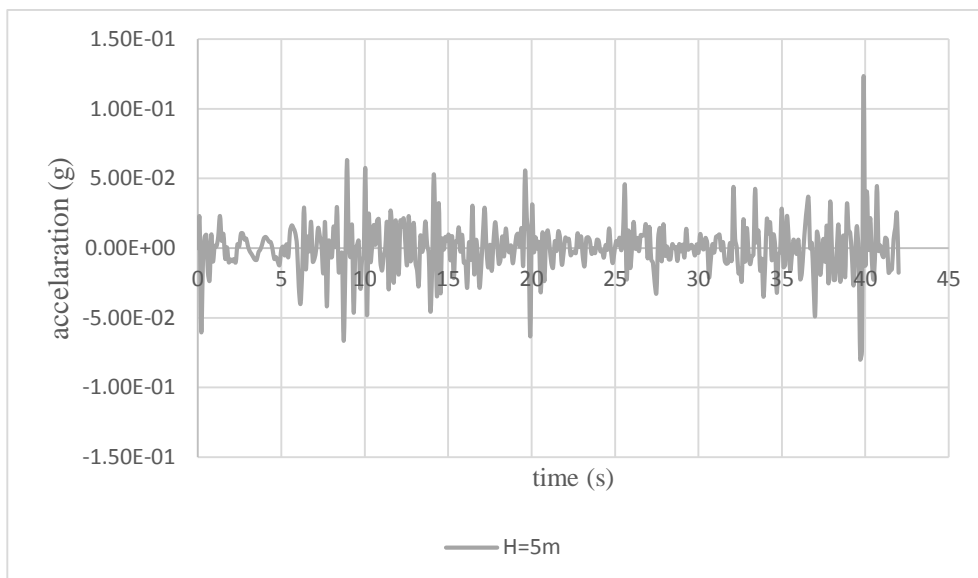
۳-۳-۴ شتاب نگاشت در سطح زمین

در شکل (۳۱-۴) و شکل (۳۲-۴) شتاب نگاشت در سطح زمین برای لایه خاکی که در عمق ۳ متر دارای خاک روانگرا با ضخامت‌های مختلف ۱ و ۵ متر است، نمایش داده شده است.

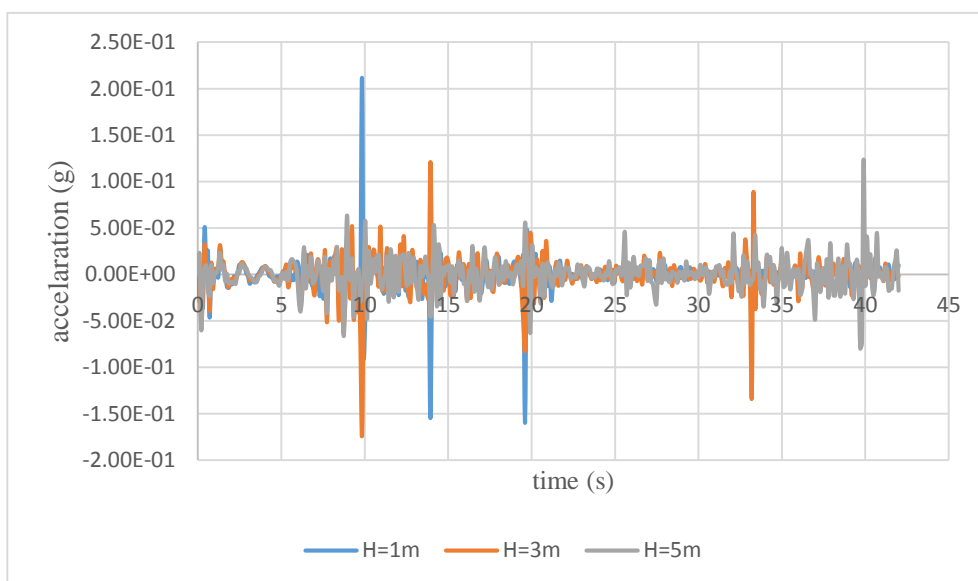


شکل ۳۱-۴ نمودار شتاب نگاشت در سطح زمین در خاک دارای لایه روانگرا در زیر تراز منفی ۳ متر با ضخامت

