

## اندرکنش لرزه‌ای گودبرداری عمیق - فونداسیون مستقر بر گروه شمع در خاک سست

عبدالغفور خادم الرسول<sup>۱\*</sup>، نگار زنگنه نژاد<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی گروه عمران، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران، ag.khadem@scu.ac.ir  
 ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، موسسه جهاد دانشگاهی خوزستان، اهواز، ایران، negar.z\_2013@yahoo.com

## چکیده

گودبرداری، طراحی و اجرای سازه‌های نگهبان یکی از مسائل حساس مهندسی به شمار می‌رود. در این پژوهش اندرکنش دینامیکی گودبرداری عمیق و فونداسیون مستقر بر گروه شمع در خاک سست مورد بررسی قرار گرفت. گودبرداری در مجاورت ساختمانی با فونداسیون مستقر بر گروه شمع واقع بر خاک ضعیف ماسه و رس اشباع، طی چند مرحله و بدون سیستم‌های حفاظتی مدل‌سازی شد. همچنین اثرات لایه‌های سست و نرم برای خاک‌های ماسه و رس در پاسخ دینامیکی سیستم گود عمیق و گروه شمع بررسی گردید. با توجه به اهمیت اضافه فشار آب حفره‌ای، اثرات جریان آب حفره‌ای در خلال مراحل گودبرداری در نظر گرفته شد. در تحلیل دینامیکی از اعمال بارگذاری تاریخچه زمانی به صورت اعمال شتاب نگاشت زلزله استفاده شد. در بررسی اندرکنش گروه شمع و گود، رفتار سازه‌ای گروه شمع به لحاظ ظرفیت باربری و نیروهای داخلی سازه‌ای در خلال مراحل گودبرداری از بالا به پایین مورد بررسی قرار گرفت. از طرفی به منظور شناخت بهتر تأثیرات متقابل گود-شمع در خلال بارگذاری دینامیکی، نتایج در حوزه فرکانس ارائه شد. همچنین مسأله وقوع پدیده روانگرایی خاک در لایه‌های خاک ماسه‌ای اشباع بررسی گردید. در بررسی پدیده روانگرایی و تغییراتی که در رفتار خاک به وجود می‌آید، رفتار در حوزه فرکانس لایه روانگرا، قبل و بعد از وقوع روانگرایی نشان داده شد. به منظور تحلیل در حوزه فرکانس از تبدیلات فوریه استفاده شد. نتایج بدست آمده نشان دهنده تأثیرات متقابل معنادار برای گود عمیق و گروه شمع بود.

کلمات کلیدی: گودبرداری عمیق، اندرکنش گود-گروه شمع، فونداسیون شمعی، تحلیل در حوزه فرکانس، روانگرایی.

\*نویسنده مسئول: عبدالغفور خادم الرسول

پست الکترونیکی: ag.khadem@scu.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰

## ۱- مقدمه:

گودبرداری یکی از مسائل حساس مهندسی به شمار می‌رود که به منظور حفظ جان انسان‌های داخل و خارج از گود، ساختمان‌های مجاور و فراهم آوردن شرایط ایمن و مطمئن جهت انجام گودبرداری، باید دیواره‌های آن به وسیله سازه‌های نگهدارنده مهاربندی و پایدارسازی شود. روش‌های گودبرداری و پایدارسازی دارای گستره وسیعی است که نیاز به بررسی‌ها، مطالعات و ملاحظات ژئوتکنیکی، سازه‌ای، مواد و مصالح، تکنولوژیکی، اجرایی، اقتصادی و اجتماعی دارد. با توجه به رشد روزافزون مناطق شهری، به دلیل کمبود زمین و به منظور تامین فضاهای زیرزمینی، نیاز به انجام گودبرداری‌های عمیق در مجاورت سازه‌های همسایه و یا در مجاورت مسیرهای حمل و نقلی می‌باشد که به همین سبب وجود گودبرداری‌های عمیق در مجاورت سازه‌هایی با پی شمعی غیرقابل اجتناب است. اجرای این گودبرداری‌ها به سبب حرکات جانبی زمین باعث اثر ناسازگار بر سیستم فونداسیون شمع مجاور می‌شود و احتمال ایجاد خرابی به زیرساخت‌های مجاور را افزایش می‌دهد. به این دلیل بررسی دینامیکی و استاتیکی اثرات گود بر شمع اهمیت بسیار زیادی دارد.

در سال‌های اخیر به منظور بررسی اندرکنش گودبرداری- گروه شمع، مطالعات تجربی مختلفی بر پارامترهایی همچون قطر شمع، طول شمع، فاصله شمع از گودبرداری، نسبت طول شمع به عمق گودبرداری، سختی دیوار و سختی شمع انجام شده است. چن و پولوس (۱۹۹۷) با بررسی المان محدود و المان مرزی برای پاسخ شمع، ناشی از گودبرداری در خاک رس به این نتیجه رسیدند که پاسخ شمع با افزایش مقاومت برشی زهکش نشده، کاهش سختی سیستم حفاظتی گودبرداری و سختی ستون‌ها، افزایش می‌یابد [۱]. لیونگ و همکاران (۲۰۰۰) با بررسی تست‌های سانتریفیوژ بر یک گودبرداری عمیق در خاک ماسه‌ای مترکم غیراشباع و تاثیرش بر یک فونداسیون شمع تک در مجاور گود به این نتیجه رسیدند که حداکثر لنگر پیچشی و خمشی شمع با افزایش فاصله بین دیوار و شمع، کاهش می‌یابد [۲]. کوک (۲۰۰۹) به مطالعه‌ی کارهای صورت گرفته در خصوص چهار کاربرد گوناگون شمع‌های پیش رونده پرداخته است که شامل شمع‌های قرار گرفته در برابر جابه‌جایی افقی خاک، خاکریزهای مسلح با شمع، پایدارسازی شیروانی با شمع و محافظت گودبرداری با شمع عمیق می‌باشند. نتیجه این بررسی نشان داده است که در خصوص کاربرد شمع‌های منفعل<sup>۱</sup> در محافظت از گودبرداری باز، بیشترین مطالعات انجام شده شامل مشاهدات ایزریندی شده و تست‌های آزمایشگاهی مدل‌های کوچک می‌باشد و تحلیل‌های عددی کمتری در این خصوص برای پیش‌بینی رفتار گروه شمع و اندرکنش خاک و گروه شمع صورت گرفته است [۳].

ژانگ و همکاران (۲۰۱۱) با بررسی یک سری مدل‌های آزمایشگاهی به وسیله سانتریفیوژها و مدل‌سازی شمع یک سرگردار و سر دیگر درون خاک رس نرم به بررسی پاسخ تناوبی بارگذاری جانبی یک شمع صلب در رس نرم پرداختند. مشاهدات آزمایشگاهی نشان دادند که پس از یک دوره تناوب طولانی، سختی جانبی شمع به مقداری می‌رسد که این مقدار می‌تواند مستقل از شماره سیکل موجود باشد [۴].

الکادی (۲۰۱۳) با مطالعه آنالیز محدود توسط برنامه آباکوس و به منظور ارزیابی اثر عمق گودبرداری بر فاصله شمع از گود، سختی شمع و دیوار، به این نتیجه رسید که عمق و فاصله شمع از گودبرداری یک اثر قابل توجه بر تغییر شکل جانبی و لنگر خمشی شمع دارد [۵]. کاستالدو و دلیویس (۲۰۱۴) به ارزیابی ضربه‌ی گودبرداری عمیق بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان بتنی مجاور با استفاده از نرم‌افزار Sap و Plaxis و با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه پرداختند که نتیجه افزایش بیشتر از ۲۸٪ دوران پلاستیکی بعد از گودبرداری و تغییرات قابل توجه در اثرات آسیب‌پذیری لرزه‌ای را نشان داد [۶].

نیشانتان و لیانا پاتیرانا (۲۰۱۴) با بررسی اثر حرکات زمین ناشی از گودبرداری بر شمع منفرد و با استفاده از روش المان

<sup>۱</sup> Passive

محدود نشان دادند که تغییرشکل جانبی و لنگر خمشی شمع به طور قابل توجهی با عمق گودبرداری افزایش می‌یابد و با افزایش نسبت پیش‌تحکیمی، تغییرشکل جانبی شمع و لنگر خمشی حداکثر، کاهش پیدا می‌کند. همچنین زمانی که عضوهای فشاری<sup>۱</sup> نزدیک بهم نصب شده باشند حداکثر تغییرشکل جانبی بسیار پایین‌تر از عمق گودبرداری اتفاق می‌افتد و با افزایش فاصله‌ی عضوهای فشاری مکان حداکثر لنگر خمشی به سمت پایه گودبرداری حرکت می‌کند. سختی سرشمع تاثیر بسیاری بر گسترش لنگر خمشی در امتداد شمع دارد بطوریکه با افزایش سختی سرشمع گسترش لنگر خمشی منفی نزدیک کلاهک شمع بسیار زیاد است [۷].

