

## ارزیابی عملکرد ستونهای شنی در کاهش خطرات ناشی از روانگرایی

هادی بهادری، استادیار، گروه عمران دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه  
 قلی اسدزاده خوشه‌مهر، دانشجوی کارشناسی ارشد خاک و پی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه

### چکیده

یا بارهای رفت و برگشتی تغییر می‌کند. این ویژگی تغییر فشار آب منفذی و تنش مؤثر خاک را به دنبال دارد. در حالتی بحرانی که فشار آب منفذی با تنش مؤثر بین ذرات برابر می‌شود، مقاومت خاک یکباره از دست رفته و روانگرایی رخ می‌دهد [۱]. علی‌رغم گذشت چند دهه از آشنایی مهندسان و متخصصان با این پدیده و انجام مطالعات و تحقیقات وسیع و گسترده پیرامون آن، روانگرایی کماکان خسارات سنگین و زیادی در اغلب زلزله‌های بزرگ در مناطق مختلف جهان را به دنبال داشته است. بیشتر مناطق ساحلی که جنس خاک در آنها عمدتاً از ماسه‌های سست اشباع می‌باشد، به دلیل وجود جاذبه‌های ویژه، سرمایه و جمعیت قابل توجهی جذب کرده‌اند و ابنیه متعددی در این نواحی احداث گردیده‌اند که مسلماً در اثر وجود خطر لرزه‌خیزی بالا نگاه ویژه به بحث روانگرایی و مقاوم‌سازی سازه‌ها در مقابل این پدیده را می‌طلبد. در این پژوهش از ستونهای شنی برای مسلح‌سازی خاک بهره گرفته شده و تأثیر آنها بر روی رفتار خاک برای دو تیپ حرکت ورودی مورد بررسی قرار گرفته است. مسأله دیگری که در این پژوهش مورد توجه واقع شده، متفاوت بودن رفتار خاک در مناطق آزاد (عدم حضور سازه) و مناطقی که سازه در آن احداث گردیده، می‌باشد.

بر اساس مطالعاتی که آقایان لی و سید در سال ۱۹۶۷ انجام دادند، متوجه شدند که اولاً فشارهای حفره‌ای اضافی عموماً در زیر پی نسبت به منطقه آزاد کمتر است و ثانیاً ماکزیمم فشار حفره‌ای منفی در منطقه زیر پی در عمقی حدود نصف قطر پی به وقوع می‌پیوندد (این پدیده در نفوذپذیریهای کم رخ می‌دهد) [۱]. به دلیل وجود پی، یک سری تنشهای برشی استاتیکی در محیط وجود دارند و بنابراین رفتار خاک ماسه به طور متوسط متراکم و اشباع در طول لرزه به صورت اتساعی می‌باشد و به خاطر بروز چنین

روانگرایی خاک پدیده‌ای است که به دلیل کاهش سختی و مقاومت خاک در اثر وارد آمدن نیروی زلزله یا یک بارگذاری سریع صورت می‌گیرد. در محلهایی که خاک از دانه‌های سست تشکیل شده، تمایل به فشردن شدن می‌تواند به ایجاد فشارهای آب منفذی اضافی در خاک منتهی شود و اندازه این فشارهای اضافی می‌تواند به قدری زیاد باشد که باعث تقلیل قابل ملاحظه مقادیر تنشهای مؤثر و وقوع روانگرایی در خاک گردد. در طی این پدیده توانایی خاک زیر پی برای حفظ پایداری سازه‌ها از بین می‌رود و در نتیجه منجر به ایجاد نشست و چرخش در ساختمانها می‌شود. در این تحقیق شناخت رفتار ستونهای شنی بر مبنای نوع حرکت ورودی و نحوه آرایش ستونها در قالب تغییرات تنش مؤثر و نشست پی، با انجام یک سری آزمایش میز لرزه  $g-1$  در آزمایشگاه ژئوتکنیک لرزه‌های دانشکده فنی ارومیه و مدلسازی ستونها در سه آرایش مختلف و با دو نوع شتاب ورودی، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مدل از ماسه ۱۶۱ فیروزکوه استفاده شده و روش مرطوب برای تهیه مدل در دستور کار قرار گرفته است. همچنین ابزاربندی کاملی جهت ارزیابی نشستها، افزایش فشار آب حفره‌ای و شتاب‌سنجی استفاده گردیده و برای ارزیابی نشست، از یک پی گسترده مستقر بر ماسه‌های مستعد روانگرایی بهره گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد عملکرد ستونهای شنی که در قالب کنترل تنش مؤثر و کاهش نشست قابل ارزیابی است، از شتاب ورودی و آرایش ستونها شدیداً تأثیر می‌پذیرد.

**کلیدواژه‌ها:** ستون شنی، تنش مؤثر، روانگرایی، تیپ آرایش ستونهای شنی، تیپ حرکت ورودی

### ۱- مقدمه

حجم خاکهای ماسه‌ای شل و متراکم پس از اعمال لرزه

برای جلوگیری از تقلیل تنشهای مؤثر و کاهش نشست سازه در میز لرزه یک بعدی دانشکده فنی مهندسی دانشگاه ارومیه مورد بررسی قرار گیرد. لذا با مدلسازی پروفیل خاک مسلح شده با ستونهای شنی، تأثیر ستونهای شنی در نحوه توزیع تنشهای مؤثر و کنترل نشستها بررسی شده است.

## ۲- مکانیزم مقابله با روانگرایی

منشاء وقوع اثرات روانگرایی را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد [۵-۶]:

- ۱) اثراتی که به خاطر تنزل مقاومت خاک به وجود می‌آیند.
  - ۲) اثراتی که به خاطر زایل شدن فشار آب حفره‌ای اضافی به وجود می‌آیند.
  - ۳) اثراتی که به خاطر تنزل سختی خاک به وجود می‌آیند.
- بکارگیری زهکشهای شنی کمابیش هر سه اثر را تحت پوشش قرار می‌دهد. به طور کلی از آنجا که روشهای ساخت آنها بسیار آسان و هزینه‌های لازم برای بکارگیری این تکنیک بسیار اندک می‌باشد و از طرفی عملکردشان در جهت استهلاک اضافه فشار آب حفره‌ای (در صورت طراحی و اجرای مناسب) موفقیت‌آمیز است؛ لذا گزینه مناسبی برای مقابله با روانگرایی می‌باشد. تصویر (۱) نشان دهنده تنزل مقاومت خاک و گسیختگی برشی خاک می‌باشد که باعث فرورفت ساختمانها در داخل خاک و کج‌شدگی آنها در زلزله نیگاتا شده است [۷]. شکل (۱) نیز منعکس کننده توزیع تنشها بین ذرات خاک و آب حفره‌ای می‌باشد. نیرویی که عموماً در جهت قائم و از میان نقاط اتصال تحمل می‌شود تبدیل به فشار آب حفره‌ای (تقلیل تنش مؤثر) می‌شود که این حالت مربوط به پدیده روانگرایی است.