یک متر



شکل ۴-۳۲ نمودار شتاب نگاشت در سطح زمین در خاک دارای لایه روانگرا در زیر تراز منفی ۳ متر با ضخامت ۵ متر

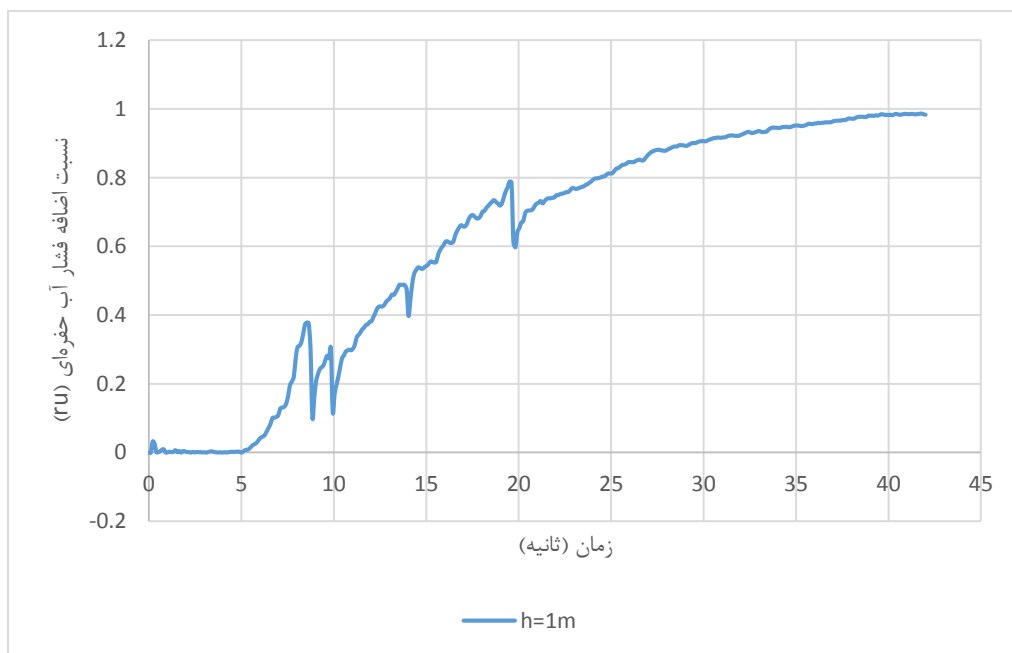


شکل ۴-۳۳ نمودار مقایسه‌ای شتاب نگاشت در سطح زمین در خاک دارای لایه روانگرا در زیر تراز منفی ۳ متر با ضخامت‌های مختلف

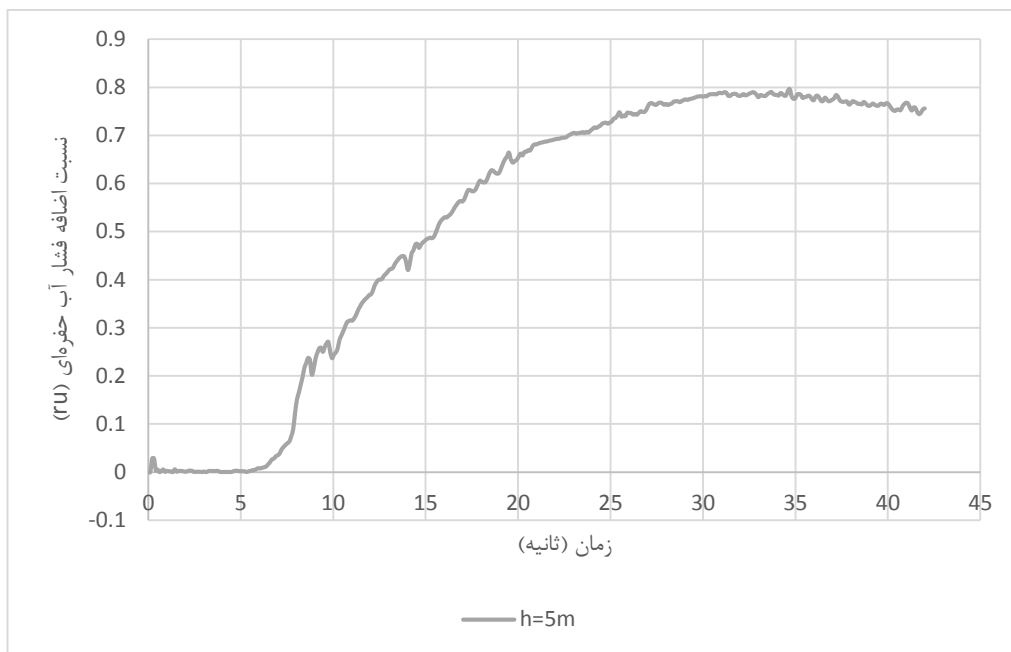
در شکل (۴-۳۳) تمام نمودارهای مربوط به شتاب‌نگاشت در سطح زمین برای خاکی که دارای لایه روانگرا در عمق سه متر با ضخامت‌های مختلف بوده نمایش داده شده است. بر اساس این نتایج با افزایش ضخامت لایه روانگرا مقدار ماکزیمم شتاب‌نگاشت سطح زمین کمتر می‌شود.

