

## مدل سازی سربار ناشی از احداث سازه بر روی یک خاک روانگرا

سعید اردشیری لاجیمی<sup>۱</sup>، جواد شریفی<sup>۲\*</sup>، ناصر حافظی مقدس<sup>۳</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد عمران- خاک و پی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشجوی دکترای زمین شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استاد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

j\_sharifi@stu.um.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۵/۲۴]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۱/۱]

**چکیده** - تأثیر سازه بر استعداد روانگرایی خاک بسیار با اهمیت است، به این دلیل که احداث سازه ممکن است از رخداد پدیده روانگرایی جلوگیری کند و یا عاملی برابر افزایش پتانسیل و شدت روانگرایی در لایه های زیرین شود. بنابراین در این پژوهش به منظور مدل سازی سربار ناشی از احداث سازه روی یک خاک روانگرا، ابتدا روش تحلیل عددی تفاضل محدود معرفی شده و در ادامه با به کارگیری نرم افزار FLAC 2D تحلیل دینامیکی غیر خطی سربار انجام شده است. فرآیند اعتبار سنجی و حصول اطمینان از نتایج تحلیل عددی، با مدل سازی یک آزمایش سانتریفیوژ و مقایسه نتایج آن با مدل عددی انجام گرفته است. نتایج مدل سازی نشان داد که تأثیر سربار در وقوع روانگرایی به تراکم خاک، نوع زلزله، شکل سازه و عمق اشباع بستگی داشته و بسته به شرایط زمین و زلزله تأثیر متفاوتی در وقوع روانگرایی دارد.

**واژگان کلیدی:** روانگرایی، سربار، سانتریفیوژ، FLAC 2D، مدل فین

### ۱- مقدمه

منفذی معادل آن فرصت زهکشی پیدا نکند، نیروی اعمال شده منتج به افزایش فشار آب منفذی خواهد شد. از آنجایی که آب حفره ای تراکم ناپذیر می باشد اضافه فشار حفره ای در زمان اعمال نیروهای برشی ایجاد شده و عامل وقوع پدیده روانگرایی در خاک می شود [۱۴-۱۱]. روش ها و محاسباتی که برای تعیین روانگرایی خاک ها وجود دارد، به وسیله ی پژوهشگران مختلفی پیشنهاد شده است که می توان به روش های تاتسوکا و همکاران (۱۹۸۰)، تاتسوکا، ایشیهارا (۱۹۷۹)، ایوازکی و همکاران (۱۹۷۸)، موسسه بین المللی تحقیقات مهندسی زلزله و سید و ادیس (۱۹۸۳) اشاره کرد [به نقل از ۸-۶ و ۲۷-۲۵]. امروزه روش های پیشرفته آزمایشگاهی و مدل های پیچیده عددی به شکلی توسعه یافته اند که امکان درک صحیح از شرایط و پیش بینی نزدیکتر به واقعیت را برای مهندسين فراهم کرده اند [به نقل از ۸-۶ و ۲۷-۲۵]. در شبیه سازی آزمایشگاهی رفتار خاک تحت اثر

سیلان یا روانگرایی خاک پدیده ای است که در زمین های ماسه ای اشباع با تراکم پایین به علت افزایش فشار حفره ای و از دست داده مقاومت برشی زمین اتفاق می افتد. خاک هایی که مقاومت برشی خود را به طور کامل از دست می دهند مانند یک مایع غلیظ عمل کرده و در خلال زلزله به صورت سیلان و جوشش ظاهر می شوند [۵-۱]. روانگرایی اغلب با گسترش جوشش ماسه همراه است. هنگام لرزش های زلزله و پس از آن اضافه فشار منفذی ناشی از زلزله به شکل محسوسی با جریان رو به بالای آب منفذی مستهلک می شود. این جریان سبب ایجاد نیروهای روبه بالا در ذرات خاک شده، موجب سست شدن بخش بالایی توده خاک می شود [۱۱-۶]. خاک های اشباع با تراکم پایین، در هنگام اعمال بارهای دینامیکی یا استاتیکی تمایل به کاهش حجم دارند، در صورتی که این کاهش حجم به قدری سریع باشد که آب

عکس حالت بالا نیز ممکن است، یعنی احداث سازه عاملی برای افزایش پتانسیل و شدت روانگرایی لایه‌های زیرین شده باشد. سید<sup>۳</sup> و رولینز<sup>۴</sup> در سال ۱۹۹۰، در پژوهش خود نشان دادند که مقدار نسبت تنش‌های دوره‌ای مورد نیاز برای ایجاد روانگرایی در نزدیکی و زیر سازه می‌تواند با مقادیر محدوده دور از سازه متفاوت باشد. وجود سازه فوقانی وضعیت نهشته‌های زیرین را از چند طریق مورد تغییر قرار می‌دهد، این موارد عبارتند از تنش‌های برشی استاتیکی موجود در صفحه افقی نهشته‌های خاک ( $k_a$ )، اثر تنش‌های موثر قائم ناشی از بارگذاری سازه ( $k_s$ )، تغییر در نسبت پیش تحکیمی ( $k_{OCR}$ ) و تأثیر اندرکنش خاک و سازه. برای هر خاکی در حالت دور از سازه در صفحه افقی تنش‌های برشی استاتیکی وجود ندارد، اما اگر اجزای خاک زیرین تحت تاثیر سازه‌هایی مانند سدهای بزرگ، ساختمان‌های بلند و یا زمین شیب‌دار قرار گیرد در صفحه افقی تحت بارگذاری، تنش برشی استاتیکی ایجاد می‌شود [۳-۱].