یگانه و همکاران (۲۰۱۵) با مدل‌سازی اندرکنش خاک، سازه و گودبرداری با استفاده از نرم‌افزار Flac به بررسی اثر نوع ساختمان مجاور گودبرداری بر خصوصیات سازه‌ای شمع و همچنین اندرکنش خاک-سازه-شمع به روش تفاضل محدود پرداختند. نتایج کاهش برش پایه در مدل‌های اندرکنش سازه - خاک، بالا بودن نسبت حداکثر شتاب افقی کف ساختمان به زلزله پایه و بالا بودن میزان رانش طبقات در مدل پایه ثابت نسبت به مدل اندرکنش را نشان دادند. همچنین تاثیر نوع مدل‌سازی ساختمان مجاور گودبرداری بر تغییرشکل دائمی شمع و بالا بودن نسبت حداکثر شتاب افقی به عمودی زلزله در مدل‌های اندرکنش در مقایسه با پایه ثابت، مشاهده شد [۸]. دهاتراک و کولکارنی (۲۰۱۶) به بررسی اثر حرکات ناشی از گودبرداری در لنگرهای خمشی و پیچشی جانبی شمع نصب شده در نزدیک گودبرداری پرداختند، این پژوهش توسط نرم‌افزار Plaxis در ۲ لایه خاک ضعیف و قوی انجام شد، نتیجه نشان داد که پیچش شمع به خواص هر لایه خاک بستگی دارد و با افزایش ضخامت لایه خاک پیچش کاهش می‌یابد. همچنین نشان دادند که با افزایش فاصله‌ی شمع از گود، حداکثر لنگر پیچش و خمش کاهش می‌یابد [۹]. با وجود پژوهش‌های بسیار، کاستی‌هایی در خصوص بررسی اثرات محتوای فرکانسی و لرزه‌ای در اندرکنش گودبرداری بر گروه شمع مجاور وجود دارد. به این منظور و به جهت نوآوری در بررسی امکان‌پذیری پایداری گود، اثرات اندرکنش گود-گروه شمع و رفتار سازه‌ای شمع، گودبرداری را بدون سیستم حفاظتی و پس از اعمال بار زلزله در مجاورت گروه شمع، با در نظر داشتن خاک ضعیف و افت تراز آب زیرزمینی، انجام می‌دهیم. در این پژوهش ساختمانی با پی شمعی اصطکاکی واقع بر لایه‌های خاک ضعیف که در مجاورت گودبرداری قرار دارد، بوسیله نرم‌افزار GeoStudio و با استفاده از ماژول‌های مرتبط برای تعریف مراحل متفاوت مانند گودبرداری، توزیع تنش، افت تراز آب و اعمال بار زلزله مدل‌سازی می‌شود. پایداری گودبرداری با آنالیز پارامترهای موثر بر ظرفیت‌های سازه‌ای شمع مانند لنگر خمشی و نیروی محوری، مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین برای تحلیل دینامیکی، بار زلزله در آخرین تراز حفاری به مدل اعمال می‌گردد و پارامترهایی همچون محتوای فرکانسی، اثرات لرزه‌ای و روانگرایی مورد سنجش قرار می‌گیرند. این نکته حائز اهمیت است که دامنه فوریه در حوزه فرکانس، شاخص روانگرایی یا سنجش رفتار نیست اما می‌تواند یک نشانه اولیه برای تغییر در محتوای خاک باشد.

متن مقاله شامل این بخش‌ها خواهد بود: بخش اول معرفی مشخصات و خصوصیات مدل، معرفی دامنه فوریه در حوزه فرکانس و زلزله اعمال شده، در بخش دوم توضیح مختصر مدل‌سازی و در نهایت بخش سوم نتایج مورد بررسی از آنالیز استاتیکی و دینامیکی مدل توضیح داده شده است.

## ۲ - معرفی پارامترهای مدل‌سازی:

### ۲-۱ معرفی مشخصات لایه‌های خاک :

به طور کلی در حفاری عمیق مشخصات خاک شامل تعدادی از لایه‌های خاک است که دارای ویژگی‌های مختلف ژئوتکنیک هستند. مشخصات خاک، پس از مطالعات پژوهش‌های متفاوت در این زمینه، در ۶ لایه شامل سیلت رس و ماسه و به صورت جدول ۱ در نظر گرفته شده است [۱۵-۱۰].

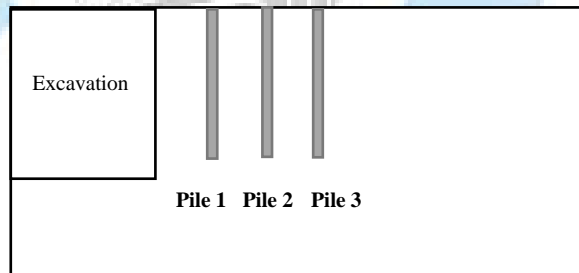
<sup>۱</sup> Strut

جدول ۱: خصوصیات لایه‌های خاک

| لایه‌های خاک              | عمق لایه‌ها (m) | وزن مخصوص ( $kN/m^3$ ) | زاویه اصطکاک ( $f$ ) | ضریب چسبندگی (kPa) |
|---------------------------|-----------------|------------------------|----------------------|--------------------|
| ماسه                      | ۳/۵             | ۱۸                     | ۰                    | ۸۰                 |
| رس دریایی لایه بالا       | ۱۰              | ۱۷                     | ۳۵                   | ۵                  |
| رس دریایی لایه پایین      | ۴               | ۱۷                     | ۳۶/۲                 | ۵                  |
| ماسه سیلتی با تراکم متوسط | ۵               | ۲۰                     | ۳۵                   | ۰                  |
| ماسه سیلتی متراکم         | ۴               | ۲۰                     | ۳۵                   | ۰                  |
| سیلت رسی با تراکم زیاد    | ۱۳/۵            | ۲۰                     | ۴۰                   | ۰                  |

## ۲-۲ معرفی مشخصات و محاسبات مربوط به سازه‌های شمعی:

جهت بررسی رفتار شمع، در این پژوهش سه عدد شمع در مجاورت گودبرداری قرار داده شد به گونه‌ای که هر ستون شمع به صورت کوبشی با قطر ۱ m، دورپیچی به فاصله ۶ mm از لبه بیرونی و با ۱۰ عدد میلگرد با قطر ۳۲ mm طرح شده است، همچنین شمع‌ها به فاصله ۶ m از یکدیگر، ۱/۵ m از بر فونداسیون و به طول ۱۷/۵ m مدل شدند. بتن مصرفی شمع‌ها نیز با  $f_c=35(N/mm^2)$  و  $f_y=420(N/mm^2)$  در نظر گرفته شده است که در نهایت برای شمعی با مشخصات مدنظر در این پژوهش، ظرفیت نیروی محوری  $3570\text{ kN}$  و لنگر خمشی  $1890\text{ kN-m}$  محاسبه شد. همچنین نام‌گذاری شمع‌ها برای بیان نتایج آنالیز به صورت شکل ۱ است.



شکل ۱: نام‌گذاری شمع‌های مدل شده در نمونه.

## ۲-۳ مشخصات زلزله اعمال شده:

با توجه به پهنه‌ی لرزه‌خیزی در ایران، تحلیل دینامیکی بیشتر از محاسبات استاتیکی اهمیت پیدا می‌کند. تحلیل دینامیکی در واقع انجام تحلیل‌های عددی بر روی مدل می‌باشد که در طی آن، به واسطه در نظر گرفتن رفتار تنش-کرنش مصالح، به بررسی رفتار مدل در زمان اعمال بارهای تناوبی لرزه‌ها و نیز تحلیل و بررسی رخدادهای احتمالی پس از وقوع زلزله، پرداخته می‌شود. در انجام تحلیل دینامیکی به روش معادل خطی به طور کلی پارامترهایی از جمله میرایی اولیه، مدول برشی اولیه و منحنی رفتار مصالح مورد نیاز است. در این پژوهش مقادیر فرض شده از شاخص خمیری لایه‌های خاک، برای تخمین میزان میرایی و حداکثر کرنش برشی با مطالعه پژوهش‌های متفاوت طبق جدول ۲ در نظر گرفته شد [۱۱-۱۴-۱۵]. برای تحلیل دینامیکی در این مدل زلزله‌ای با شتاب  $0.2g$  مطابق شکل ۲ به صورت

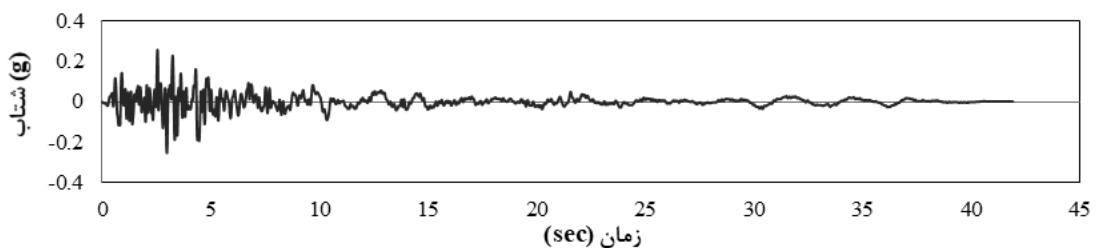
افقی به مدل اعمال شد که مشخصات آن در جدول ۳ نشان داده شده است:

جدول ۲: حد پلاستیک لایه‌های خاک

| لایه‌های خاک              | شاخص خمیری % |
|---------------------------|--------------|
| ماسه                      | ۸            |
| رس دریایی لایه بالا       | ۲۰           |
| رس دریایی لایه پایین      | ۲۵           |
| ماسه سیلتی با تراکم متوسط | ۶            |
| ماسه سیلتی متراکم         | ۵            |
| سیلت رس با تراکم بالا     | ۳۰           |

جدول ۳: مشخصات زمین لرزه [۱۶]

| فاصله (kN) | مدت زمان (sec) | سرعت (m/sec) | بزرگی (Richter) | سال وقوع | نام زمین لرزه |
|------------|----------------|--------------|-----------------|----------|---------------|
| ۰/۰۲       | ۹/۴            | ۱۷۸/۲۷       | ۶               | ۲۰۰۴     | پارکفیلد-۰۲   |



شکل ۲: نمودار شتاب-زمان ثبت شده زمین لرزه پارکفیلد توسط نرم افزار Seismosignal.

#### ۴-۲ معرفی دامنه فوریه در حوزه فرکانس:

به طور کلی امواج زلزله متشکل از مجموعه‌ای از موج‌های ساده‌تر با فرکانس‌ها و دامنه‌های متفاوت می‌باشد. محتوای فرکانسی یک زلزله در واقع نشان دهنده این است که دامنه این امواج، چگونه در فرکانس‌های مختلف گسترش یافته‌اند. تبدیل فوریه سریع (FFT) پردازشگری سیگنالی و مفهومی آنالیزی است. بسیاری از مسائل مهم محاسباتی توسط روش‌های تبدیل فوریه، بخصوص (FFT) قابل حل می‌باشند. در مسائل اندرکنش، آنالیز لرزه‌ای معمولاً بر اساس دامنه فرکانس انجام می‌شود، به این دلیل که آنالیز دامنه فرکانس در مواجهه با مسئله انتشار موج در یک خاک نیمه متناهی موثرتر است [۱۷].