تصویر (۱): نشست و چرخش ساختمانها در زلزله نیگاتا ۱۹۶۴.

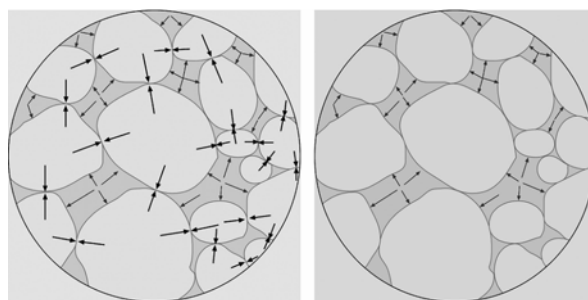
رفتاری از خاک، یک سری فشارهای حفره‌ای منفی در محیط زیر پی بوجود می‌آید. نهایتاً فشار حفره‌ای کل در زیر پی نسبت به قسمتهای عمیقتر کاهش پیدا می‌کند که ثمره این رفتار تغییر در توزیع تنش مؤثر در ارتفاع پروفیل خاک خواهد بود. فاکتورهایی همچون تغییرات در تنش مؤثر قائم ایجاد شده توسط احداث ساختمان و تأثیر پاسخ اندرکنش خاک/سازه بر نسبت تنش سیکلی حاصل از زلزله در نزدیکی ساختمان اثر می‌گذارند [۲]. زهکشهای شنی به دلیل قابلیت آماده کردن مسیر مناسب برای زهکشی قادر هستند که فشارهای حفره‌ای را هدایت کرده و باعث مستهلک شدن فشارها و مانع از رسیدن خاک به مرحله روانگرایی اولیه شوند [۲-۳].

این روش نخستین بار در سال ۱۹۷۷ توسط سید و بوکر تعریف گردید [۴]. بر اساس پیشنهاد سید، بیش از ۲۰۰۰۰۰ زهکش شنی در ژاپن نصب شد. نظریه سید این بود که این زهکشا جلوی روانگرایی را خواهند گرفت و زلزله ۱۹۹۳ این واقعیت را اثبات کرد. البته این زلزله دو سال بعد از مرگ سید اتفاق افتاد. موفقیت این روش باعث شد تا مهندسين ژاپنی ایده سید را بدون اثبات کامل قبول کنند. آنها زهکشهای شنی را برای حفاظت روانگرایی خاک معدن در توکیو نصب کردند و یک سری تست شبیه‌سازی زلزله انجام دادند تا اثر کاهندگی فشار زهکشهای شنی را در خاک روانگرا بررسی کنند. آنها معیار طراحی زهکشهای شنی را توسعه دادند تا زهکشی آب حفره‌ای به طور بی‌وقفه و بدون هیچ انسدادی انجام شود. معیار طراحی زهکش شنی به انتخاب اندازه دانه‌های شن و دانه‌بندی مربوط می‌شود. تکنیک اولیه ساخت زهکش شنی که در ژاپن در سال ۱۹۷۸ به کار گرفته شد، قدری نقص داشته و خام بود. پنج سال بعد از آن تکنیک ساخت اتوماتیک به کار گرفته شد. تکنیک ساخت اتوماتیک تقریباً بدون صدا و بدون ارتعاش می‌باشد. این تکنیک در ساختگاههای خیلی شلوغ مانند شهرها، کارخانه‌ها و ... بسیار مفید است [۵].

اگرچه بکارگیری این تکنیک گسترش زیادی یافته ولی تأثیر بهینه این روش به خوبی شناخته نشده است. با توجه به مطالب ذکر شده بالا، در مطالعه حاضر قرار است که تأثیر تپ آرایش ستونهای شنی در قالب دو تپ حرکت ورودی

جدول (۱): روابط اجرایی ستونهای شنی.

مدل اجرایی	فاصله مرکز به مرکز ستونهای شنی	قطر زهکشها
اجرای مثلثی	$d = 1/9 \times b$	$2a$
اجرای مربعی	$d = 1/77 \times b$	$2a$



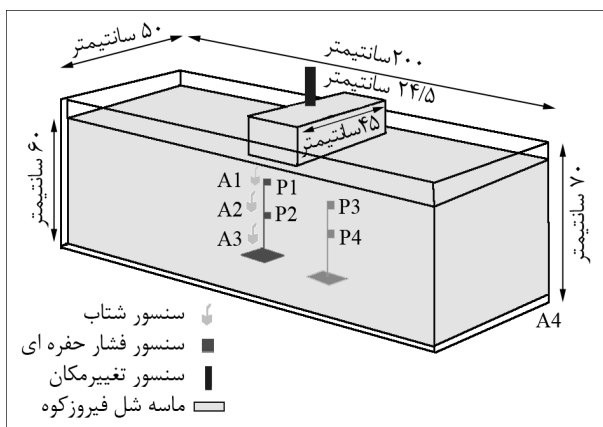
شکل (۱): توزیع تنشها بین ذرات خاک و آب.

در این روابط  $a$  شعاع زهکشها و  $b$  شعاع تأثیر زهکش می باشد که از نمودار حاصل می شود. نکته حائز اهمیت این است که استفاده از ستونهای شنی مستلزم توجه دقیق به نفوذپذیری زهکشها و رفتار فیلتری مرز خاک-زهکش می باشد که بهتر است مقدار مورد نیاز با انجام آزمایش نفوذپذیری کنترل شود.

### ۳-۳- تهیه مدل

در این تحقیق، تعدادی آزمایش میز لرزه بر روی مدل زهکشی های شنی در نظر گرفته شده است. شکل های (۲) و (۳) به ترتیب نشان دهنده نمای سه بعدی از مدل آزمایش و تیپ آرایش ستونهای شنی می باشد که قطر و فاصله مرکز به مرکز ستونها هم از قبل طراحی شده است و به ترتیب برابر با ۵ و ۲۰ سانتیمتر می باشد و توسط فیلتر ژئوتکستایل ساندویچ شده اند [۳-۴].