۴-۳-۴ نمودار عمق نسبت به اضافه فشار آب حفره‌ای

در ادامه به مقایسه نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای یا IU در یک عمق ثابت که در این جا عمق تراز منفی سه متر از سطح زمین آزاد انتخاب شده برای ضخامت‌های مختلف لایه روانگرا شامل ۱، ۳ و ۵ متر پرداخته شده است. در شکل‌های (۴-۳۴ و ۴-۳۵) نسبت تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در زمین آزاد برای ضخامت‌های مختلف ۱ و ۵ متری لایه روانگرا مشاهده می‌شود. طبق این اشکال در تمام ضخامت‌ها با گذشت زمان و با افزایش شتاب مقدار IU افزایش می‌یابد و در ثانیه‌های پایانی که شتاب زلزله در حال کاهش است مقدار IU کاهش می‌یابد.

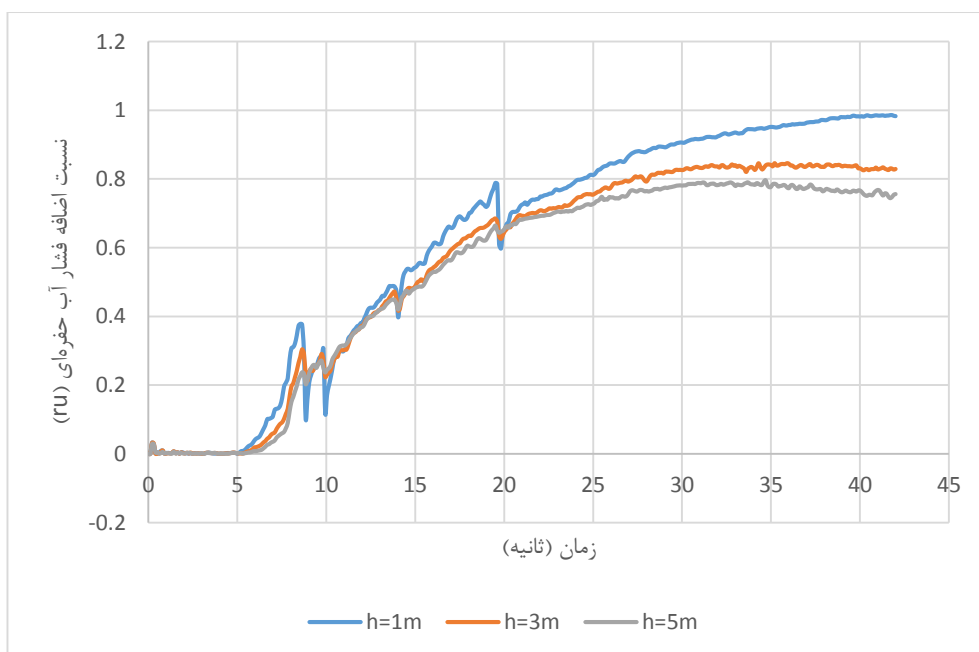


شکل ۴-۳۴ نمودار نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک دارای لایه روانگرا در زیر تراز منفی ۳ متر با ضخامت یک متر