فیزیکدان فرانسوی به نام فوریه نشان داد که هر تابعی را می‌توان به صورت مجموعه‌ای از توابع سینوسی با دامنه‌ها، فرکانس‌ها و فازهای مختلف بیان کرد. با توجه به طبیعت پیچیده امواج زلزله، می‌توان این امواج را به صورت مجموع بارهای تناوبی نوشت. در صورتی که تابع شتاب زلزله به صورت  $a_g(t)$  نمایش داده شود تابع تبدیل فوریه را به صورت زیر می‌توان بیان کرد:

$$F(w) = \int_0^{T_0} a_g(t) e^{-iwt} dt \quad (1)$$

که در آن  $F(w)$  تابع تبدیل فوریه،  $w$  فرکانس دورانی،  $T_0$  مدت زلزله و  $i = \sqrt{-1}$  است. بدین ترتیب می توان شتاب را از تبدیل عکس فوریه بدست آورد:

$$a_g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(w)e^{iwt} dw \quad (2)$$

پس رابطه (۱) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$f(w) = \int_0^{T_0} a_g(t) \cos wtdt - i \int_0^{T_0} a_g(t) \sin wtdt = c(w) - is(w) \quad (3)$$

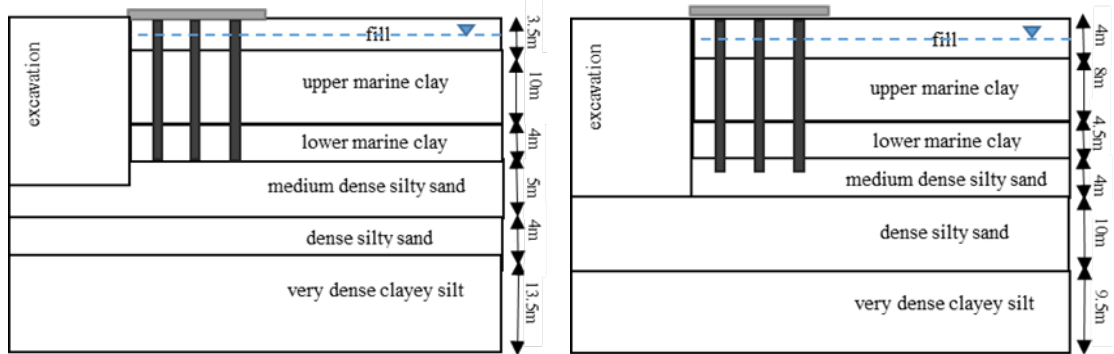
بنابراین  $F(w)$  یک تابع مختلط است که می تواند با دامنه ها و زاویه های فاز آن بیان شود. دامنه این تابع به نام طیف دامنه فوریه ( $FAS(w)$ ) و فاز آن، طیف فاز فوریه ( $\phi(w)$ ) نامیده می شود.

$$FAS(w) = \sqrt{c^2(w) + s^2(w)} \quad (4)$$

$$\phi(w) = -\tan^{-1} \left[ \frac{s(w)}{c(w)} \right] \quad (5)$$

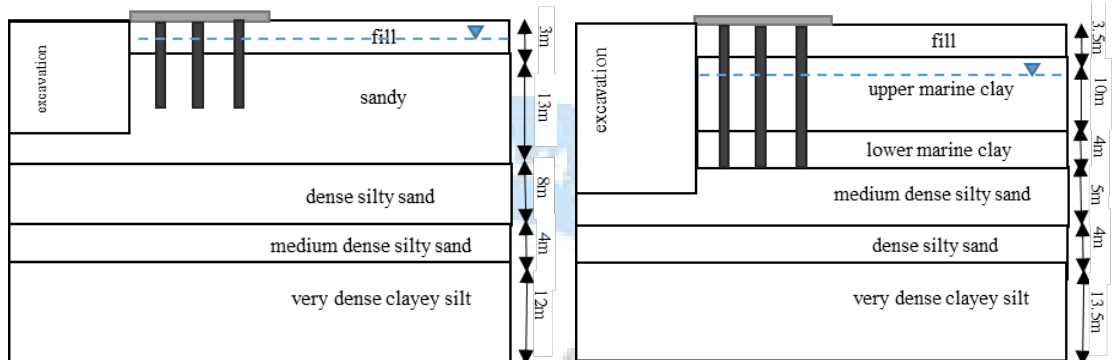
### ۳- مدل سازی :

در این پژوهش، مدل سازی توسط نرم افزار Geostudio که یک نرم افزار ژئوتکنیکی مبتنی بر روش المان های محدود می باشد و کاربرد فراوانی در مهندسی ژئوتکنیک دارد انجام می شود. در ابتدا، ساختمانی ۵ طبقه مستقر بر فونداسیون شمعی با ابعاد  $30 \times 15$  متر و باری معادل  $20 \text{ (kPa)}$  بر روی لایه های خاک ضعیف در نظر گرفته شده است، سپس گودبرداری مرحله ای، به عمق  $20/5$  متر با توجه به زمان اجرای هر مرحله، مدل سازی شده است. همچنین به سبب وجود آب زیرزمینی پس از هر مرحله گودبرداری، از طریق بخش Seep آنالیز نشت انجام گرفته و تغییرات فشار آب حفره ای تعیین گردیده است. به دلیل تقارن، در شبیه سازی عددی از مدل سازی تمامی مدل اجتناب گردیده است تا به این ترتیب از حجم محاسبات کاسته شود. همچنین به منظور حساسیت صحت سنجی، چهار مدل با تغییر در پارامترهای تاثیرگذار خاک مدل سازی شده است. مشخصات و ابعاد مدل ها در شکل ۳ نشان داده شده است.



الف - لایه بندی خاک در مدل شماره ۱

ب - مدل شماره ۲ با تغییر در تراز لایه های خاک



ت - مدل شماره ۴ با تغییر در خواص لایه های خاک

پ - مدل شماره ۳ با تغییر در تراز آب زیرزمینی

شکل ۳: مشخصات مدل فرض شده و لایه های خاک.

#### ۴- نتایج آنالیز عددی:

پایداری گودبرداری با آنالیز پارامترهای موثر بر ظرفیت های سازه ای شمع مانند لنگر خمشی و نیروی محوری، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین پس از آنالیز دینامیکی پارامترهایی همچون محتوای فرکانسی، اثرات لرزه ای و روانگرایی مورد سنجش قرار گرفت. این نکته حائز اهمیت است که دامنه فوریه در حوزه فرکانس، شاخص روانگرایی یا سنجش رفتار نیست اما می تواند یک نشانه اولیه برای تغییر در محتوای خاک باشد. برای بیان نتایج تجزیه و تحلیل، نسبت عمق گودبرداری به طول شمع ( $h/L$ ) و شماره مربوط به هر شمع مطابق شکل ۱ استفاده شده است.

##### ۴-۱- تاثیر گودبرداری بر نیروی محوری و لنگر خمشی شمع ها:

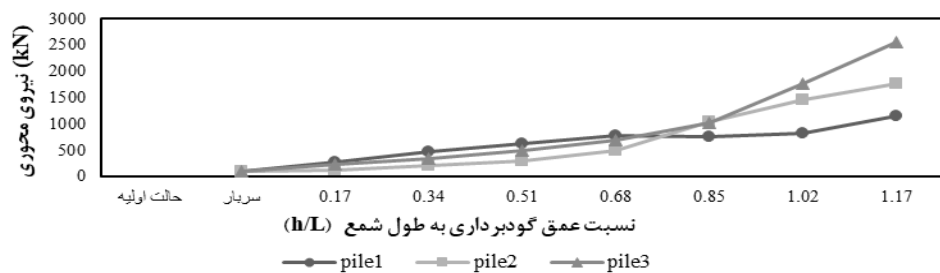
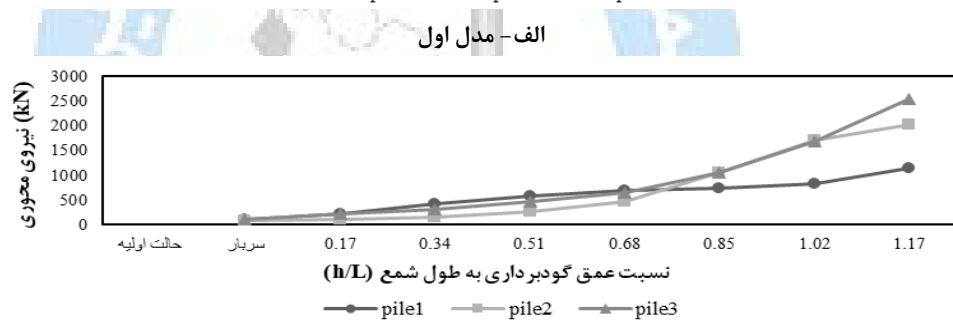
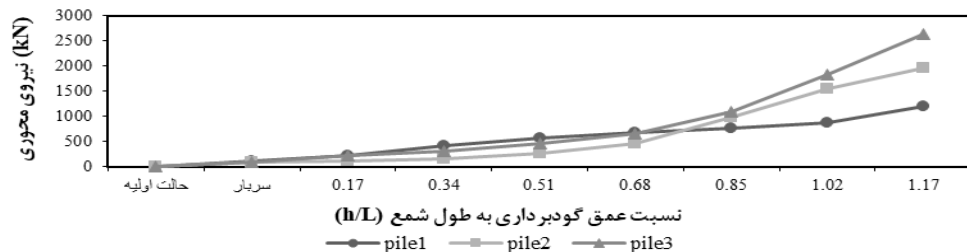
جهت بررسی تغییرات نیروی محوری سازه ای شمع، با نسبت های مختلف عمق گودبرداری به طول شمع مطابق نمودار شکل ۴-الف، مشاهده می شود که در مدل اول از ابتدای گودبرداری تا نسبت  $h/L=0/85$  بار محوری با شیب کم در هر ۳ شمع در حال افزایش است و بیشترین میزان بار محوری با اختلاف جزئی توسط شمع شماره ۱ و ۳ تحمل می شود. با عبور از نسبت  $h/L=0/85$  شمع شماره ۱ و ۳ به ترتیب کمترین و بیشترین بار محوری را تحمل می کنند در حالیکه بار محوری در شمع های شماره ۲ و ۳ به صورت ناگهانی و با شیب زیاد افزایش می یابد. بدین ترتیب مشاهده می شود که در نسبت  $h/L=1/17$  بر شمع شماره ۳ باری معادل  $2640/92$  kN وارد شد که همچنان کمتر از ظرفیت مجاز نیروی محوری شمع مورد نظر مطابق بخش ۲-۲ می باشد.