مشاهدات آزمایشگاهی سید و رولینز، حاکی از این است که نسبت پیش تحکیمی تأثیر مشخصی بر مقاومت روانگرایی ماسه اشباع دارد. با بدون بعد کردن نسبت تنش دوره‌ای، از تقسیم آن بر نسبت پیش تحکیمی واحد، ضریب تصحیح  $k_{OCR}$  به دست می‌آید. همچنین آنها دریافتند که وجود شالوده‌های سطحی بر ماسه عادی تحکیم‌یافته، نسبت پیش تحکیمی را تغییر نمی‌دهد، بنابراین  $k_{OCR}$  نقش مهمی در این مورد ندارد. اما در سازه‌های مدفون، حفاری برای اجرای شالوده سبب جبران بارگذاری سازه می‌شود، از این‌رو نسبت پیش تحکیمی زیر سازه و در نتیجه نسبت تنش دوره‌ای مورد نیاز برای ایجاد روانگرایی افزایش می‌یابد [۳۰-۲۵].

### ۳- آزمایش سانتریفیوژ

قوش<sup>۵</sup> و مادابوشی<sup>۶</sup> نتایجی از یک آزمایش سانتریفیوژ که بر یک مدل خاکی لایه‌بندی شده انجام گرفته بود را برای بررسی اندرکنش دینامیکی خاک و سازه ارائه کرده‌اند. برای برآورده

نیروهای دینامیکی (امواج زلزله)، می‌توان دستگاه آزمایش سانتریفیوژ<sup>۱</sup> نام برد [۱۸]. همچنین در مدل‌سازی عددی نرم‌افزارهای متعددی وجود دارد که توانایی ارائه و تحلیل مدل‌های توسعه‌یافته‌ای را در ارتباط با شبیه‌سازی روانگرایی خاک دارند، از این بین می‌توان به نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC<sup>۲</sup> اشاره داشت [۳۳]. استفاده از نتایج آزمایش سانتریفیوژ دینامیکی برای اعتبارسنجی این مدل‌ها بسیار رایج و پر کاربرد است. نتیجه این پژوهش‌ها سبب توسعه مدل‌های عددی و امکان به کارگیری آنها در تخمین پتانسیل روانگرایی، پیش‌بینی و بررسی رفتار خاک تحت اثر نیروهای زلزله شده است. چنانچه پاسخ و رفتار سیستم خاک به درستی شناخته و پیش‌بینی شود، می‌توان از برخی از خطرات زمین‌لرزه مانند روانگرایی تا حد زیادی در امان ماند [به نقل از ۶]. در این پژوهش به منظور مدل‌سازی سربار ناشی از احداث سازه بر روی یک خاک روانگرا، از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC با استفاده از نتایج صحرایی و آزمایشگاهی استفاده شده است. برای توانایی این نرم‌افزار در مدل نمودن سربار در پدیده روانگرایی، ابتدا نتایج شبیه‌سازی این نرم‌افزار با دستگاه سانتریفیوژ مقایسه شده و توانایی این دستگاه و مدل عددی FLAC در شبیه‌سازی سربار اثبات شده است. در مراحل بعد یک سازه در محیط روانگرا انتخاب و پس از مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی، تاثیر سربار بر روانگرایی خاک در نرم‌افزار مدل شده است. نتایج نشان داد که مدل عددی در این پروژه خاص سبب کاهش زیادی در هزینه‌های ساخت می‌شود.

### ۲- اثر سربار

تأثیر سازه بر استعداد روانگرایی بسیار با اهمیت است، باید به این موضوع توجه داشت که مشاهده تخریب سازه‌ها تحت اثر زلزله‌های پیشین، در واقع نشانگر اثر منفی سازه بر خاک زیرین نسبت به محیط آزاد نیست، چرا که وجود سازه ممکن است از رخداد پدیده عظیم‌تری جلوگیری کرده باشد. البته

3 Seed  
4 Rollins  
5 Ghosh  
6 Madabhushi

1 Centrifuge test  
2 Fast Lagrangian Analysis of Continua

موثر عمل می‌کند، ابتدا تنش کل محاسبه می‌شود، سپس با محاسبه فشار آب حفره‌ای، تنش موثر به دست می‌آید و از این تنش موثر در معادلات رفتاری استفاده می‌شود. بنابراین انجام تحلیل بر اساس تنش موثر به خوبی به وسیله‌ی FLAC امکان‌پذیر است [۲۷].

ماترین<sup>۱</sup> و همکارانش رابطه ۱ را بین نمو کاهش کرنش‌های حجمی ( $\Delta \varepsilon_{vd}$ ) و دامنه کرنش برشی دوره‌ای ( $\gamma$ ) برقرار کردند [به نقل از ۱۹-۱۸].

$$\Delta \varepsilon_{vd} = C_1 (\gamma - C_2 \varepsilon_{vd}) + \frac{C_3 \varepsilon_{vd}^2}{\gamma + C_4 \varepsilon_{vd}} \quad (1)$$

$C_1, C_2, C_3, C_4$  ضرایب ثابت است.

معادله ۱ به وسیله‌ی بایرن<sup>۱۱</sup> به صورت رابطه ۲ اصلاح شد.

$$\frac{\Delta \varepsilon_{vd}}{\gamma} = C_1 \exp \left( -C_2 \left( \frac{\varepsilon_{vd}}{\gamma} \right) \right) \quad (2)$$

$C_1$  و  $C_2$  ضرایب ثابت متفاوت از ثابت‌های معادله ۱ است.

در نرم‌افزار FLAC برای ایجاد تغییرات فشار حفره‌ای از یک مدل رفتاری با نام فین<sup>۱۲</sup> استفاده می‌شود که هر دو رابطه بالا را در کنار الگوی رفتاری خمیری استاندارد موهر-کولمب به کار می‌بندد. بایرن ۱۹۹۱، اشاره داشت به اینکه مقدار  $C_1$  می‌تواند با استفاده از رابطه ۳ و داشتن تراکم نسبی خاک به دست آید. در نهایت مقدار عددی  $C_2$  از رابطه ۶ به دست می‌آید [به نقل از ۱۹-۱۸ و ۳۳].

$$C_1 = 7600 (D_r)^{-2.5} \quad (3)$$

همچنین با به کارگیری رابطه تجربی بین  $D_r$  و عدد اصلاح شده آزمایش نفوذ استاندارد  $(N_1)_{60}$ ، طبق رابطه ۴ و ۵، مقدار عددی  $C_2$  به دست می‌آید.