محفظه مدل از جنس پلکسی گلس و با ابعاد داخلی ۷۰×۵۰×۲۰ سانتیمتر می باشد. پایین محفظه بوسیله یک الک ریزدانه پوشیده شده است تا فرآیند اشباع به صورت نفوذ تدریجی و یکنواخت آب از پایین، صورت بپذیرد.



شکل (۲): نمای سه بعدی محفظه مدل، سنسورها و موقعیت فونداسیون.

با توجه به موارد فوق الذکر ملاحظه می شود که وقوع روانگرایی باعث خطرات جدی بر سازه ها می شود و در بسیاری موارد اتخاذ روشها باز هم نتوانسته مانع رخ دادن روانگرایی شود؛ لذا لازم است که با آشنایی و شناخت رفتار مناسب تکنیکهای مقابله با روانگرایی، شرایط بهینه عملکرد آنها را مشخص کرد. اگر برای مقابله با پدیده روانگرایی تکنیک ستونهای شنی به کار گرفته شود، باید عملکرد آنها در لرزه های خفیف و قوی جهت استهلاک اضافه فشارها و کنترل تنش مؤثر و به تبع آن جلوگیری از گسیختگی سازه بررسی گردد [۸-۹].

### ۳- تجهیز آزمایش و عملکرد میز لرزه

#### ۳-۱- نفوذپذیری زهکش

شرایطی که تحت آن زهکش به صورت یک چاه خالی عمل می کند به عنوان معیاری برای انتخاب زهکش استفاده می شود [۱۰-۱۱]. این شرایط توسط رابطه (۱) بیان می شود:

$$k_d > k_s \left( \frac{h}{a} \right)^2 \quad (1)$$

که  $k_d$  نفوذپذیری زهکش و  $k_s$  نفوذپذیری خاک در جهت افقی بر حسب سانتیمتر بر ثانیه،  $h$  عمق زهکش و  $a$  شعاع آن می باشد. به عنوان مثال اگر عمق زهکش ۱۰ متر و قطر آن ۶۰ سانتیمتر باشد، رابطه فوق بیان می کند که ضریب نفوذپذیری زهکش باید در حدود ۱۰۰ برابر خاک طبیعی باشد.

#### ۳-۲- فاصله اجرای زهکش

فاصله اجرای زهکشها را می توان از نمودارهای تهیه شده توسط سید و بوکر تخمین زد که در جدول (۱) ارائه شده است.

به دست می‌آید. برای درک، مشاهده و آشکارسازی رفتار مدل، شبکه چهارخانه‌ای از ماسه رنگی در دیواره مدل اجرا شده است. در نهایت، از مدل خاک گاز دی اکسید کربن عبور داده می‌شود تا با هوای محبوس شده در خلل و فرج خاک جایگزین شود و فرآیند اشباع را تسریع بخشد. سپس از پایین مدل جریان پایدار آب با دبی کم برقرار می‌گردد.

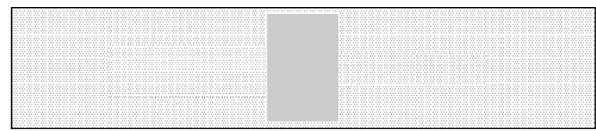
#### ۴- پاسخ دینامیکی کل سیستم پی - خاک

رفتار قسمتهای مختلف سیستم فیزیکی مرکب، پاسخ آنها به تحریک دینامیکی خارجی و اندرکنش اجزاء آن تحت عنوان "پاسخ دینامیکی" می‌باشد. بدیهی است که یک چنین پاسخی بستگی به خصوصیات مکانیکی کلیه اجزاء و خصوصیات بارهای دینامیکی اعمالی به سیستم دارد. با استفاده از داده‌های دستگاه ذخیره‌سازی اطلاعات، نمودارهای تاریخچه زمانی شتاب پایه برای هر آزمایش، در شکل (۴) ترسیم گردیده است.

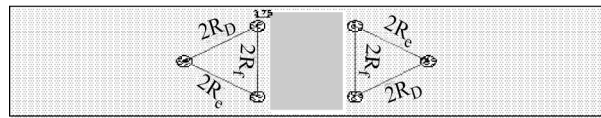
قابل ذکر است که میز لرزه دارای حرکت یک بعدی (۱D) است و شتاب در یک جهت اعمال می‌شود، لرزش اعمالی دارای فرکانس لرزشی ۲/۷ هرتز و ماکزیمم دامنه شتاب پایه برای تیب حرکت ورودی با شتاب بالا (U) و شتاب پایین (D) به ترتیب ۰/۱۵g و ۰/۰۸g می‌باشد.

#### ۴-۱- ارزیابی عملکرد با بررسی پاسخ نشست پی

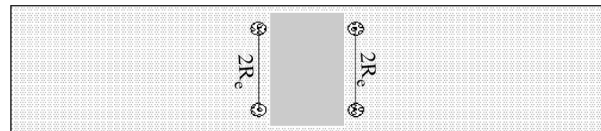
به صورت تئوریک، نشست پی ناشی از دو عامل گسیختگی خاک زیر پی و تحکیم حاصل از زایل شدن فشار آب حفره‌ای اضافی می‌باشد. گسیختگی خاک زیر پی حاصل از افت مقاومت خاک در اثر افزایش نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای و کاهش شدید تنش مؤثر می‌باشد که در جدول (۳) آورده شده است. در اثر افزایش فشار آب حفره‌ای، خاک تبدیل به سیال لزجی شده و از زیر پی به سمت کناره‌ها فرار می‌کند. در اثر این عمل زیر پی خالی شده و پی داخل خاک فرو می‌رود، تصاویر (۲) و (۳).