در مدل های دوم و سوم روند تغییرات نیروی محوری در طول مراحل گودبرداری، با توجه به نمودارهای ۴-ب و ۴-پ

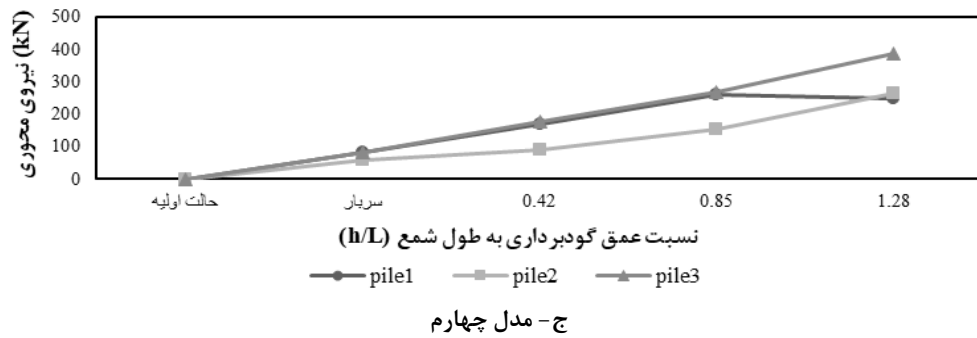
مشابه مدل اول بدست آمد و در نهایت نیروی محوری شمع شماره ۳ که بحرانی‌ترین شمع از لحاظ میزان نیروی محوری ایجاد شده است، در تراز آخر گودبرداری به ترتیب برای مدل‌های دوم و سوم به ۲۵۴۳/۹۴۱۱ kN و ۲۵۵۹/۷۳۶۷ رسید.

در حالیکه با توجه به نمودار ۴-ج در مدل چهارم به دلیل تغییرات خواص خاک تا نسبت  $h/L=0/85$  نیروی محوری شمع شماره ۱ و ۳ به یک میزان در حال افزایش و با اختلاف قابل توجهی بیشتر از شمع شماره ۲ بودند. پس از نسبت  $h/L=0/85$  نیروی محوری شمع شماره ۱ شروع به کاهش کرد اما شمع شماره ۳ همچنان روند افزایشی داشت که در نهایت در بالاترین نسبت  $h/L$  به مقدار ۳۸۸/۲۴۳ kN رسید. قابل ذکر است که در این مدل مقدار نیروهای ایجاد شده در شمع‌ها بسیار کمتر از سه مدل دیگر بود.

در انتها مشاهده شد در هر چهار مدل نیروی محوری ایجاد شده در شمع‌ها به سبب گودبرداری، کمتر از ظرفیت محاسبه شده در بخش ۲-۲ است.



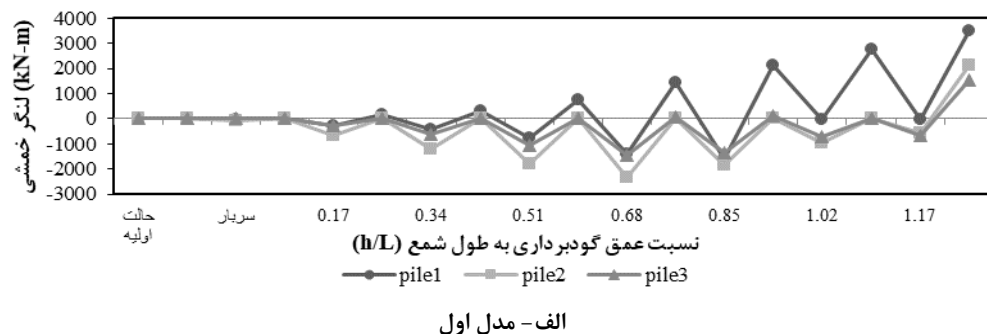


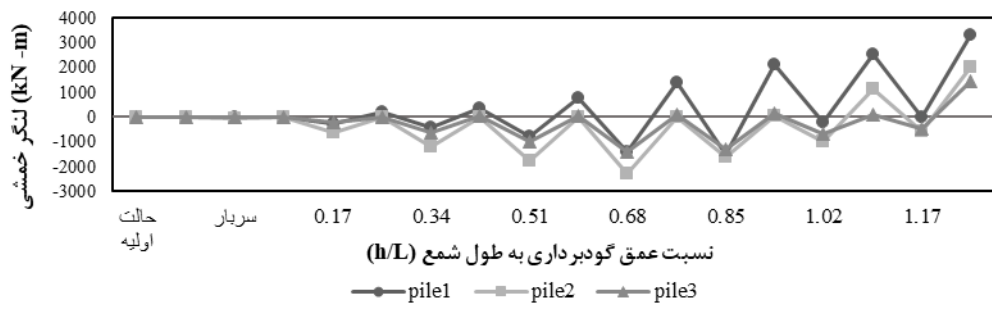


شکل ۴: بیشینه نیروی محوری شمع‌ها به نسبت تغییرات عمق گودبرداری به طول شمع در چهار مدل مختلف.

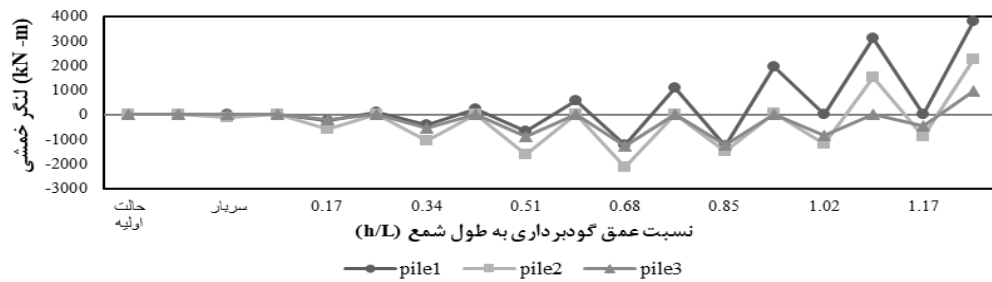
همانطور که در شکل ۵ الف نشان داده شده است در هر تراز گودبرداری برای مدل اول، هر سه شمع روند مشابهی در جهت تغییرات لنگرهای خمشی (مثبت و منفی) داشتند. مشاهده می‌شود که لنگر مثبت ایجاد شده در شمع شماره ۱ و لنگر منفی ایجاد شده در شمع شماره ۲ با اختلاف جزئی از شمع شماره ۳، متحمل بیشترین لنگر خمشی شدند. از طرفی پس از نسبت  $h/L=0/85$  لنگر خمشی ایجاد شده در شمع شماره ۱ به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت و در نهایت در تراز آخر گودبرداری به حداکثر مقدار خود معادل  $3487/82 \text{ kN-m}$  رسید. بدین ترتیب با توجه به ظرفیت مجاز لنگر خمشی محاسبه شده در بخش ۲-۲ مشاهده می‌شود که تنش ناشی از خمش در شمع شماره ۱ تا  $h/L=0/68$  ، شمع شماره ۲ تا  $h/L=0/51$  و شمع شماره ۳ تا انتهای گودبرداری از تنش مجاز خمشی این شمع‌ها کمتر می‌باشد. در مدل‌های دوم و سوم به ترتیب با تغییر در تراز لایه‌های خاک و سطح آب زیرزمینی، روند افزایشی در لنگر خمشی شمع‌ها مشابه مدل اول قابل مشاهده است و تنها تفاوت در افزایش اختلاف بین شمع شماره ۲ و ۳ در نسبت‌های پس از  $h/L=0/85$  بود. همچنین ترازهای مجاز گودبرداری از نظر ظرفیت لنگر خمشی در شمع‌ها مشابه مدل اول بود (شکل ۵ ب و پ).

در حالیکه نمودارهای شکل ۵ ج نشان می‌دهند که در مدل چهارم با تغییر خواص لایه‌های خاک، تنها ظرفیت لنگر خمشی شمع شماره ۲ در آخرین تراز گودبرداری از ظرفیت مجاز لنگر خمشی عبور کرد اما روندی مشابه در تغییرات لنگرهای خمشی شمع‌ها، در طول گودبرداری اتفاق افتاد. همچنین افزایش قابل توجه لنگرهای خمشی مشابه مدل‌های قبلی از نسبت  $h/L=0/85$  مشاهده شد.

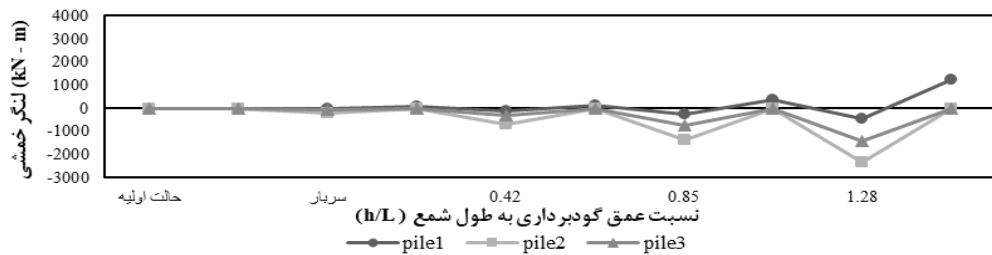




ب- مدل دوم



ب-مدل سوم

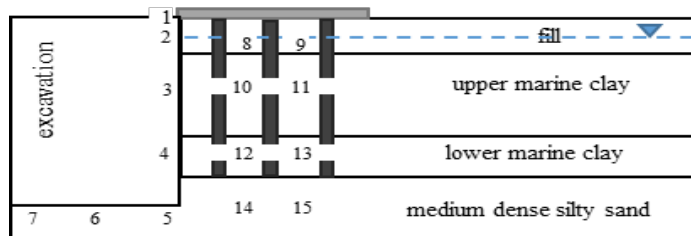


ج-مدل چهارم

شکل ۵: بیشینه لنگر خمشی شمع‌ها به نسبت تغییرات عمق گودبرداری به طول شمع در چهار مدل مختلف.