$$D_r = 15 (N_1)_{60}^{0.5} \quad (4)$$

$$C_1 = 8.7 (N_1)_{60}^{-1.25} \quad (5)$$

$$C_2 = \frac{0.4}{C_1} \quad (6)$$

#### ۴-۲- شبیه‌سازی عددی آزمایش سانتریفیوژ

در این بخش به چگونگی شبیه‌سازی آزمایش سانتریفیوژ با استفاده از نرم‌افزار FLAC پرداخته می‌شود. مراحل انجام کار

ساختن قوانین تصحیح دینامیکی در مقیاس کردن ویسکوزیته، به جای آب نمونه خاکی با استفاده از مایع سیلیکون اشباع شد. سربار معرف وزن سازه، به وسیله‌ی یک وزنه صلب که به آرامی روی سطح مدل قرار گرفته بر خاک اعمال می‌شود. این وزنه تنشی معادل با ۱۵۰ کیلوپاسکال در شتاب گرانشی  $g$  ۵۰ ایجاد می‌کند [۱۹-۱۸]. قوش و مادابوشی با استفاده از روشی که زینکوویچ<sup>۷</sup> و همکارانش در شبیه‌سازی عددی آزمایش ارائه کرده‌اند و با کد نویسی اجزا محدود توانستند رفتار و پاسخ خاک مورد مطالعه در آزمایش را به صورت قابل قبولی شبیه‌سازی نمایند. این امر نشان می‌دهد که با انتخاب مدل رفتاری مناسب برای خاک و ایجاد یک مدل نرم‌افزاری صحیح می‌توان پاسخ یک سیستم خاکی را در مقابل نیروهای زلزله به درستی پیش‌بینی کرد. از آنجا که آزمایش سانتریفیوژ به عنوان یک ابزار برای آزمودن مدل‌های عددی و اعتبار بخشی به نرم‌افزارهای موجود است، چنانچه این آزمایش را در محیط نرم‌افزار به درستی شبیه‌سازی بشود، می‌توان از روش به کار بسته شده برای تحلیل، بررسی و پیش‌بینی یک سیستم خاکی مشابه استفاده کرد.

#### ۴-۱- روش عددی تحلیل روانگرایی

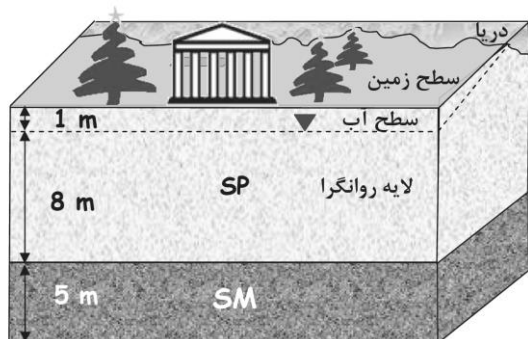
امروزه روش‌های عددی متفاوتی برای آنالیز روانگرایی توسعه یافته‌اند اما داده‌های صحرایی بسیار اندکی برای ارزیابی صحت آن‌ها وجود دارد. همان‌گونه که پیشتر نیز اشاره شد استفاده از نتایج آزمایش سانتریفیوژ دینامیکی برای اعتبارسنجی این مدل‌ها بسیار رایج و پر کاربرد است.

#### ۴-۱-۱- نرم‌افزار FLAC 2D

نرم‌افزار FLAC بر پایه روش تفاضل محدود عمل می‌کند. دو ویژگی مهم این نرم‌افزار که آن را نسبت به سایر نرم‌افزارهای مهندسی ژئوتکنیک متمایز می‌کند، عبارتند از روش حل صریح<sup>۸</sup> و لاگرانژی<sup>۹</sup> که امکان مشاهده رفتار سیستم در تغییر شکل‌های زیاد را فراهم می‌سازد [۳۳]. الگوهای رفتاری موجود در FLAC در مورد بارگذاری استاتیکی بر پایه تنش

جدول ۱- پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک

واحد	مقدار	پارامتر
KPa	۱۰	چسبندگی (C)
Degree	۳۰	زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ )
KN/m <sup>2</sup>	۱۵۰۰۰	مدول الاستیسته سکون $E_{s(\text{static})}$
KN/m <sup>2</sup>	۲۰۰۰۰	مدول الاستیسته دینامیکی $E_{s(\text{dynamic})}$
-	۲۶	عدد نفوذ استاندارد $N_{SPT(\text{average})}$
-	۰/۳	ضریب پواسان ( $\nu$ )
cm/s	$1 \times 10^{-4}$	نفوذپذیری (K)
KN/m <sup>3</sup>	۲۰	وزن واحد حجم خاک ( $\gamma$ )
%	۳۰	تراکم خاک ( $D_r$ )



شکل ۱- وضعیت تحت الارضی محل مورد مطالعه

## ۵-۲- مدل سازی سربار

روش تحلیل به کار بسته شده از نوع دینامیکی غیر خطی با به کارگیری مدل های رفتاری موهر-کولمب و فین، مشابه آنچه است که در شبیه سازی آزمایش سائتریفیوژ از آن استفاده شد و با وارد کردن تاریخچه زمانی شتاب زلزله بر مدل عددی ساخته شده انجام گرفت. تاریخچه زمانی های مورد استفاده بیشتر مربوط به زلزله هایی بوده که روانگرایی در هنگام وقوع آنها مشاهده شده است، و به عنوان زلزله های مرجع در تحلیل های دینامیکی در سطح جهانی از آنها استفاده می شود. این زلزله ها عبارتند از طبس، نورث ریج، چی-چی، کوبه و لوما پریتا. در انتخاب تاریخچه زمانی زلزله های فوق از رکوردهای ثبت شده مربوط به ساختگاه های مشابه با ساختگاه مورد نظر استفاده شده است. شکل ۲ شتاب نگاشت های اصلاح شده زلزله های یاد شده را نشان می دهد.