شکل ۴-۳۵ نمودار نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک دارای لایه روانگرا در زیر تراز منفی ۳ متر با

ضخامت پنج متر



شکل ۴-۳۶ نمودار مقایسه‌ای نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک دارای لایه روانگرا در زیر تراز منفی ۳

متر با ضخامت‌های مختلف

طبق شکل (۴-۳۶) ضخامت یک متری لایه روانگرا در عمق ۳ متری باعث ایجاد نسبت اضافه

فشار آب حفره‌ای بیشتری نسبت به ضخامت ۳ و ۵ متری لایه روانگرا می‌شود. طبق این شکل مشاهده می‌شود اختلاف Γ_u در ضخامت ۱ تا ۳ متر برای لایه روانگرایی به نسبت ضخامت ۳ تا ۵ متر بیشتر می‌باشد. برای حالتی که ضخامت لایه روانگرا یک متر بود مقدار Γ_u به عدد یک بسیار نزدیک شد.

۵- فصل پنجم

نتایج و پیشنهادها

۵-۱ مقدمه

هدف از این پژوهش بررسی تأثیر عمق روانگرایی بروی نشست سطح زمین، اضافه فشار آب حفره‌ای و شتاب‌نگاشت در سطح زمین بود. این تحقیق می‌تواند به شناخت منطقه‌ی روانگرایی و تعیین راهکارهای مناسب برای مقابله با آن استفاده شود. در این تحقیق به بررسی تأثیر عمق روانگرایی بروی نشست سطح زمین، اضافه فشار آب حفره‌ای و شتاب‌نگاشت در سطح زمین پرداخته شد. همچنین تأثیر ضخامت لایه روانگرا نیز بر پارامترهای ذکر شده بررسی گردید. در این پژوهش از نرم‌افزار opensees برای مدل‌سازی به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر اندرکنش خاک استفاده شد. نرم‌افزار opensees که در آن از زبان برنامه‌نویسی تیکل "TCL/TK" استفاده شده است می‌تواند مورد استفاده پژوهشگران برای شبیه‌سازی و اجرای کلیه رفتارهای سازه‌های مورد نظر قرار گیرد. این نرم‌افزار در دسته نرم‌افزارهای کدباز قرار می‌گیرد که به پژوهشگران این اجازه را می‌دهد که مصالح و فرمان‌های خود را در قسمت کتابخانه آن اضافه نموده و استفاده و آنالیز نمایند. ابعاد پروفیل خاک ۵۰ متر در ۱۵۰ متر بوده و آنالیز به‌صورت ۲ بعدی و بدون سربار بوده است. ضخامت لایه روانگرا ۳ متر در نظر گرفته شد و از عمق به سمت سطح زمین جابجا گردید تا اثر عمق لایه روانگرا بررسی شود. برای یک عمق ثابت نیز، ضخامت لایه روانگرا ۱، ۳ و ۵ متر تغییر کرد تا اثر ضخامت لایه در خروجی‌ها دیده شود. نتایج مشاهده شده در ادامه آمده است.

۵-۲ نتایج کلی

در مورد بخش اول پایان‌نامه که لایه روانگرا در عمق‌های مختلف ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ متر قرار گرفت نتایج زیر بدست آمد:

- بر اساس شتاب‌نگاشت ماکزیمم تغییرات شتاب نگاشت در بازه زمانی ۶ تا ۲۵ ثانیه رخ داده است و بر اساس این اشکال نیز می‌توان نتیجه گرفت در این بازه زمانی بیشترین

تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در تمام عمق‌ها رخ داده است. پس از فروکش کردن شتاب‌های ماکزیمم زلزله، به تدریج روند تخلیه اضافه فشار آب حفره‌ای در تمام عمق‌ها آغاز می‌شود.