#### ۲-۴ بررسی اثر گودبرداری بر رفتار در حوزه فرکانس در راستای xy

به جهت بررسی تاثیر گودبرداری بر محتوای فرکانسی ذرات خاک پس از زلزله، تفاوت حداکثر دامنه فوریه‌ی نقاط مشخص شده در اطراف دیوار گودبرداری و بین شمع‌ها در دو حالت قبل و بعد از اجرای گودبرداری، برای هر ۴ مدل بررسی شد. برای مدل اول ۱۵ نقطه مطابق شکل ۶ انتخاب کردیم.

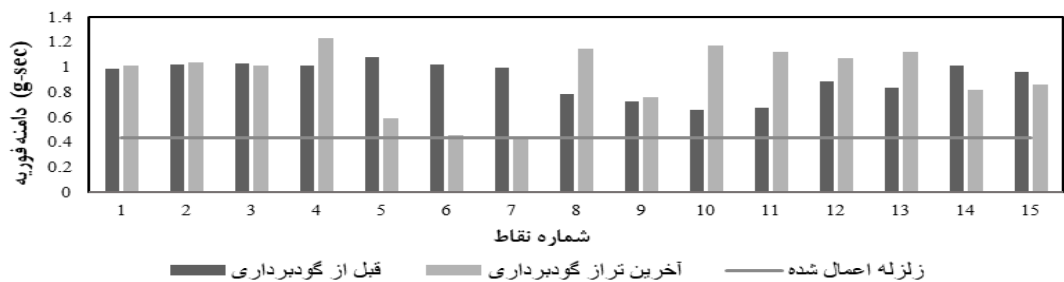


شکل ۶: شماره‌گذاری نقاط انتخاب شده در مدل اول و سوم.

همانگونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، قبل از آغاز گودبرداری بیشینه دامنه فوریه نقاط واقع در بین شمع‌ها نسبت به دیگر نقاط موجود در همان لایه به سبب وجود سازه‌ی شمع کمتر است. در دامنه فوریه نقاط واقع بر دیواره گود به

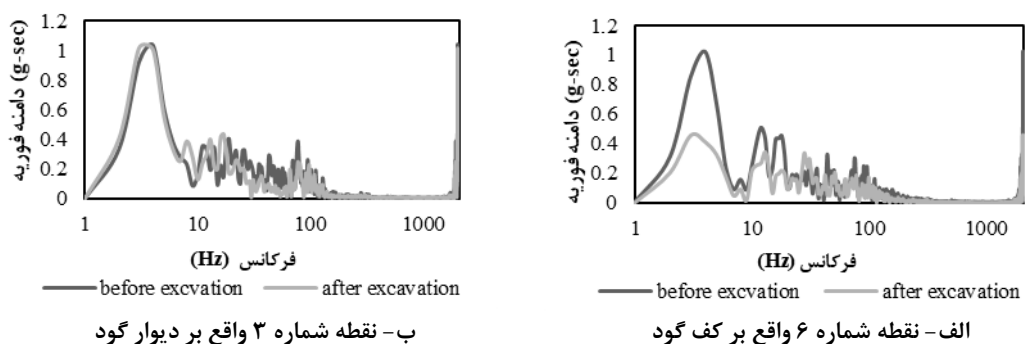
جز نقطه شماره ۴ که افزایش قابل توجهی داشت، مقدار جزئی افزایش پس از گودبرداری را شاهد بودیم در حالیکه در نقاط واقع بر کف گود کاهش دامنه فوریه اتفاق افتاد.

به طور کلی پس از گودبرداری در نقاط واقع در لایه چهارم با خاک ماسه‌ای شاهد کاهش دامنه فوریه بودیم با این تفاوت که در نقاط شماره ۵ و ۶ و ۷ به دلیل مجاورت با گودبرداری کاهش دامنه فوریه با شیب بیشتری اتفاق می‌افتد، اما در لایه سوم با خاک رس شاهد افزایش دامنه فوریه می‌باشیم که در این لایه نیز مانند لایه چهارم در نقاط مجاور گودبرداری این افزایش با سرعت بیشتری مشاهده می‌شود. در نتیجه دامنه فوریه با میزان سختی خاک نسبت عکس دارد و به نسبت ضعیف بودن خاک، روند افزایشی دامنه فوریه بیشتر است.



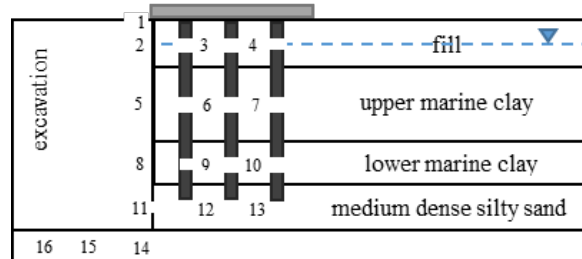
شکل ۷: بیشینه دامنه فوریه نقاط مشخص شده و زلزله اعمالی (مدل اول).

به دلیل بررسی دقیق‌تر و صحت تحلیل نتایج، نقاط شماره ۶ و ۳ را به طور تصادفی انتخاب و مطابق شکل ۸ تغییرات دامنه فوریه در حوزه فرکانس‌شان نمایش داده شد. فرکانس غالب دامنه‌ی فوریه در محدوده کوچکتر از ۱۰ Hz به صورت محسوس قابل مشاهده است اما در فرکانس‌های بالاتر از ۱۰ Hz با نوسان‌های پی‌درپی، اختلاف مقادیر دامنه فوریه در تمام حوزه فرکانس کاهش می‌یابد تا به کمترین مقدار خود برسند. بر اساس شکل ۸\_ب در نقطه شماره ۳ بیشینه دامنه فوریه قبل و پس از گودبرداری به مقداری یکسان و در فرکانسی مشابه رخ می‌دهد، همچنین در نقطه شماره ۶ (شکل ۸\_الف) نیز بیشینه دامنه فوریه قبل و پس از گودبرداری را در فرکانسی مشابه شاهد هستیم با این تفاوت که بیشینه دامنه فوریه قبل از گودبرداری دارای مقدار بیشتری است. مطابق شکل ۸\_ب مشاهده می‌شود که تا فرکانس ۲۶ Hz دامنه فوریه پس از گودبرداری در مقایسه با قبل از گودبرداری دارای مقدار بیشتری می‌باشد در حالیکه در فرکانس‌های بالاتر عکس این اتفاق رخ می‌دهد. همچنین در نمودار ۸\_الف مربوط به نقطه واقع در کف گود از فرکانس ۱ Hz تا انتها، دامنه فوریه پس از گودبرداری دارای مقدار کمتری است.



شکل ۸: نمایش تغییرات دامنه فوریه در حوزه فرکانس (مدل اول).

در مدل دوم با تغییر در تراز لایه‌های خاک ۱۶ نقطه مطابق شکل ۹ انتخاب گردید. بر اساس شکل ۱۰ نتایج نشان می‌دهند که در تمام نقاط شاهد کاهش دامنه فوریه پس از گودبرداری نسبت به قبل از گودبرداری هستیم، اما در نقاط ۶ و ۷ که واقع در خاک رس ضعیف می‌باشند عکس این اتفاق رخ می‌دهد. در مقایسه با مدل اول (شکل ۷) با افزایش ضخامت لایه‌های اول و سوم، کاهش دامنه فوریه را شاهد بودیم.

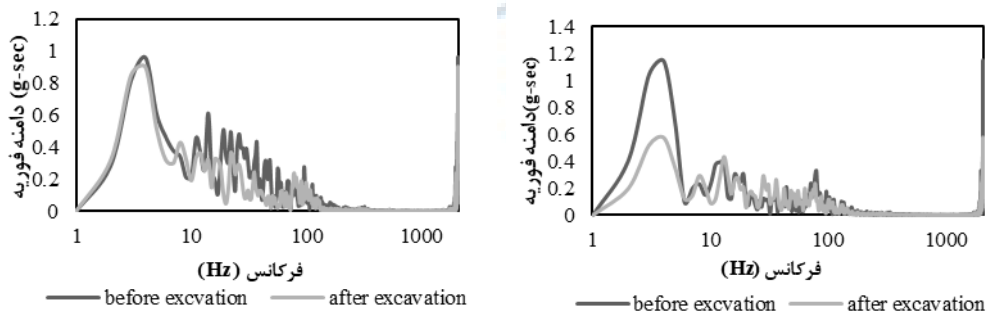


شکل ۹: شماره‌گذاری نقاط انتخاب شده در مدل دوم.



شکل ۱۰: بیشینه دامنه فوریه نقاط مشخص شده و زلزله اعمالی (مدل دوم).

بر اساس نمودارهای نشان داده شده در شکل ۱۱ مشاهده شد که در این مدل نیز روند تغییرات دامنه فوریه در حوزه فرکانس، برای نقاط واقع بر دیوار و کف گود، مشابه مدل اول اتفاق می‌افتد.