به ترتیب شامل، ایجاد هندسه مدل، اعمال شرایط اولیه (تحت اثر نیروهای استاتیکی)، تحلیل شرایط اولیه، اختصاص شرایط ویژه تحلیل دینامیکی به مدل مانند شرایط ویژه مرزی، چگونگی اعمال بار، میرایی، انتخاب و اختصاص مدل رفتاری مناسب و انجام تحلیل، استخراج نتایج و مقایسه آن با خروجی های آزمایش است.

هندسه مدل با ابعاد متناظر با شتاب گرانش  $g$  در ۵۰ در FLAC ایجاد شد و نواحی شبکه تقاضل محدود به صورت مربع و به ابعاد  $2 \times 2$ ، تشکیل شد. این ابعاد با توجه به مصالح خاک، قادر است موج با بیشینه فرکانس ۵ هرتز را عبور دهد. پس از اتمام تحلیل برای مقایسه نتایج با مدل آزمایشگاهی تغییرات اضافه فشار حفره ای در عمق  $4/25$  متری نسبت به زمان اعمال بار مشابه آنچه که قوش و مادابوشی، ارائه کردند، از مدل استخراج شد. در ادامه نتایج شبیه سازی عددی انجام گرفته با استفاده از نرم افزار FLAC و نتایج مدل آزمایشگاهی با هم دیگر مقایسه شده و نتایج نشان داد که همبستگی آنها مناسب بوده است [به نقل از ۱۸، ۲۷، ۲۴].

## ۵-۱- اعتبار سنجی مدل

پس از شبیه سازی دستگاه سائتریفیوژ و مدل سازی سربار ناشی از احداث سازه روی خاک روانگرا، در این قسمت مدل ساخته شده مورد آزمایش قرار گرفته و برای احداث سازه روی خاک روانگرا مورد ارزیابی واقع شده است.

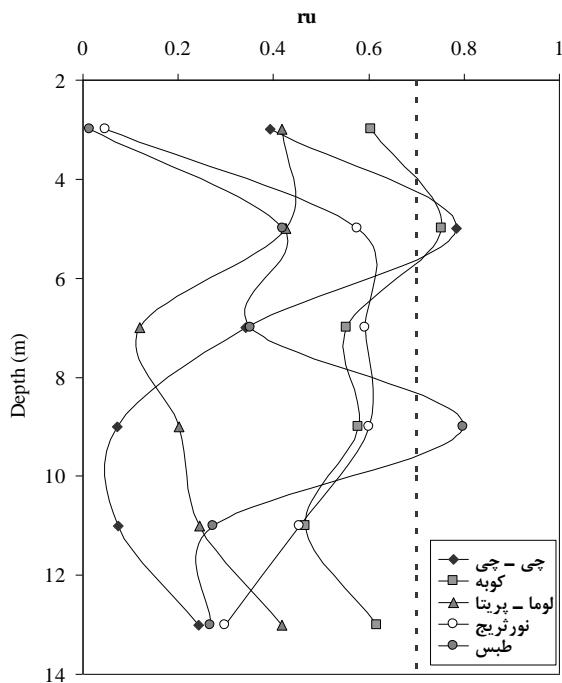
## ۵-۱- مشخصات پروژه

ساختگاه مورد مطالعه مربوط به محل احداث ساختمان مرکز فنی و حرفه ای شهرستان نوشهر، واقع در استان مازندران است. محل مورد مطالعه روی پهنه های ساحلی و نهشته های دریایی قرار دارد. این مناطق شامل دامنه های آبرفتی و بادزن های آبرفتی است [۳۴]. جدول ۱ پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک که در آزمایشگاه و در محل تعیین شده است را نشان می دهد. بر این اساس شماتیک وضعیت تحت الارضی محل مورد مطالعه رسم شده و در شکل ۱ نشان داده شده است.

شتاب‌نگاشت در نظر گرفته شده و تعداد وضعیت اعمال سربار، برابر با ۱۰ مدل است. در تفسیر نتایج تحلیل‌های عددی مرتبط با مسئله روانگرایی از اصطلاحی با عنوان نسبت اضافه فشار حفره‌ای یا  $r_u$  یاد می‌شود که مقدار آن از رابطه ۷ به دست می‌آید.

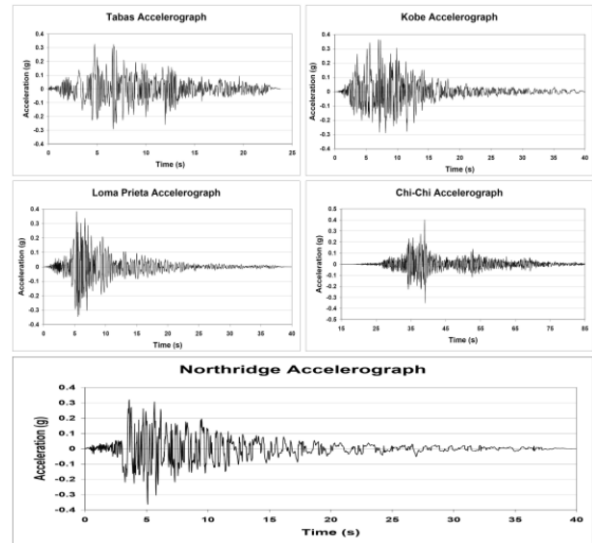
$$r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_0} \quad (7)$$

نتایج پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد، چنانچه مقدار  $r_u$  بزرگتر از ۰/۷ شود خاک دارای پتانسیل روانگرایی بالا بوده و نیازمند استفاده از روش‌های بهسازی برای مقابله با روانگرایی احتمالی است. شکل‌های ۵ الی ۸، مقادیر  $r_u$  را در نقاط مختلف از عمق زمین، به ترتیب در محوطه، لبه ساختمان و زیر ساختمان نشان می‌دهند.