- با افزایش عمق لایه خاک روانگرا و دور شدن آن از سطح زمین، به واسطه افزایش تنش مؤثر، میزان اضافه فشار آب حفره‌ای افزایش می‌یابد. طبق این شکل پس از فروکش کردن شتاب‌های ماکزیمم زلزله، به تدریج روند تخلیه اضافه فشار آب حفره‌ای در تمام عمق‌ها آغاز می‌شود اما شیب این کاهش در عمق‌های بیشتر، تندتر می‌باشد اما اختلاف اضافه فشار آب حفره‌ای هر چقدر عمق لایه روانگرا بیشتر می‌شود، کمتر می‌شود یعنی این انتظار وجود دارد در عمق‌های بیشتر از ۱۵ متر نمودارهای اضافه فشار آب منفذی بر هم بصورت نسبی منطبق گردند.

- با افزایش عمق و با در نظر گرفتن یک لایه روانگرا با ضخامت ۳ متر مقدار نشست افزایش می‌یابد و بیشترین مقدار روانگرایی نیز مربوط به زمانی است که لایه روانگرا بین ۰ تا ۳ متر از سطح زمین قرار می‌گیرد و در اعماق بیشترین مقدار ماکزیمم نشست کاهش می‌یابد. به ازای عمق‌های بیشتر از ۶ متر همگرایی در نشست خاک به وجود می‌آید. یعنی می‌توان گفت اگر لایه روانگرا در عمق ۶ متری سطح زمین و بعد از آن قرار گیرد تاثیری بر نشست سطح زمین ندارد.

- هرچه لایه روانگرا از سطح زمین دورتر می‌شود مقدار ماکزیمم شتاب‌نگاشت از سطح زمین کمتر می‌شود ولی زمانی که لایه روانگرا در عمق بین ۹ تا ۱۲ متر و ۱۲ تا ۱۵ متر قرار گرفت کاملاً نمودار شتاب‌نگاشت بر یکدیگر منطبق شد و مشخص شد از این عمق به بعد دیگر وجود لایه روانگرا تاثیری بر نمودار شتاب‌نگاشت سطح زمین ندارد.

- در تمام اعماق با گذشت زمان و با افزایش شتاب مقدار Γ_u افزایش می‌یابد و در ثانیه‌های پایانی که شتاب زلزله در حال کاهش است مقدار Γ_u کاهش می‌یابد.

- در ثانیه‌های ابتدایی یک همبستگی و تطابق در مقدار τu در اعماق مختلف وجود دارد. با افزایش عمق لایه روانگرا مقدار τu افزایش می‌یابد ولی هیچگاه به عدد یک نمی‌رسد. شیب مربوط به کاهش τu در ثانیه‌های پایانی که مقدار شتاب در حال کم شدن است در لایه‌های عمیق‌تر بصورت تندتری اتفاق می‌افتد.

در مورد بخش دوم پایان‌نامه که اثر ضخامت لایه روانگرا مورد بررسی قرار گرفت و از لایه‌های روانگرا با ضخامت ۱، ۳ و ۵ متر در یک عمق مشخص یعنی تراز منفی ۳ متر سطح زمین استفاده شد، نتایج زیر بدست آمد:

- بر اساس شتاب‌نگاشت ماکزیمم تغییرات شتاب نگاشت در بازه زمانی ۶ تا ۲۵ ثانیه رخ داده است و بر اساس این اشکال نیز می‌توان نتیجه گرفت در این بازه زمانی بیشترین تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در تمام ضخامت‌ها رخ داده است. پس از فروکش کردن شتاب‌های ماکزیمم زلزله، به تدریج روند تخلیه اضافه فشار آب حفره‌ای در تمام ضخامت‌ها آغاز می‌شود.

- با افزایش ضخامت لایه خاک روانگرا و دور شدن آن از سطح زمین، به واسطه افزایش تنش مؤثر، میزان اضافه فشار آب حفره‌ای افزایش می‌یابد. طبق این شکل پس از فروکش کردن شتاب‌های ماکزیمم زلزله، به تدریج روند تخلیه اضافه فشار آب حفره‌ای در تمام عمق‌ها آغاز می‌شود اما شیب این کاهش در ضخامت‌های بیشتر، تندتر می‌باشد.

- در زمانی که لایه روانگرای روانگرا با افزایش ضخامت آن در زیر عمق ۳ متر سطح زمین آزاد روبرو می‌شود، مقدار نشست کاهش می‌یابد بطوریکه وقتی ضخامت لایه روانگرا ۱ متر بود مقدار نشست بیشترین میزان خود را داشت اما این موضوع بیشتر در زمان‌های اولیه نمود داشت و هرچقدر زمان جلو می‌رود مقدار نشست برای تمام ضخامت‌ها به هم میل می‌کند.