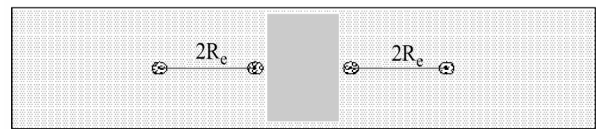
تیپ a



تیپ b



تیپ c



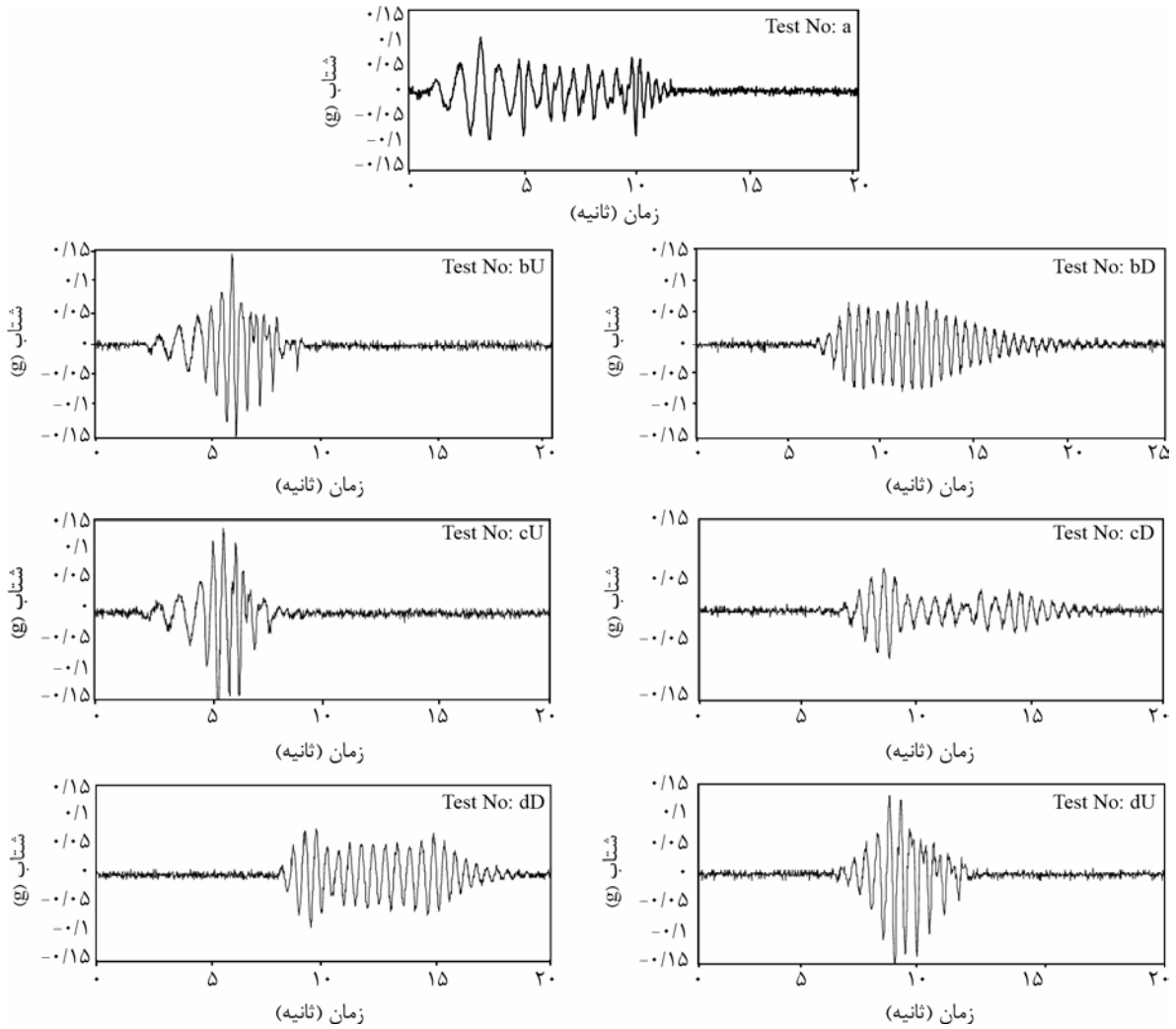
تیپ d

شکل (۳): تیب آرایش ستونهای شنی.

انواع مختلفی از سنسورها برای ثبت شتابها، اضافه فشار آب حفره‌ای و تغییر مکان در موقعیتهای مختلف جاسازی شده‌اند. البته با توجه به مقارن بودن مدل، تنها در یک طرف مدل منظور و جایگذاری گردیده‌اند. سنسورهای فشار حفره‌ای در محل‌های خود ثابت شده‌اند، در حالی که سنسورهای شتاب آزاد می‌باشند. سنسور تغییر مکان نیز در مرکز پی جایگذاری شده است. با توجه به این که وزن پی برابر با ۴۷ کیلوگرم می‌باشد، لذا فشار سرباری برابر با ۴/۲۶ کیلوپاسکال روی ماسه اعمال می‌کند. مقیاس در نظر گرفته شده ۱:۲۵ می‌باشد. برای مدلسازی از ماسه ۱۶۱ فیروزکوه استفاده شده که مشخصات ژئوتکنیکی آن در جدول (۲) ارائه شده است. روش مرطوب برای تهیه مدل در دستور کار قرار گرفته است. در این روش، ابتدا ماسه با ۵ درصد رطوبت مخلوط شده و سپس در داخل جعبه به روش بارشی ریخته می‌شود تا پروفیل خاک یکنواختی حاصل شود. در ادامه هر لایه به مقدار مشخصی متراکم می‌شود تا وزن واحد حجم کل برابر با ۱۴/۴۱ کیلونیوتن بر متر مربع حاصل شود بنابراین یک نسبت تخلخل برابر با ۰/۹ برای ماسه

جدول (۲): پارامترها و مشخصات فیزیکی ماسه فیروزکوه.

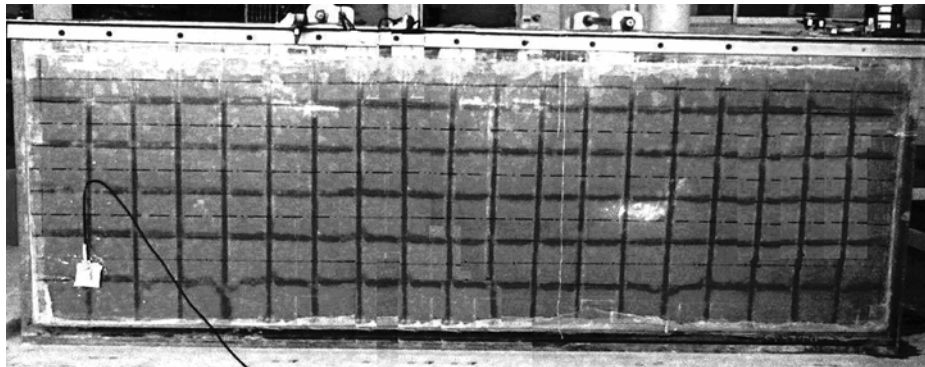
نوع ماسه	$G_s$	$e_{min}$	$e_{max}$	$K(cm/s)$	$C_c$	$C_u$	$D_{50}(mm)$	%FC
فیروزکوه ۱۶۱	۲/۶۵۸	۰/۸۷۴	۰/۵۴۸	۰/۰۱۲۵	۰/۹۷	۲/۵۸	۰/۳	۱