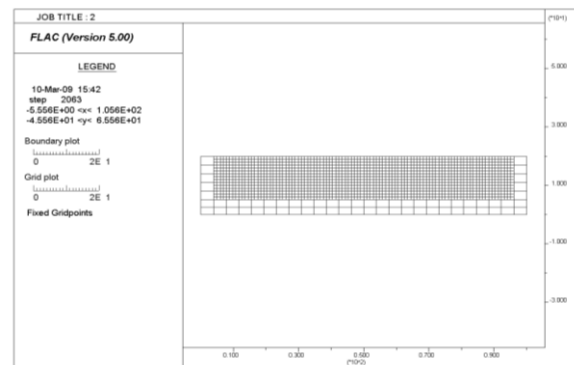
شکل ۵- تغییرات  $r_u$  در مکان دور از سازه

همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود جز در سه مورد مقادیر  $r_u$ ، از مقدار ۰/۷ بیشتر نشده است. البته این تخطی اندک بوده و با توجه به نتایج دیگر زلزله‌ها قابل چشم‌پوشی است. شکل ۶ و ۷ تغییرات  $r_u$  به ترتیب در لبه سازه و در مرکز سازه (DL+LL) را نشان می‌دهد.

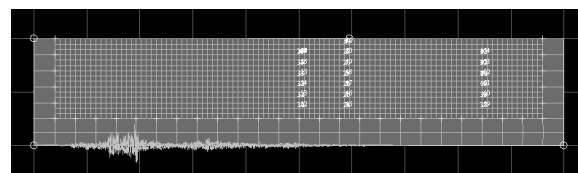


شکل ۲- شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده در مطالعه

صفر شدن تنش موثر خاک عامل تشخیص روانگرا شدن یا نشدن خاک است. برای بررسی احتمال روانگرایی در خاک مورد مطالعه نقاطی در میانه، گوشه و فواصل دور از پی ساختمان انتخاب شد تا وضعیت تنش موثر آنها در حین اعمال موج زلزله بررسی شود. شکل‌های ۳ و ۴ منطری کلی از مدل‌های عددی ساخته شده در نرم افزار FLAC را نشان می‌دهد.

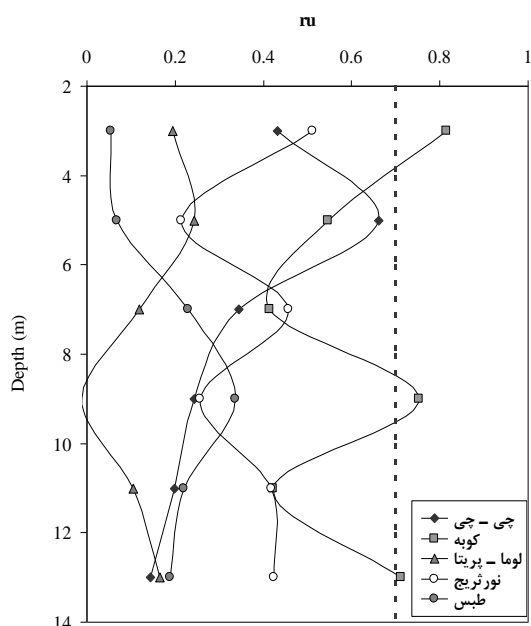
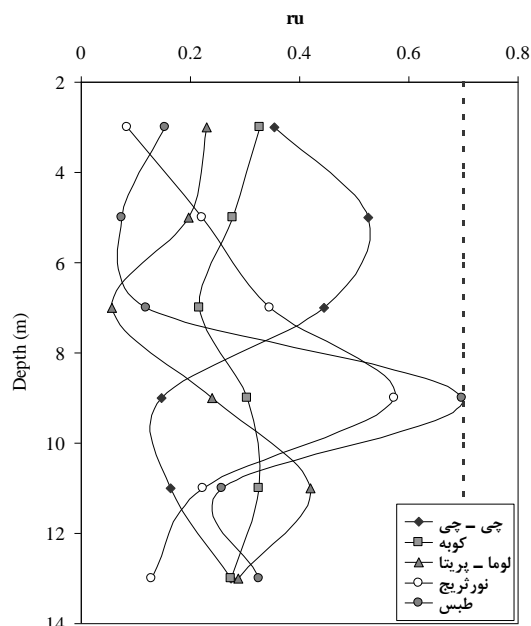


شکل ۳- مدل ساخته شده در FLAC



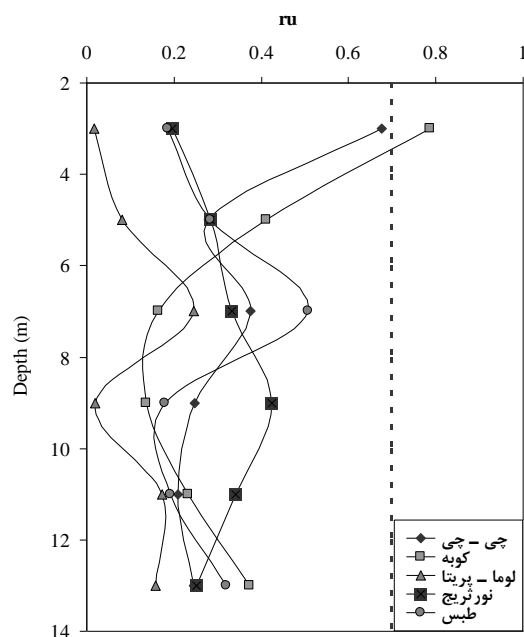
شکل ۴- نحوه اعمال موج در مدل FLAC

تعداد مدل‌های نهایی بررسی شده با توجه به تعداد

شکل ۸- تغییرات  $r_u$  با عمق در مرکز سازه (DL).شکل ۶- تغییرات  $r_u$  در لبه سازه