ب - نقطه شماره ۵ واقع بر دیوار گود

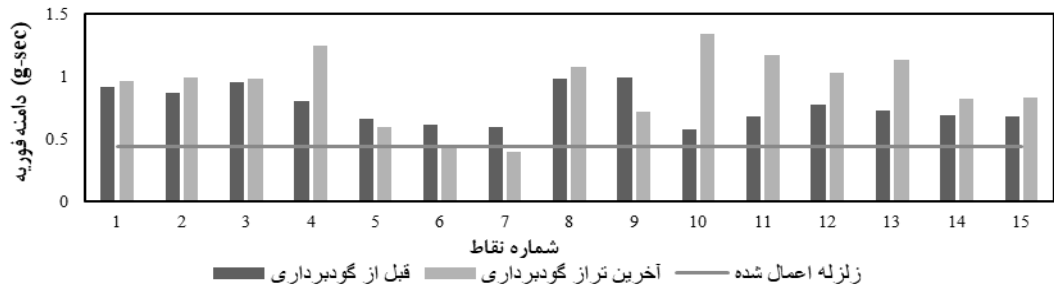
الف - نقطه شماره ۱۵ واقع بر کف گود

شکل ۱۱: نمایش تغییرات دامنه فوریه در حوزه فرکانس (مدل دوم).

در مدل سوم با تغییر تراز آب از عمق ۱/۵ به ۶ متری سطح زمین، ۱۵ نقطه مطابق شکل ۱۲ انتخاب گردید. در نتیجه مطابق شکل ۱۲ شاهد افزایش و کاهش حداکثر دامنه فوریه نقاط پس از گودبرداری نسبت به قبل از گودبرداری، به ترتیب در نقاط واقع بر دیوار و کف گود هستیم.

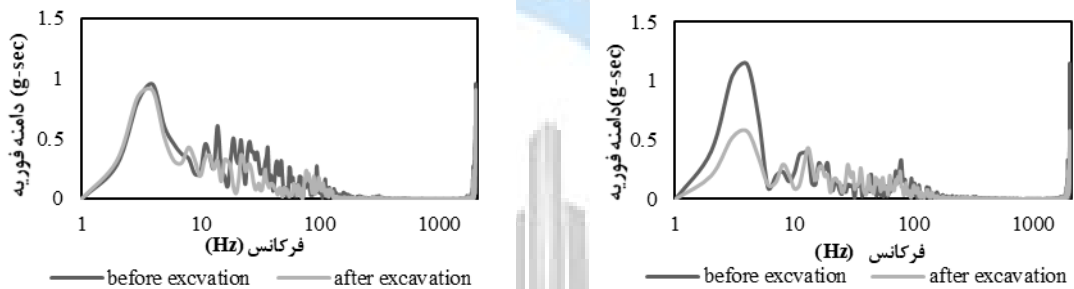
با مقایسه این مدل نسبت به مدل اول می‌بینیم که با افت تراز آب زیرزمینی در نقاط شماره ۸ و ۹ واقع در لایه اول،

بیشینه دامنه فوریه پس از گودبرداری کاهش یافت. همچنین در این مدل نیز مشاهده می‌شود که دامنه فوریه با سختی خاک نسبت عکس دارد و به نسبت ضعیف بودن خاک، روند افزایشی بیشتر است.



شکل ۱۲: بیشینه دامنه فوریه نقاط مشخص شده و زلزله اعمالی (مدل سوم).

روند تغییرات دامنه فوریه در حوزه فرکانس در شکل ۱۳ با وجود تغییر در تراز آب زیرزمینی، مشابه مدل اول اتفاق می‌افتد. همچنین بیشینه دامنه فوریه نمودارها در فرکانس ۱ Hz تا ۱۰ و به صورت کاهشی پس از گودبرداری نشان داده می‌شود.

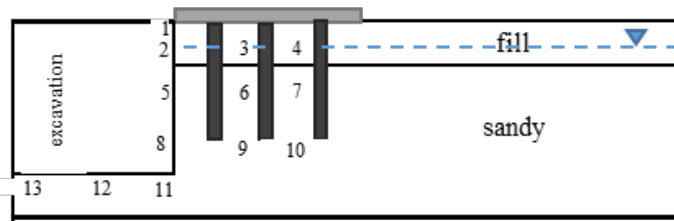


ب - نقطه شماره ۵ واقع بر دیوار گود

الف - نقطه شماره ۱۵ واقع بر کف گود

شکل ۱۳: نمایش تغییرات دامنه فوریه در حوزه فرکانس (مدل سوم).

در نهایت در مدل چهارم با تغییر خواص لایه‌های خاک، ۱۳ نقطه طبق شکل ۱۴ انتخاب گردید و مطابق نمودار ۱۵ مشاهده شد که در نقاط واقع بر دیوار و کف گود کاهش قابل ملاحظه‌ای دامنه فوریه پس از گودبرداری، به طور تقریبی محدود به دامنه زلزله اصلی اتفاق افتاد. از طرفی در نقاط نزدیک به گودبرداری و واقع بین شمع‌ها (نقاط شماره ۳ و ۶ و ۹) افزایش دامنه فوریه را شاهد بودیم. لازم به ذکر است بیشینه دامنه فوریه نقاط شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ واقع در لایه اول، قبل و پس از گودبرداری تقریباً محدود به دامنه فوریه زلزله اصلی بودند.

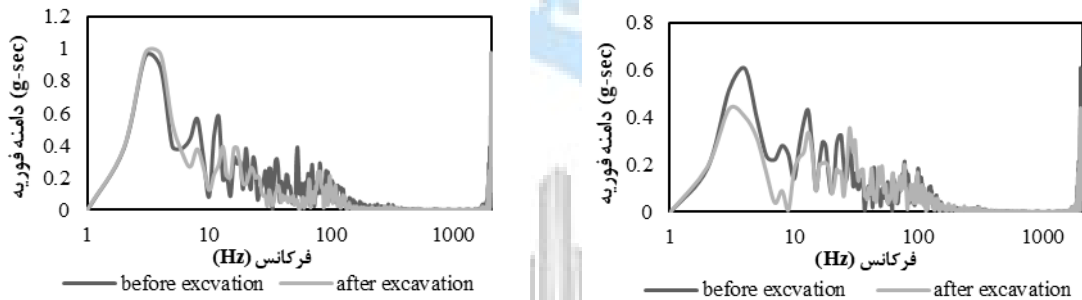


شکل ۱۴: شماره‌گذاری نقاط انتخاب شده در مدل چهارم.



شکل ۱۵: بیشینه دامنه فوریه نقاط مشخص شده و زلزله اعمالی (مدل چهارم).

در شکل ۱۶ مشاهده شد که روند تغییرات دامنه فوریه در حوزه فرکانس همچنان مشابه مدل اول اتفاق افتاد با این تفاوت که در نقطه شماره ۳ واقع بر دیوار گود، بیشینه دامنه فوریه پس از گودبرداری در تمام حوزه فرکانس به جز فرکانس نقطه بیشینه (۶ Hz) کاهش می‌یابد. در حالیکه تنها تفاوت در نقطه واقع بر کف گود (۱۶-الف)، اختلاف بیشینه دامنه فوریه قبل و پس از گودبرداری نسبت به مدل اول است.



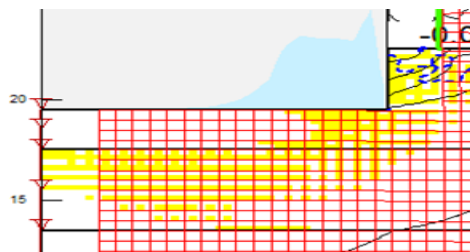
ب - نقطه شماره ۳ واقع بر دیوار گود

الف - نقطه ۶ شماره واقع بر کف گود

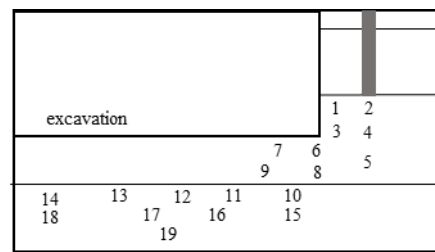
شکل ۱۶: نمایش تغییرات دامنه فوریه در حوزه فرکانس (مدل چهارم).

### ۶-۷ بررسی وقوع پدیده روانگرایی:

به منظور بررسی اثر گودبرداری بر وقوع روانگرایی ۱۹ نقطه در لایه سوم با خاک ماسه سیلتی روانگرا شده، مطابق شکل ۱۷ انتخاب و پس از انجام آنالیز دینامیکی، مطابق شکل ۱۸ نمودارهای حداکثر دامنه فوریه قبل و پس از گودبرداری ترسیم شده است.



الف) ناحیه روانگرا شده در لایه خاک



ب) شماره نقاط انتخاب شده

شکل ۱۷: نمایش ناحیه روانگرا شده پس از آنالیز دینامیکی (مدل اول).

مطابق شکل ۱۸ با اعمال زلزله قبل از گودبرداری حداکثر دامنه فوریه نقاط حدود ۱ تا ۱/۲ g-sec و در فرکانس ۱ Hz تا

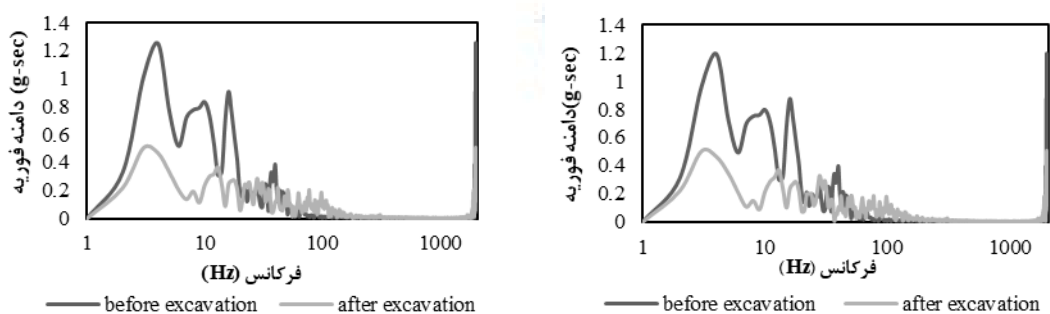
۱۰ رخ داد اما پس از ایجاد گودبرداری و اعمال زلزله این مقدار حدود ۱ تا ۲/۸ برابر کاهش یافت و به استثناء نقاط ۱ و ۲ که در مجاور دیوار گودبرداری و نزدیک به لایه رس ضعیف بودند، به ۰/۴ g-sec تا ۰/۷ رسید که باعث ایجاد روانگرایی شد. با مقایسه حداکثر دامنه فوریه نقاطی که در لایه چهارم و نزدیک ناحیه روانگرا شده قرار داشتند با نقاط واقع در این محدوده ( شکل ۷ ) مشخص شد که حداکثر دامنه فوریه نقاط روانگرا شده بین ۰/۴ تا ۰/۷ g-sec بود. بنابراین مرز حداکثر دامنه فوریه برای آغاز روانگرایی در لایه ماسه از ۰/۵ g-sec و در لایه پنجم که خاک متراکم و سخت تر وجود داشت از ۰/۴ g-sec محاسبه شد. در واقع نقاطی از ماسه که بیشینه دامنه فوریه آن‌ها در محدوده دامنه فوریه زلزله اصلی بود روانگرا شدند.