- با افزایش ضخامت لایه روانگرا مقدار ماکزیمم شتابنگاشت سطح زمین کمتر می‌شود.
- ضخامت یک متری لایه روانگرا در عمق ۳ متری باعث ایجاد نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای بیشتری نسبت به ضخامت ۳ و ۵ متری لایه روانگرا می‌شود. طبق این شکل مشاهده می‌شود اختلاف σ_u در ضخامت ۱ تا ۳ متر برای لایه روانگرایی به نسبت ضخامت ۳ تا ۵ متر بیشتر می‌باشد. برای حالتی که ضخامت لایه روانگرا یک متر بود مقدار σ_u به عدد یک بسیار نزدیک شد.

۳-۵ پیشنهادها

- بررسی اثر استفاده از شمع بر روی نشست، شتابنگاشت و فشار آب حفره‌ای در زمین دارای لایه روانگرا
- بررسی اثر استفاده از ستون سنگی بر روی نشست، شتابنگاشت و فشار آب حفره‌ای در زمین دارای لایه روانگرا
- بررسی وجود دو لایه روانگرا با تراکم متفاوت بر روی نشست، شتابنگاشت و فشار آب حفره‌ای

منابع

- Arulmoli, K., Muraleetharan, K.K., Hossain, M.M., and Fruth, L.S., (1992) "VELACS: Verification of liquefaction analysis of centrifuge studies, laboratory testing program, soil data report". Earth Technology Corporation, pp 51-58.
- Ayoubi, P. and Pak. A., (2017), "Liquefaction-induced settlement of shallow foundations on two-layered subsoil strata". Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 94, pp 35-46.
- Chen., Y., Liu, X. and Dai, H., (2010) "Free Field Analysis of Liquefiable Soils". EJGE. vol 15, pp 361-372.
- Elgamal, A., Lu, J. & Yang, Z., (2005), "Liquefaction – included settlement of shallow foundations and remediation: 3D numerical simulation". Journal of Earthquake Engineering vol. 9, Special Issue 1 (2005). pp. 17-45.
- Esmaeili M. and Hakimpour SM.,(2015), "Three dimensional numerical modelling of stone column to mitigate liquefaction potential of sands", Journal of Seismology and Earthquake Engineering, 17 (2),pp 127-40.
- Hashash, Y., Dashti, Sh., E., Ines Romero, M. & Ghayoomi, M., (2015). "Evaluation of 1-D seismic site response modeling of sand using centrifuge experiments". Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 78, pp 19-31.
- Karimi, Z. & Dashti, Sh., (2015). "Numerical Simulation of Earthquake Induced Soil Liquefaction: Validation against Centrifuge Experimental Results". In IFCEE 2015, ASCE.
- Rauch, A. F., (1997), "Soil Liquefaction in Earthquakes".
- Shahir, H. & Pak. A. (2010). "Estimating liquefaction-induced settlement of shallow foundations by numerical approach". Computers and Geotechnics, 37, pp 267-279.
- Tang, L., Cong, Sh., Xianzhang Ling, X., Lu, J. & Elgamal, A., (2015). "Numerical study on ground improvement for liquefaction mitigation using stone columns encased with geosynthetics". Geotextiles and Geomembranes, 1-6.

Zeybek, A. and Madabhushi, S. P. G., (2017). "Influence of air injection on the liquefaction-induced deformation mechanisms beneath shallow foundations." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, pp 266-276.

آریج، ص. و جانعلی زاده چوب بستی، ع.، (۱۳۹۸)، "تاثیر سربار و عمق مدفون بر پتانسیل روانگرایی"، پنجمین کنفرانس سالانه ملی مهندسی عمران، معماری و شهرسازی ایران، مشهد.

شرقی، ا. و کرمی، م.، (۱۳۹۸)، "تحلیل 3D سیستم ترکیبی شمع و ستون سنگی تسلیح شده با ژئوسینتیک با هدف کاهش نشست و ظرفیت روانگرایی و افزایش ظرفیت باربری"، یازدهمین کنگره ملی مهندسی عمران، شیراز.