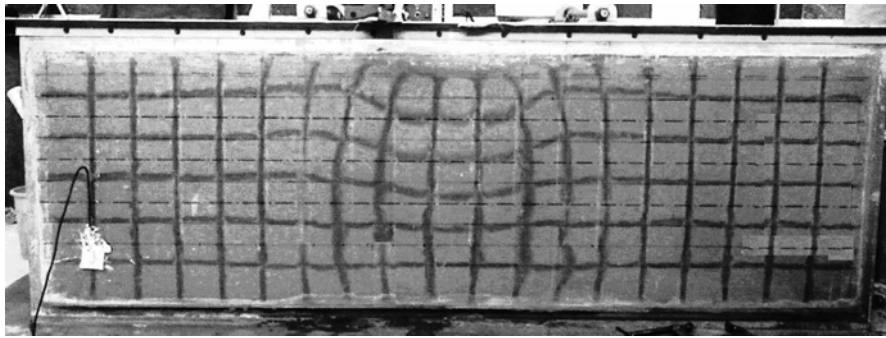
شکل (۴): تاریخچه زمانی شتاب پایه (A4) در تستهای a, b, c و d

جدول (۳): مقادیر ماکزیمم شتاب و نسبت اضافه فشار حفره‌ای در تستها.

دU	عU	بU	دD	عD	بD	a	تست
0.15g	0.15g	0.15g	0.08g	0.08g	0.08g	0.1g	شتاب ماکزیمم پایه
0.10	0.40	0.30	0.42	0.50	0.05	0.20	ماکزیمم Ru1
0.59	0.80	0.75	0.60	0.62	0.08	0.55	ماکزیمم Ru2
0.20	0.45	0.31	0.50	0.30	0.10	0.30	ماکزیمم Ru3
0.40	0.70	0.72	0.52	0.64	0.07	0.80	ماکزیمم Ru4



تصویر (۲): نمای مدل قبل از اعمال لرزش.



تصویر (۳): نمای مدل بعد از اعمال لرزش.

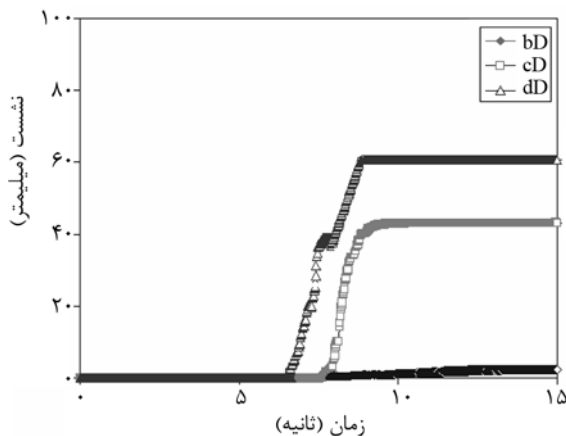
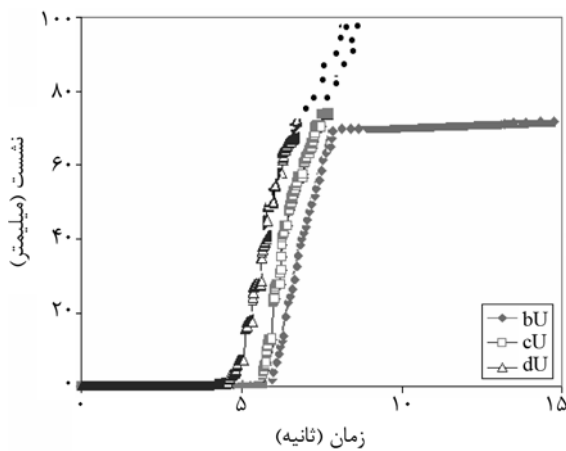
نکته‌ای که حائز اهمیت می‌باشد این است که ستونهای شنی زمان وقوع نشست و تغییر شکلها را به تأخیر می‌اندازند.

#### ۴-۲- تنش مؤثر و نشست پی

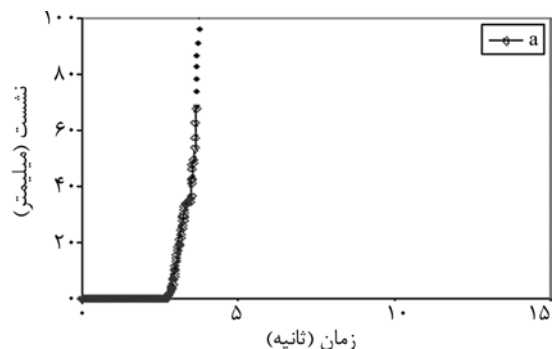
مهمترین فاکتور مؤثر در نشست پی، تقلیل مقاومت باربری خاک در اثر کاهش تنش مؤثر پروفیل خاک بوده که دلیل آن تولید اضافه فشار آب حفره‌ای در طی اعمال تنشهای برشی سیکنالی است. در این میان، مسأله دیگر دوام اضافه فشارهای تولیدی در خاک است که بر میزان و سرعت نشست تأثیر

در واقع طبق مشاهدات می‌توان گفت که فرورفت پی در داخل خاک به خاطر تغییر شکل جانبی خاک می‌باشد. این تغییر شکل جانبی به صورت کمانه کردن خطوط قائم ماسه رنگی قابل مشاهده است. سهم عمده‌ای از نشست پی ناشی از همین تغییر شکل جانبی خاک یا ناشی از رفتار سیال گونه خاک در حین لرزه می‌باشد.

بخش دیگری از نشست پی ناشی از نشست عمومی زمین در حین لرزه می‌باشد. نشست سطح زمین حاصل کرنش حجمی خاکی می‌باشد. این کرنش به خاطر زایل شدن فشار حفره‌ای اضافی تولید شده در حین لرزه می‌باشد. با توجه به داده‌های دستگاه ذخیره‌سازی اطلاعات، نمودارهای نشست مرکز فونداسیون در هر یک از آزمایشها به ترتیب انجام گرفته، در شکلهای (۵) و (۶) ترسیم گردیده‌اند. با توجه به نمودارها دیده می‌شود که در تیپ حرکت ورودی با دامنه شتاب پایین ( $D$ ) نشست در تست ( $b$ ) کمتر از بقیه بوده است که حاکی از عملکرد بهتر این تیپ آرایش می‌باشد. در حالی که برای تیپ حرکت ورودی با دامنه شتاب بالا ( $U$ ) نشست در تست ( $b$ ) باز کمتر از بقیه تستها است؛ ولی در کل نشست در همه تستها زیاد می‌باشد، که نشان گر عملکرد ضعیف ستونهای شنی در طول حرکات لرزه‌ای شدید می‌باشد.