هرچه مقاومت اولیه خاک بیشتر در نظر گرفته شود وقوع روانگرایی در دامنه فوریه کمتری نسبت به حداکثر دامنه فوریه زلزله آغاز می‌شود. و همچنین نقاطی که حداکثر دامنه فوریه‌شان نزدیک به دامنه فوریه زلزله باشد روانگرا می‌شوند.



شکل ۱۸: بیشینه دامنه فوریه نقاط واقع در ناحیه روانگرا شده و زلزله اعمالی (مدل اول).

برای بررسی روند تغییرات دامنه فوریه در ناحیه روانگرا شده، ۲ نقطه در لایه چهارم و پنجم طبق شکل ۱۹ انتخاب شدند. مشاهده می‌شود که قبل و پس از گودبرداری گستره و روند نمودارها در نقاط مختلف از دو لایه، دقیقاً مشابه و در فرکانس‌های یکسان رخ داد. تنها در مقدار بیشینه دامنه فوریه‌ها، تفاوت بسیار جزئی وجود داشت.



ب - نقطه شماره ۱۶ واقع در لایه پنجم

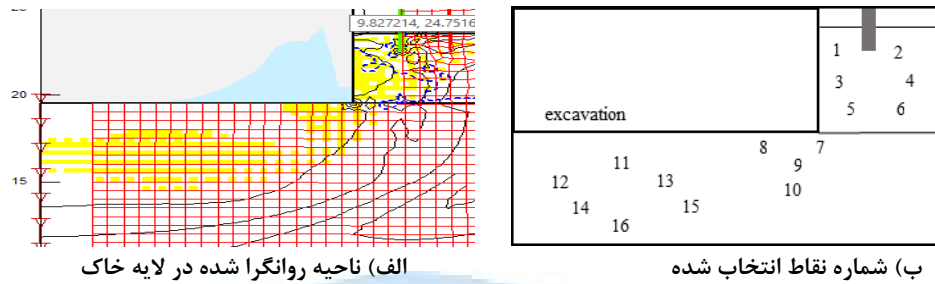
الف - نقطه شماره ۹ واقع در لایه چهارم

شکل ۱۹: نمایش تغییرات دامنه فوریه در حوزه فرکانس، ناحیه روانگرا شده (مدل اول).

در دومین مدل با تغییر تراز لایه‌های خاک طبق شکل ۲۰ شاهد محدود بودن حداکثر دامنه فوریه نقاط، قبل از گودبرداری به ۱/۲ تا ۱ g-sec و در فرکانس ۱ تا ۱۰ Hz بودیم. پس از گودبرداری و روانگرا شدن خاک مقدار بیشینه دامنه فوریه در نقاط لایه پنجم به حدود ۰/۴ تا ۰/۷ رسید. همچنین به استثناء نقاط ۱ و ۲ که در نزدیکی لایه رس

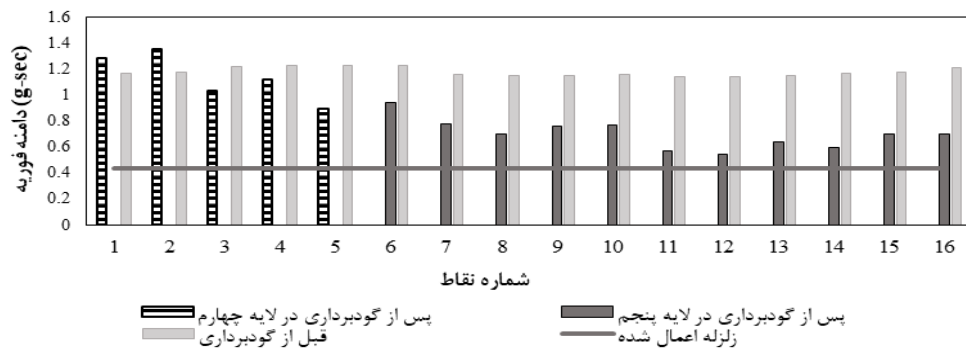
ضعیف قرار داشتند، نقاط واقع در لایه چهارم نیز به  $0.8/g$  تا  $1$  رسیدند.

بنابراین مرز حداکثر دامنه فوریه برای آغاز روانگرایی در لایه چهارم که ضخامتش نسبت به مدل اول بیشتر شده،  $g-sec$   $0.8$  و در لایه پنجم که خاک متراکم و سخت تر وجود داشت مرز دامنه فوریه نقاط برای شروع روانگرایی  $g-sec$   $0.4$  محاسبه شد.



الف) ناحیه روانگرا شده در لایه خاک  
ب) شماره نقاط انتخاب شده

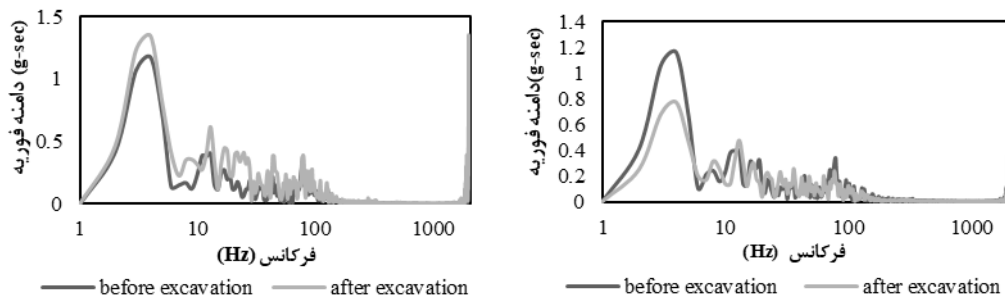
شکل ۲۰: نمایش ناحیه روانگرا شده پس از آنالیز دینامیکی (مدل دوم).



پس از گودبرداری در لایه پنجم  
پس از گودبرداری در لایه چهارم  
زلزله اعمال شده  
قبل از گودبرداری

شکل ۲۱: بیشینه دامنه فوریه نقاط واقع در ناحیه روانگرا شده و زلزله اعمالی (مدل دوم).

طبق شکل ۲۲ نقاط شماره ۷ و ۲ را به صورت تصادفی از لایه‌های روانگرا شده برای بررسی روند دامنه فوریه در حوزه فرکانس انتخاب کردیم. مشاهده شد که پس از گودبرداری روند نمودار برای نقاط واقع در لایه پنجم با کاهش قابل توجه نسبت به قبل از گودبرداری در فرکانس  $1$  Hz تا  $10$  Hz اتفاق می‌افتد. اما در لایه چهارم به دلیل افزایش ضخامت لایه خاک، بیشینه دامنه فوریه پس از گودبرداری در فرکانس  $4$  Hz به دلیل نزدیکی به خاک رس ضعیف، در مقایسه با قبل از گودبرداری افزایش یافت. به طور کل در لایه چهارم از فرکانس  $10$  Hz به بعد افزایش دامنه فوریه را شاهد بودیم.

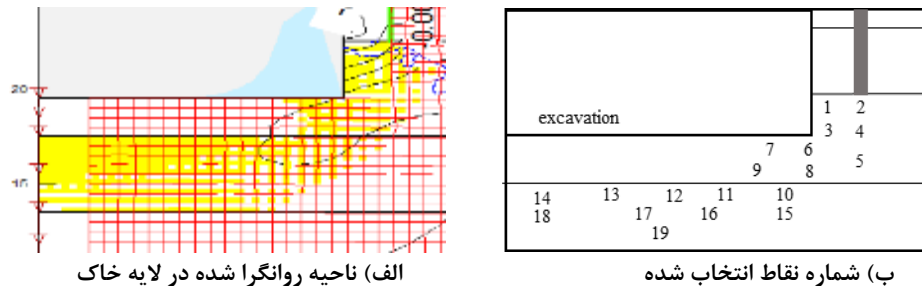


الف- نقطه شماره ۷ واقع در لایه پنجم  
ب- نقطه شماره ۲ واقع در لایه چهارم

شکل ۲۲: نمایش تغییرات دامنه فوریه در حوزه فرکانس، ناحیه روانگرا شده (مدل دوم).



در مدل سوم با تغییر تراز آب زیر زمینی به فاصله ۶ m از سطح زمین، آنالیز دینامیکی انجام شد و نقاط روانگرا شده در تراز ۲۰/۵ متری مطابق شکل ۲۳ انتخاب شدند.



الف) ناحیه روانگرا شده در لایه خاک  
ب) شماره نقاط انتخاب شده  
شکل ۲۳: نمایش ناحیه روانگرا شده پس از آنالیز دینامیکی (مدل سوم).