حاجتی ضیابری، س. و میراعلمی، م.، (۱۳۹۸)، "ارزیابی عددی رفتار لرزه ای پی های سطحی مستقر بر ماسه مستعد روانگرایی"، یازدهمین کنگره ملی مهندسی عمران، شیراز.

خادمی دستجردی، ع.ا.، مختاری، م.، حاذقیان، م. و پورحسینی، ر.، (۱۳۹۸)، "تحلیل عددی اثر بار لرزه ای بر نشست ناشی از روانگرایی بستر همگن ماسه ای"، سومین کنفرانس بین المللی پژوهش های کاربردی در مهندسی سازه و مدیریت ساخت، تهران.

حسینی، م.م.، (۱۳۷۲)، "اصول و مبانی دینامیک خاک"، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله.

صفرپور، م.، باقری اصل، ش.، سلیمی، ح. و شوش پاشا، ع.، (۱۳۹۱)، "بررسی اثر عمق و ضخامت لایه روانگرا بر ظرفیت باربری پی های سطحی"، دومین کنفرانس ملی سازه، زلزله و ژئوتکنیک، بابلسر.

مرادی، م. و جعفریان، ی.، (۱۳۹۴)، "تأثیر مشخصات بار لرزه ای بر نشست دائمی پی های سطحی مستقر بر ماسه مستعد روانگرایی"، فصلنامه علمی پژوهشی علوم و مهندسی زلزله، سال دوم، شماره سوم، صفحات ۶۳-۷۵.

نشریه شماره ۵۲۵، "راهنمای ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاک، پیامدها و روش های کاهش مخاطرات

آن"، معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، (۱۳۹۱).

Abstract

One of the most damaging phenomena caused by earthquakes is the phenomenon of soil lubrication. Soil lubrication during an earthquake results in loss of soil strength and hardness, which is more common in saturated sands. A saturated sand layer tends to condense and decrease in volume when exposed to dynamic load. If the pore water is not drained rapidly under dynamic loading, the pore water pressure will increase gradually if the pore water pressure increases to such a degree that the pore water pressure is increased. To be equal to the total stress, the phenomenon of liquefaction occurs. In fact, in this case the effective stress becomes zero and our sandy soil has no shear strength and acts as a fluid. Occurrence of liquefaction phenomena in soils and deposits, especially sandy soils, causes a wide range of damages, including subsidence and tilting of structures and foundations on the soil layer prone to liquefaction.

In this study, Opensees software was used for modeling to evaluate soil interaction more accurately so that the user can come up with the principle of a software system by which the user can define model geometry, loading, quantitative structure, materials used, and analysis method by writing text. The dimensions of the soil profile are 50 m by 150 m and the analysis is 2-dimensional without overhead. The thickness of the wetland layer is assumed to be 3 meters and has been moved from the depth to the ground surface to investigate the effect of the wetland depth. For a constant depth, the thickness of the fluid layer was changed to 1, 3, and 5 m to show the effect of layer thickness on the outputs.

The results showed that the farther from the surface, the higher the pore water pressure and the amount of sedimentation increased, but after a certain depth the amount of sedimentation no longer changed and the amount of u increased and the maximum horizontal acceleration. Based on the results obtained in the study of thickness of the fluidized bed, it was found that by increasing the thickness of the wetland layer at a certain depth, by increasing the effective stress, the amount of pore water pressure increased. If the thickness of the wetland layer is 1 m, the saturation value will be highest, and as the thickness of the wetland layer increases, the maximum horizontal acceleration (indicated in the mapping acceleration) will be reduced to the surface. The thickness of one meter of the wetland layer at 3 meters depth causes a higher pore water pressure ratio than the 3 and 5 meter thickness of the wetland layer.

Keywords: Fluidization, Accelerogram, Opensees, Cavity Water Pressure



Kharazmi International Campus

M.Sc. Thesis in Geotechnical Engineering

Title:

The effect of liquefaction in depth on seismic ground motion

By:

Davoud Sheikh

Supervisors:

Dr.Amir Bazr Afshan Moghadam

December 2019