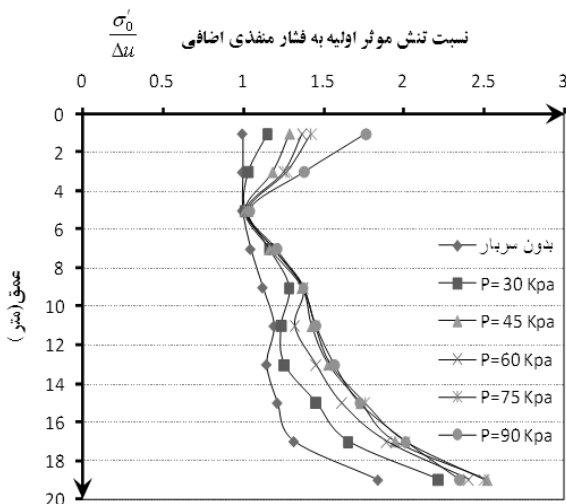
شکل ۸ تغییرات  $r_u$  با عمق در مرکز ساختمان را تحت اثر بار مرده به تنهایی نشان می‌دهد، همان‌گونه که مشاهده می‌شود با کاهش مقدار بار، اندکی بر پتانسیل روانگرایی افزوده شده است، اما این مقدار کاهش بسیار ناچیز و بی‌اثر است. البته در مرکز پی و در نقاط نزدیک به سطح زمین به دلیل تأثیر بیشتر سربار بر افزایش تنش موثر خاک کاهش شدید پتانسیل روانگرایی در خاک مشاهده می‌شود که این امر بر حفظ سلامت ساختمان در صورت وقوع زلزله بسیار موثر است.

اگر چه پیش‌بینی عدم وقوع روانگرایی اطمینان‌خاطری از سلامت یک سازه در مواجهه با زلزله‌های طرح و سطح بهره‌برداری ایجاد می‌کند ولیکن لازم است در خاک‌های ماسه‌ای اشباع که در آنها احتمال وقوع روانگرایی بررسی می‌شود، نشست‌های ناشی از کاهش مقاومت خاک نیز کنترل شود. هر چند هیچ‌یک از آیین‌نامه‌های داخلی به این موضوع اشاره نکرده‌اند ولی مطابق دستورالعمل فنی NAVFAC 1997، [۲۵]، مقادیر مجاز نشست ناشی از روانگرایی به مقادیر کمتر از ۱۰ سانتی‌متر برای زلزله طرح و ۲/۵ سانتی‌متر برای زلزله سطح بهره‌برداری محدود شده است. همچنین جابه‌جایی افقی سازه تحت اثر دو زلزله فوق به ترتیب نباید از مقادیر ۱۵ و ۷/۵ سانتی‌متر تجاوز نماید. شکل‌های ۹ تا ۱۱

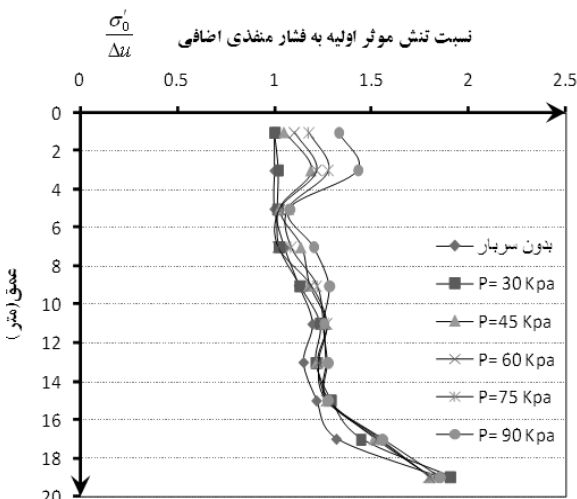
شکل ۷- تغییرات  $r_u$  در مرکز سازه (DL+LL).

از مشاهده تغییرات نسبت اضافه فشار حفره‌ای با عمق در شکل‌های ۶ و ۷ و مقایسه آنها با شکل ۵ می‌توان به درستی دریافت که با نزدیک شدن به سازه در راستای افق، از پتانسیل روانگرایی خاک کاسته می‌شود، این مقدار کاهش بیانگر اثر مثبت سربار ناشی از بار مرده و زنده سازه در کاهش احتمال وقوع روانگرایی در ساختمانگاه مورد نظر است. شکل ۸ تغییرات  $r_u$  با عمق در مرکز سازه (DL) را نشان می‌دهد.

موثر در نهشته‌های ماسه‌ای متراکم و نیمه متراکم می‌شود که تاثیر آن در خاک‌های متراکم به مراتب بیشتر است. در نهشته‌های ماسه‌ای سست سربار پایین بر روی پتانسیل روانگرایی بی تاثیر است و در سربارهای بالا تاثیر کمی دارد. در این رابطه شکل ۱۲ و ۱۳ نسبت تنش موثر به اضافه فشار منفذی در مقابل عمق برای زلزله طبس برای پروژه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



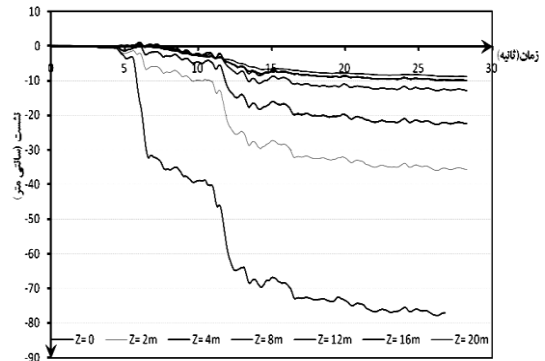
شکل ۱۲- تاثیر سربار در وسط پی برای ماسه سست



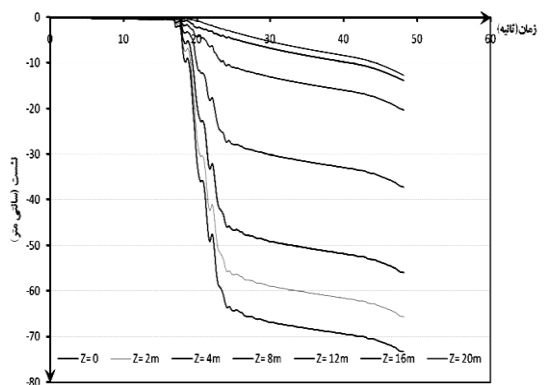
شکل ۱۳- تاثیر سربار در گوشه پی برای ماسه سست

با توجه به تحلیل حساسیت‌های انجام شده در ارتباط با تراکم خاک در حالت متراکم، نیمه متراکم و سست، می‌توان نتیجه گرفت که در نهشته‌های ماسه‌ای متراکم و نیمه متراکم در سربارهای پایین، تاثیر مثبتی بر کاهش پتانسیل روانگرایی داشته و این حالت در میزان سربارهای زیاد محسوس‌تر است،