شکل (۶): نشست مرکز فونداسیون در تستهای ( $b$  و  $c$  و  $d$ ).



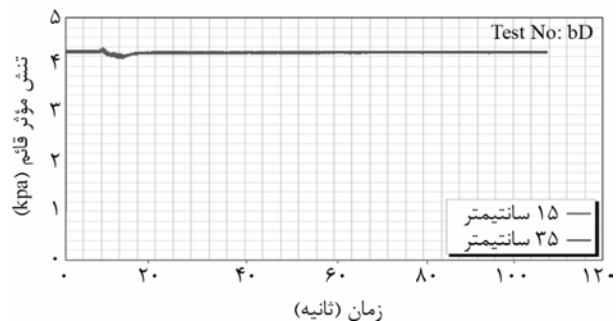
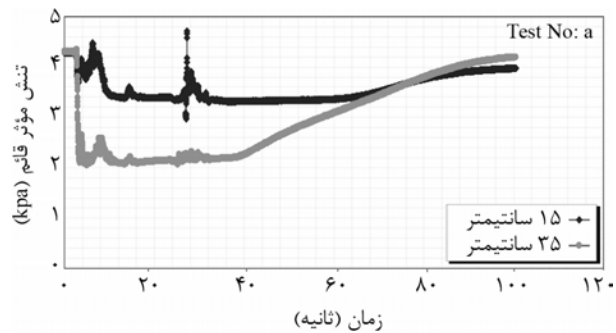
شکل (۵): نشست مرکز فونداسیون در تست ( $a$ ).

تنش مؤثر در خاک نشست رخ می‌دهد. این واقعیت با ملاحظه به مقدار تنش مؤثر در تست ( $bD$ ) نسبت به تستهای دیگر توجیه می‌گردد. همان طور که مشاهده می‌شود، در این تست تقلیل تنش مؤثر بسیار اندک بوده و نشست پی خیلی ناچیز است که آن هم فقط ناشی از نشست تحکیمی خاک به ازای استهلاک اضافه فشار آب حفره‌ای می‌باشد.

با ترسیم و بررسی نمودار تنش مؤثر در مقابل نشست پی برای هر تست می‌توان ارتباط بین این دو پارامتر را بررسی کرد. برای نمونه، نمودار تنش مؤثر در مقابل نشست پی برای تستهای ( $bU$ ,  $bD$  و  $a$ ) برای دو نقطه در عمق ۳۵ سانتیمتری ( $\sigma_2$ ) و در عمق ۱۵ سانتیمتری ( $\sigma_1$ ) در شکل (۸) ترسیم و برای بقیه تستها هم در جدول (۴) گردآوری شده است. با توجه به نمودار و جدول ملاحظه می‌شود که در آزمایش  $a$  (مسلح نشده)، اولاً تعداد سیکل لازم برای تقلیل تنش مؤثر و در نتیجه نرم شدن و روانگرایی خاک در قیاس با بقیه کمتر می‌باشد. ثانیاً مقدار نشست پی خیلی زیاد بوده که علت آن نبود استهلاک مناسب اضافه فشارها در خاک است که نشان می‌دهد حضور زهکشها باعث استهلاک اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک می‌شود که زمان نرم‌شدگی خاک را به تأخیر می‌اندازند.

به طور کلی مقدار تقلیل تنش مؤثر در عمق ۳۵ سانتیمتری ( $p_2$ ) بیشتر از عمق ۱۵ سانتیمتری ( $p_1$ ) است که علت اصلی آن با توجه به جدول (۳)، زیاد بودن مقادیر اضافه فشار حفره‌ای تولید شده در عمق می‌باشد. قاعدتاً باید مقادیر تنش مؤثر در عمق، بیشتر از مناطق کم‌عمق باشد که در اینجا کاملاً برعکس بوده و پدیده مشاهده شده را می‌توان به تأثیر حضور پی مرتبط دانست.