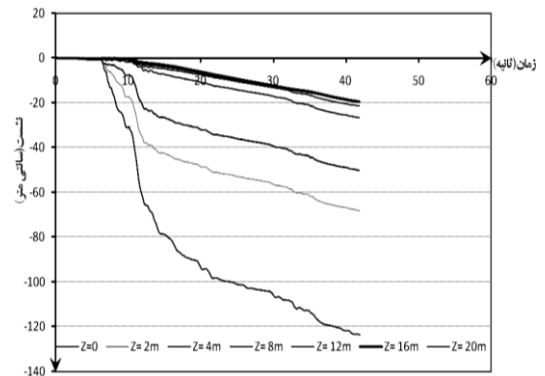
تغییر مکان قائم خاک را در وسط و گوشه پی در نهشته‌های ماسه‌ای سست تحت زلزله طبس را نشان می‌دهند. در این شکل‌ها دیده می‌شود که تغییر مکان قائم در گوشه پی نسبت به وسط پی بیشتر است.



شکل ۹- تغییرات نشست در مرکز سازه (DL)



شکل ۱۰- تغییرات نشست در مرکز سازه (DL+LL)



شکل ۱۱- تغییرات نشست در لبه سازه

همچنین با محاسبات انجام شده، مقادیر نشست و جابه‌جایی افقی سازه کمتر از ۳ سانتی‌متر بوده که شروط فوق را ارضا می‌نماید. پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که افزایش سربار سبب کاهش قابل توجه اضافه فشار منفذی و افزایش تنش

اجرای فونداسیون که در پایان سبب صرفه‌جویی زیادی در ساخت سازه یاد شده شد که مهمترین دستاورد استفاده از روش عددی در این پروژه خاص است.

## ۷- مراجع

- [1] Seed, H.B, Tokimatsu, k., Harder, J., L.F., Chung, R.M., "The Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluation", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol.111, No.12, 1985, pp. 1425-1445.
- [2] Liu, H., Qiao, T., "Liquefaction Potential of Saturated Sand Deposits underlying Foundation of Structures", 1987, pp.148-175.
- [3] Rollins, K.M., Seed, H.B., "The Influence of Building Potential Liquefaction Damage" Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.116, No.2, 1990, pp. 165-185.
- [4] Das, B.M., "Principles of Geotechnical Engineering", 3rd Edition, PWS Publishing Company, Boston, 1994.
- [5] Matasovic, N., Mladen, V., "Generalized Cyclic-Degradation-Pore-Pressure Generation Model for Clays", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 121, No. 1, 1995, pp. 33-42.
- [6] Kramer, S.L., "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice Hall, 1996, pp. 653.
- [7] Ferritto, J.M., TECHNICAL REPORT TR-2077-SHR: "SEISMIC DESIGN CRITERIA FOR SOIL LIQUEFACTION", NAVAL FACILITIES ENGINEERING SERVICE CENTER Port Hueneme, California 93043-4370, 1997.
- [8] Finn, W.D.L. "State-of-the-art of geotechnical earthquake engineering practice", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 20 (2000), pp. 1-15.
- [9] Youd, T., Idriss, I., Castro, G., Seed, R., "Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshop on evaluation of liquefaction resistance of soils", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng., ASCE, 2001, pp. 817-833.
- [10] Liyanathirana, D.S., Poulos, H.G., "Numerical Simulation of Soil Liquefaction Due to Earthquake Loading", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22, 2002, pp. 511-523.
- [11] Adaliera, K., Elgambal, A., Meneses, J., Baez, J.I., "Stone columns as liquefaction countermeasure in non-plastic silty soils", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 23, Issue 7, October 2003, pp. 571-584.
- [12] Baziar, M.H., Nilipour, N., "Evaluation of Liquefaction Potential Using Neural-Networks and CPT results". Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol.23, 2003, pp. 631-636.
- [13] Shahir, H., Pak, A., Taiebat, M., Jeremić, B., "Evaluation of variation of permeability in liquefiable soil under earthquake loading",

اما در حالت سست در سربارهای کم تاثیر چندانی نداشته، ولی با افزایش سربار استعداد روانگرایی کاهش می‌یابد که بسته به میزان سربار و زلزله متفاوت خواهد بود.

این زلزله‌ها به ترتیب سبب روانگرایی تا عمق ۰/۵، ۳ و ۱ متر از سطح زمین برای نهشته‌های متراکم و ۳ و ۵ متر برای نیمه متراکم و ۱۵، ۱۷ و ۱۳ متر برای نهشته‌های سست خواهند شد که این موضوع اهمیت تراکم خاک و همچنین زلزله را نشان می‌دهد. همچنین عمق اثرگذاری سربار برای سه نوع مختلف تراکم متفاوت بوده که در نهشته‌های ماسه‌ای متراکم در وسط و گوشه به ترتیب تا عمق ۱۵ متر و ۱۱ متر تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد و در اعماق بیشتر تأثیر کمی دارد و این موضوع برای نهشته‌های ماسه‌ای متراکم صادق بوده و با این تفاوت که عمق اثربخشی سربار کاهش می‌یابد که مقدار آن برای نهشته‌های نیمه متراکم در وسط و گوشه به ترتیب تا عمق ۱۱ متر و ۱۰ متر و در نهشته‌های سست ۵ متر و ۴ متر است.

## ۶- نتیجه‌گیری

امروزه استفاده از روش‌های عددی در کنار روش‌های تجربی در تحلیل مسائل ژئوتکنیکی با توجه به توسعه روز افزونشان به یک ضرورت تبدیل شده است. روش‌های تجربی به دلایلی نظیر جامع بودن، ساده‌سازی مفرط، مشخص نساختن پاسخ و رفتار سیستم در پروژه‌های مهندسی ژئوتکنیک و دیگر پروژه‌ها، بسیار محافظه‌کارانه بوده و به نوعی در نقطه مقابل اقتصاد مهندسی قرار می‌گیرند. با آگاهی، شناخت و استفاده صحیح از روش‌های عددی می‌توان گام مثبتی برای کاهش هزینه‌ها در پروژه‌های مهندسی عمران برداشت.

در مدل‌سازی انجام گرفته با نرم‌افزار FLAC، در پروژه مرکز فنی و حرفه‌ای شهرستان نوشهر با لحاظ کردن اثر وزن سازه بر ساختگاه موجود، تحلیل دقیق‌تری از پتانسیل روانگرایی آن ارائه شد که با بررسی رفتار خاک در مدت زمان وقوع زلزله، بررسی نشست‌های تحمیلی و مقادیر کاهش در میزان تنش موثر خاک توانست نقش مهمی در کاهش هزینه‌های ساخت در این پروژه ایفا نماید. کاهش حدود ۸۰ درصد در هزینه‌های



- [25] Noorzad, R., Safari, S., Omidvar, M., "The effect of structures on the wave-induced liquefaction potential of seabed sand deposits", *Applied Ocean Research*, Volume 31, Issue 1, February 2009, pp. 25-30.
- [۲۶] نورزاد، ر.، ارزیابی و تحلیل روانگرایی ناشی از موج در نهشته‌های ماسه‌ای دریا، پایان نامه درجه کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش خاک و پی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تهران، ۱۳۷۳.
- [۲۷] باقری، م.، بررسی تأثیر سربار بر روی روانگرایی خاک، پایان‌نامه درجه کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش خاک و پی، دانشکده عمران، دانشگاه مازندران، ۱۳۸۸.
- [28] Vessiaa, G., Venistib, N., "Liquefaction damage potential for seismic hazard evaluation in urbanized areas", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 31, Issue 8, August 2011, pp. 1094-1105.
- [29] Lalita, G., Mandar, O., Dewoolkara, M., Olson, S.M., "Liquefaction assessment of cohesionless soils in the vicinity of large embankments", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 43, December 2012, pp. 33-44.
- [30] Asgari, A., Golshani, A.A., Bagheri, M., "Numerical evaluation of seismic response of shallow foundation on loose silt and silty sand", *J. Earth Syst. Sci.* 123, No. 2, March 2014, pp. 365-379.
- [۳۱] شریفی، ج.، اردکانی، ع.ر.، نیکودل، م.ر.، ارزیابی پتانسیل روانگرایی ساختمانگاه مجتمع مسکونی نگین شهر رشت، یازدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۵، ص. ۲۶۵۶-۲۶۶۳.
- [۳۲] شریفی، ج.، جمشیدزهی، ح.ا.، حمیدی راد، م.، تحلیل و ارزیابی عمق لایه اشباع بر رخداد پدیده روانگرایی، هفتمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، شاهرود، ۱۳۹۰.
- [33] FLAC, Fast Lagrangian Analysis of Continua, Itasca Consulting Group, Inc, Third Edition (FLAC Version 5.0) April 2005.
- [۳۴] درویش زاده، ع.، زمین شناسی ایران، انتشارات امیر کبیر، تهران، ص. ۸۲۳، ۱۳۷۸.
- [۳۵] مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰ ایران، ویرایش چهارم، ۱۳۹۲.
- Computers and Geotechnics, Volume 40, March 2012, pp. 74-88.
- [14] Khatibi, B.R., Hosseinzadeh, M., Moradi, G., "Liquefaction Potential Variations Influenced by Building Constructions", *Earth Science Research*; Vol. 1, No. 2, May 2012, pp. 23-29.
- [15] Shahira, H. Mohammadi-Haji, B., Ghassemi, A., "Employing a variable permeability model in numerical simulation of saturated sand behavior under earthquake loading", *Computers and Geotechnics*, Volume 55, January 2014, pp. 211-223
- [16] Adalier, K., Elgamal, A., "Mitigation of liquefaction and associated ground deformations by stone columns", *Engineering Geology*, Volume 72, Issues 3-4, April 2004, pp. 275-291.
- [17] Boulanger, R.W., Tokimatsu, K., "Proc., Workshop on simulation and seismic performance of pile foundations in liquefied and laterally spreading ground". *Geotechnical Special Publication No. 145*, ASCE, Reston, 2005.
- [18] Ghosh, B., Madabhushi, S.P.G., "Centrifuge modelling of seismic soil structure interaction effects", *Nuclear Engineering and Design*, Volume 237, Issue 8, April 2007, pp. 887-896.
- [19] Ghosh, B., Madabhushi, S.P.G., "Dynamic Soil Structure Interaction for Layered and Inhomogeneous Ground: A Comparative Study". *Proceedings of the the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, No.440, 2004, pp. 1-15.
- [20] El Shamy, U., Zeghal, M., Dobry, R., Thevanayagam, S., Elgamal, A., Abdoun, T., Medina, C., Bethapudi, R., Bennett, V. (2010). "Micromechanical Aspects of Liquefaction-Induced Lateral Spreading." *International Journal of Geomechanics*, Volume 10, Issue 5, October 2010, pp. 190-201.
- [21] Bouckovalas, G.D., Apadimitriou, A.G, Niarchos, D.G., Tsiapas, Y.Z., "Sand fabric evolution effects on drain design for liquefaction mitigation", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 31, Issue 10, October 2011, pp. 1426-1439.
- [22] Ansal, A., Tonuk, G., "Liquefaction Susceptibility and Microzonation" , *Proceeding of International Conference on Problematic Soils*, May 25-27 , Eastern Mediterranean University, Famagusta, N. Cyprus, 2005, pp. 935-948.
- [23] Okamura, M., Ishihara, M., Tamura, K., "Liquefied soil pressures on vertical walls with adjacent embankments", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 26, Issues 2-4, February-April 2006, pp. 265-274.
- [24] Zhou, Y.D., Cheuk, C.Y., Tham, L.G., "Numerical modelling of soil nails in loose fill slope under surcharge loading", *Computers and Geotechnics*, Volume 36, Issue 5, June 2009, pp. 837-850.