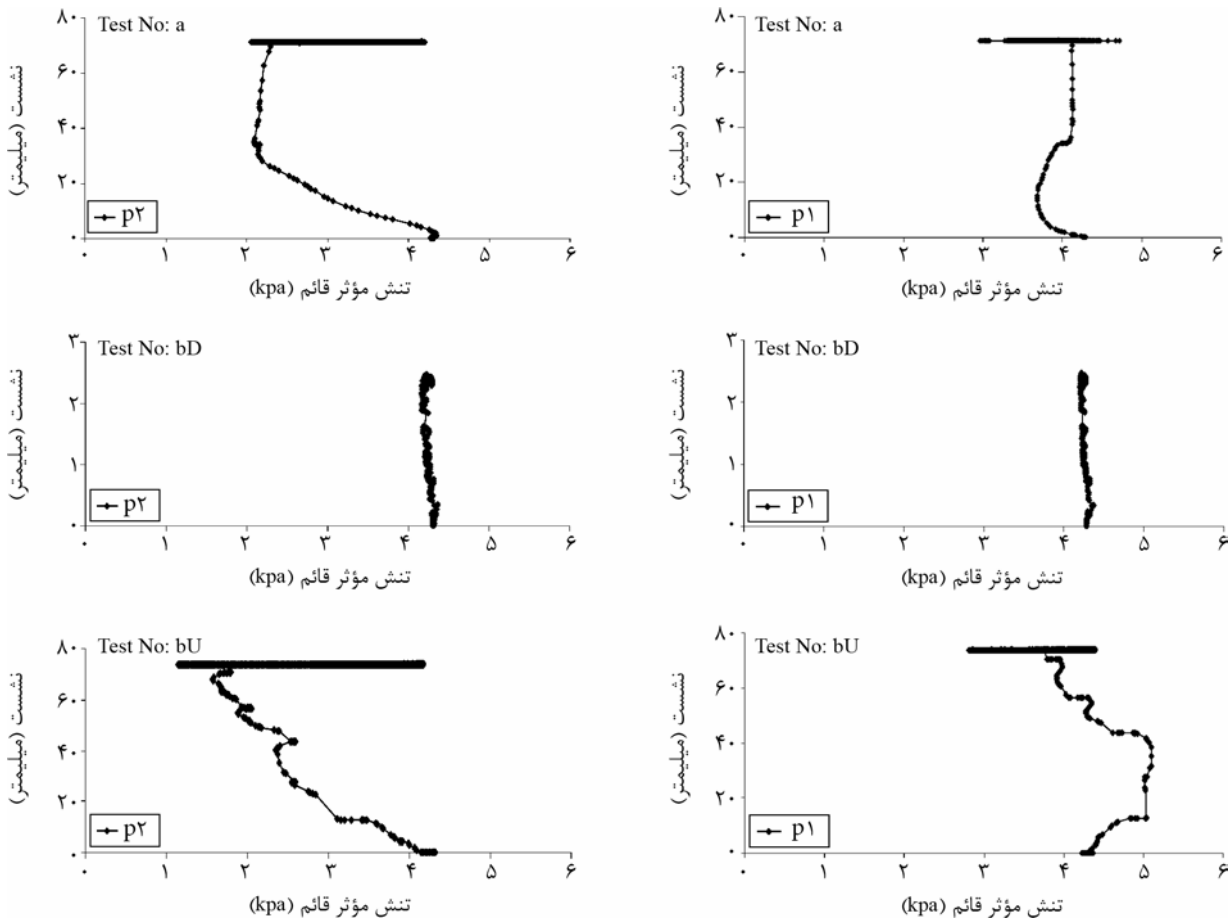
می‌گذارد. نمودارهای مربوط به تغییرات تنش مؤثر در دو عمق ۱۵ و ۳۵ سانتیمتری در شکل (۷) مشخص شده است با ملاحظه اشکال درمی‌یابیم که پهنای نمودار تغییرات تنش مؤثر در دو عمق، در تست ( $a$ ) بیشتر از تستهای دیگر می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت که سرعت زایل شدن فشار آب حفره‌ای اضافی در تمام تستها به جز تست ( $a$ ) بیشتر بوده و این به خاطر افزایش قدرت استهلاک اضافه فشارهای خاک به دلیل وجود زهکشهای شنی است. پس برگشت دوباره کمی تنش مؤثر به مقدار اولیه‌اش، مدت زمان بیشتری را در تست ( $a$ ) می‌طلبد که این فرآیند با حضور زهکش، اصلاح شده و مدت زمان برگشتی تنش مؤثر خیلی کم است. بنابراین میزان و سرعت نشست در مدل مسلح نشده در مقایسه با مدل‌های دیگر قابل ملاحظه می‌باشد. با کمتر شدن



شکل (۷): تغییرات تنش مؤثر در تستهای ( $a$  و  $bD$ ).

جدول (۴): مقادیر نشست پی و تنش مؤثر در آزمایشات.

$dU$	$cU$	$bU$	$dD$	$cD$	$bD$	$a$		
۲/۹۵	۲/۵۳	۲/۸۱	۲/۶۴	۲/۲۴	۴/۲۲	۲/۹۵	حین نشست	$\sigma'_1$
۴/۴۴	۳/۸۸	۴/۳۹	۳/۹۳	۳/۳۶	۴/۲۲	۴/۶۷	بعد از نشست	$\sigma'_0 = 4.2825^{kpa}$
۱/۷۱	۱/۴۶	۱/۱۵	۲/۵۱	۲/۰۲	۴/۲۱	۲/۰۷	حین نشست	$\sigma'_2$
۴/۱۹	۳/۸۵	۴/۱۶	۳/۹۲	۳/۹۵	۴/۲۱	۴/۲۰	بعد از نشست	$\sigma'_0 = 4.31.7^{kpa}$
	سیکل چهارم	سیکل پنجم	سیکل پنجم	سیکل پنجم	سیکل بیشتر	سیکل دوم	-	سیکل مورد نیاز روانگرایی
<۱۱۰	<۱۱۰	۷۰	۶۱/۶۹	۴۴	۳/۰۸	بزرگ	-	نشست ( $mm$ ) Point: I
>۱۰۰	>۱۰۰							



شکل (۸): تغییرات نشست بی و تنش مؤثر در آزمایشات (a، bD و bU).

رفتار متفاوت ستونهای شنی در تیپ حرکت ورودی با دامنه شتاب بالا (سری U) و پایین (سری D) برمی گردد. با توجه به نمودارهای حاصله از آزمایشات به این نکته پی می بریم که لازمه استفاده از تکنیک ستونهای شنی برای مقابله با پدیده مخرب روانگرایی بر دو اساس مهم استوار است: ۱- بررسی میزان لرزه خیزی منطقه مورد نظر به جهت متفاوت بودن عملکرد ستونهای شنی در شدت لرزه های متفاوت، ۲- اتخاذ تیپ آرایش مناسب برای چیدن ستونهای شنی به جهت استهلاک بهینه اضافه فشارهای آب حفره ای، به طوری که اگر در عمل بتوان یک تیپ آرایش مناسبی را برای سایت مورد نظر اتخاذ کرد، می توان در مناطق با لرزه خیزی متوسط به پایین جلوی نشستهای خطر آفرین را گرفت.

شایان ذکر است که چون پروفیل خاک با مقیاس مشخصی ایجاد شده، به تبع آن لازم است تا روابط مقیاس بر روی نتایج آزمایش اعم از تنش، نفوذپذیری، نشست و فشار حفره ای اعمال شود. لیکن با توجه به غیرخطی بودن

این امر به این دلیل است که در اثر حضور تنش برشی استاتیکی، خاک رفتار اتساعی از خود نشان می دهد و لذا مقادیر اضافه فشارهای تولیدی درست زیر پی کمتر می باشد. نکته دیگری که با توجه به شکل (۷) قابل استنتاج است، میل برگشت مقادیر تنش مؤثر به سمت مقدار اولیه شان در عمق ۳۵ سانتیمتری بیشتر از عمق ۱۵ سانتیمتری می باشد که نشان می دهد استهلاک اضافه فشارها اول از مناطق عمیق تر شروع می شود و در ادامه به قسمتهای کم عمق تر گسترش پیدا می کند. نمودارهای شکل (۸) نشان می دهند که نشست پی عمدتاً ناشی از آشفته شدن ستون خاک زیر پی در لایه های عمیقتر می باشد. با توجه به جدول (۴) و شکل (۸) مشخص می شود که تیپ حرکت ورودی و آرایش ستونهای شنی بر پاسخ دینامیکی خاک مسلح شده با ستون شنی اثر می گذارند. از آن جمله می توان به نشستها، تعداد سیکلهای لازم برای روانگرایی و میزان اضافه فشارهای تولیدی و تنشهای مؤثر اشاره نمود که دلیل اصلی آن به



جابه‌جایی تناوبی می‌گردد.

- ستونهای شنی باعث شده‌اند که تعداد سیکل لازم برای رسیدن  $Ru$  به مقدار حداکثر، افزایش یابد.

- با توجه به این که پهنای نمودار نسبت اضافه فشار حفره‌ای در تست  $a$  بیشتر از تستهای دیگر می‌باشد.

بنابراین نتیجه گرفته می‌شود که سرعت زایل شدن فشار

آب حفره‌ای اضافی در تمامی تستها به جز تست ( $a$ )

بیشتر است و این به خاطر افزایش قدرت زهکشی زمین

به دلیل وجود زهکشهای شنی می‌باشد و لذا ستونهای

شنی در روانگرایی زهکشی را میسر می‌سازند.

- در لرزه‌های قوی تنشهای مؤثر خیلی پایین می‌باشند.

به عبارتی زهکشهای شنی در لرزه‌های قوی چندان

مؤثر عمل نمی‌کنند، در صورتی که بعد از اتمام لرزش

در حالت استاتیکی به خوبی توانسته است فشار آب

حفره‌ای را کاهش دهد. با توجه به این که بیشترین

مقدار نشست پی در حین اعمال لرزش رخ می‌دهد،

علت کم تأثیر بودن زهکشهای شنی قابل توضیح

می‌باشد.

- نشستها به چند دلیل رخ می‌دهند:

الف) نرم‌شدگی و رخ دادن تغییرشکل‌های جانبی خاک؛

ب) از دست رفتن مقاومت برشی و نشست پانچ پی؛

ج) نشست لایه‌های خاک به واسطه استهلاک اضافه

فشارهای آب حفره‌ای در طول زلزله و بعد از آن.

## ۶- مراجع

1. Lee, K.L. and Seed, H.B. (1967). Cyclic stress condition causing liquefaction of sand, *Journal Soil Mech. Div.*, **93**(1), 47-70.
2. Liu, L. and Dobry, R. (1997). Seismic response of shallow foundation on liquefiable sand, *Journal Geotech. Engrg. Div.*, *ASCE*, **123**(6), 557-567.
3. Brennan, A.J. and Madabhushi, S.P.G. (2002). Effectiveness of vertical drains in mitigation of liquefaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**, 1059-1065.
4. Seed, H.B. and Booker, J.R. (1977). Stabilization

رفتار خاک، حتی با اعمال روابط مقیاس نیز احتمالاً نتایج از جهت کمی به طور دقیق منطبق بر رفتار واقعی پروتوتایپ نمی‌باشد (که با بزرگتر شدن ابعاد مدل این خطا کاهش می‌یابد)، ولی از بُعد کیفی می‌توان کاملاً رفتارها و پدیده‌ها را در آزمایش میز لرزه مورد مطالعه قرار داد.

## ۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

مطالعه خصوصیات پاسخ دینامیکی مشاهده شده سیستم

پی- خاک با در نظر گرفتن تاریخچه زمانی شتابهای پاسخ و

فشار آب حفره‌ای اضافی در نقاط مختلف، چند نکته مهم را

نشان می‌دهد:

- ستونهای شنی در زلزله‌های قوی توصیه نمی‌شوند؛

به عبارتی ستونهای شنی در حرکات قوی عملکرد

ضعیفی را نشان می‌دهند.

- با توجه به نمودارها و جداول موجود نتیجه گرفته

می‌شود که پاسخ دینامیکی سیستم پی و خاک شدیداً

تحت تأثیر تیپ آرایش ستونهای شنی و تیپ حرکت

ورودی است؛ به طوری که بسته به عملکرد ستونها در

تیپ حرکت ورودی متفاوت، مقادیر تنشها، نشستها و

اضافه فشارها متفاوت می‌باشد و از میان تیپهای آرایش،

چیدمان مثلثی، بهترین عملکرد را در کنترل مقاومت

باربری خاک دارد.

- ستونهای شنی زمان نرم‌شدگی خاک را به تأخیر

می‌اندازند، که در نتیجه آن، تقلیل مقاومت باربری در

خاک یا ایجاد نخواهد شد و یا اینکه آن را به تأخیر

می‌اندازد که پیامد آن باعث ناچیز بودن نشست در

زلزله‌هایی با مدت دوام کم خواهد بود و یا منجر به

تأخیر انداختن نشستهای زیاد در زلزله‌هایی با مدت

دوام زیاد خواهد بود.

- میرا شدن شتاب در خاک نشان‌دهنده نرم‌شدگی

خاک بوده که در مدل مسلح نشده این امر سریعتر

اتفاق می‌افتد.

- با دور شدن از محل پی سطحی در عمق، نسبت فشار

آب حفره‌ای اضافی بیشتر می‌شود. این امر در مورد

خاکی که پی روی آن قرار نگرفته باشد برعکس است،

لذا حضور پی باعث تبدیل پدیده روانگرایی تناوبی به

کاظم (۱۳۸۸). بررسی تأثیر حرکت ورودی و آرایش ستونهای شنی در نشست پی ناشی از روانگرایی با استفاده از میز لرزه، هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز.

9. Sadrekarimi, A. (2006). Seismic behavior of gravel drains and compacted sand piles using physical and numerical models, *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **11(D)**, USA.

10. Das, B.M. (1983). *Fundamentals of soil dynamics*, Elsevier Science, New York.

۱۱. میرحسینی، سیدمجدالدین (۱۳۷۸). مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران.

of potentially liquefiable sand deposits, *Journal of Geotechnical Division, ASCE*, **103(7)**, 757-768.

5. Ghalandarzadeh, A. and Sadrekarimi, A. (2005). Evaluation of gravel drains and compacted sand piles in mitigating liquefaction, MSc. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Tehran, Iran.

6. Ishihara, K. and Yoshimine, M. (1992). Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes, *Soils and Foundations, JSSMFE*, **32(1)**, 173-188.

7. Lee, K.L. and Albaisa, A. (1974). Earthquake Induced settlements in saturated sands, *Journal Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **100(GT4)**, 387-406.

۸. اسدزاده، قلی، بهادری، هادی، قلندرزاده، عباس و بدو،