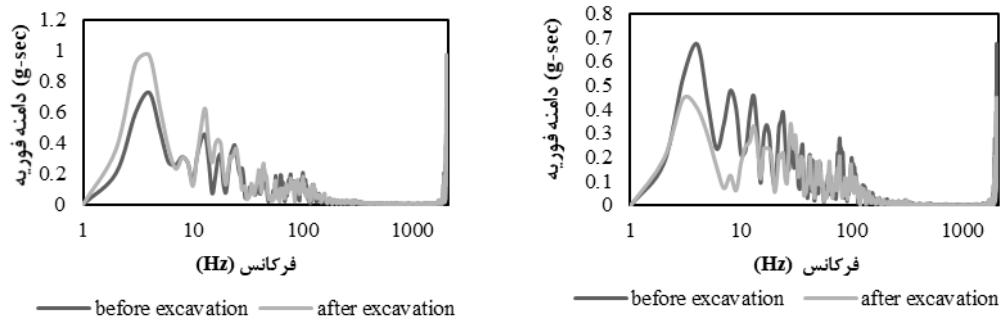
طبق شکل ۲۴ با اعمال زلزله قبل از گودبرداری بیشینه دامنه فوریه نقاط حدود ۰/۶۵ g-sec تا ۰/۷ و در فرکانس Hz ۱ تا ۱۰ رخ داد اما پس از ایجاد گودبرداری و اعمال زلزله به استثناء نقاط ۱ و ۲ که نزدیک به لایه رس ضعیف هستند، به ۰/۴ g-sec تا ۰/۷ رسید و باعث ایجاد روانگرایی شد.

با مقایسه بیشینه دامنه فوریه نقاطی که در لایه چهارم و نزدیک ناحیه روانگرا شده قرار دارند (شکل ۱۲) با نقاط واقع در محدوده روانگرا مشخص شد که بیشینه دامنه فوریه نقاط روانگرا شده بین ۰/۴ تا ۰/۷ بود. بنابراین مرز بیشینه دامنه فوریه برای آغاز روانگرایی در لایه ماسه از ۰/۵ g-sec و در لایه پنجم از ۰/۴ g-sec محاسبه شد. در واقع نقاطی از ماسه روانگرا شدند که بیشینه دامنه فوریه آن‌ها در محدوده بیشینه دامنه زلزله اصلی بود.



شکل ۲۴: بیشینه دامنه فوریه نقاط واقع در ناحیه روانگرا شده و زلزله اعمالی (مدل سوم).

در شکل ۲۵ مشاهده شد که روند تغییرات دامنه فوریه در حوزه فرکانس برای نقطه واقع در لایه پنجم، با روندی مشابه و بیشینه در فرکانس Hz ۱ تا ۱۰ رخ داد و پس از گودبرداری نیز شاهد کاهش دامنه فوریه در تمام حوزه فرکانس نسبت به قبل از گودبرداری بودیم. همچنین نمودار مربوط به لایه چهارم نشان داد که نقطه شماره ۲ به دلیل نزدیکی به لایه رس، روند و مقادیر متفاوت دامنه فوریه در فرکانس‌های مختلف را تجربه کرد.

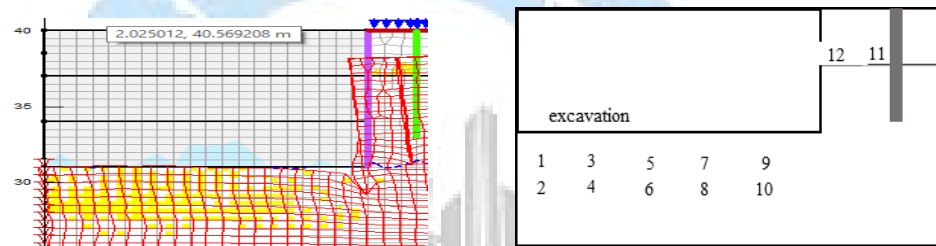


ب - نقطه شماره ۲ واقع در لایه چهارم

الف - نقطه شماره ۱۵ واقع در لایه پنجم

شکل ۲۵: نمایش تغییرات دامنه فوریه در حوزه فرکانس، ناحیه روانگرا شده (مدل سوم).

نتایج آنالیز دینامیکی مدل چهارم به دلیل تغییر خواص لایه‌های خاک طبق شکل ۲۷ متفاوت و با مقادیر بزرگتر دامنه فوریه نسبت به مدل‌های قبلی بیان شد.



الف) ناحیه روانگرا شده در لایه خاک

ب) شماره نقاط انتخاب شده

شکل ۲۶: نمایش ناحیه روانگرا شده پس از آنالیز دینامیکی (مدل چهارم).

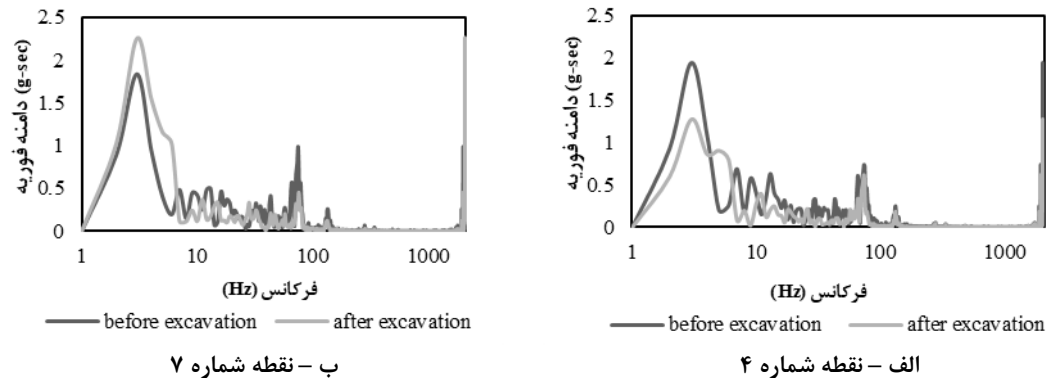
طبق شکل ۲۷ بیشینه دامنه فوریه این نقاط قبل از گودبرداری بین  $1/5$  تا  $2$  بود اما پس از گودبرداری و اعمال زلزله این مقدار به  $1$  تا  $2/2$  تغییر کرد. در واقع به دلیل ضعیف بودن لایه ماسه‌ای خاک، مرز دامنه فوریه برای روانگرایی از  $1$  عبور کرد.



شکل ۲۷: بیشینه دامنه فوریه نقاط واقع در ناحیه روانگرا شده و زلزله اعمالی (مدل چهارم).

شکل ۲۸ نشان داد که قبل از فرکانس  $10\text{ Hz}$  افزایش و کاهش بیشینه پس از گودبرداری متفاوت بود بطوریکه نقطه شماره ۴ در تراز پایین‌تری قرار دارد به همین دلیل مقدار بیشینه دامنه فوریه آن پس از گودبرداری برای وقوع پدیده

روانگرایی مقدار کمتری داشت.



شکل ۲۸: نمایش تغییرات دامنه فوریه در حوزه فرکانس، ناحیه روانگرا شده (مدل چهارم).

### ۵- نتیجه گیری:

در این مطالعه به منظور بررسی اندرکنش گروه شمع و گودبرداری مجاور، فاکتورهای مهمی از جمله رفتار سازه‌ای گروه شمع در ترازهای متفاوت گودبرداری و همچنین محتوای فرکانسی و روانگرایی در نقاط مختلف خاک مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج به دست آمده در حوزه مدل‌های این مطالعه به شرح زیر ارائه گردید. لازم به ذکر است دامنه فوریه در حوزه فرکانس، شاخص روانگرایی یا سنجش رفتار نیست اما می‌تواند یک نشانه اولیه برای تغییر در محتوای خاک باشد. در حین گودبرداری تا نسبت عمق گودبرداری به طول شمع ۰/۸۵، بیشترین نیروی محوری توسط شمع‌های شماره ۱ (نزدیکترین به گودبرداری) و شماره ۳ (دورترین از گودبرداری) تحمل می‌شود اما در نسبت‌های بالاتر از این مقدار کمترین نیروی محوری در شمع شماره ۳ اعمال شد. همچنین لنگر خمشی در شمع‌ها نیز از نسبت عمق گودبرداری به طول شمع ۰/۸۵ به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد به طوری که بیشترین لنگر خمشی در شمع شماره ۱ (نزدیکترین به گودبرداری) اتفاق افتاد. جهت بررسی رفتار سازه‌ای گروه شمع، با مقایسه مقدار بار اعمال شده و مقدار بار مجاز طراحی مشاهده می‌شود که نیروی محوری در شمع‌ها در تمام مراحل گودبرداری از ظرفیت مجاز طراحی عبور نکرد اما لنگر خمشی در شمع شماره ۱ و ۲ به ترتیب از نسبت عمق گودبرداری به طول شمع ۰/۸۵ و ۰/۵۱ ظرفیت خود را از دست می‌دهند.

به نسبت افزایش مقاومت اولیه خاک، افزایش دامنه فوریه نسبت به زلزله اصلی اتفاق می‌افتد به طوری که در خاک‌های ضعیف و در خاک‌های متراکم به ترتیب افزایش و کاهش دامنه فوریه پس از گودبرداری را شاهد هستیم. از طرفی در حالت عدم گودبرداری حداکثر دامنه فوریه در نقاط واقع بین شمع‌ها کمتر از نقاط موجود در همان لایه است. همچنین در نقاط واقع بر دیوار و کف گودبرداری به ترتیب افزایش و کاهش بیشینه دامنه فوریه پس از گودبرداری را تجربه کردند. در حالیکه در مدل با خاک ماسه‌ای، نقاط واقع بر دیوار گودبرداری کاهش و در نقاط واقع بر کف گود افزایش بیشینه دامنه فوریه پس از گودبرداری را شاهد هستیم. پس از گودبرداری با افزایش ضخامت لایه‌ها، بیشینه دامنه فوریه نقاط واقع بر دیوار گود کاهش یافت و با کاهش ضخامت، افزایش دامنه فوریه را نشان داد. نقاطی که حداکثر دامنه فوریه‌شان به حداکثر دامنه فوریه زلزله محدود شده است روانگرا می‌شوند و هر چه مقاومت اولیه خاک بیشتر باشد در دامنه فوریه کمتری روانگرایی آغاز می‌شود. همچنین نقاط روانگرا شده روند و محدوده دامنه فوریه‌شان در فرکانس‌های

مختلف، یکسان است.

## منابع و مراجع:

- [1] Polous, H.G. and Chen, L.T. (1997). Pile Response due to Excavation induced Lateral Soil Movement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(2), 94-99.
- [2] Leung, C. F., Chow, Y.K. and Shen, R.F. (2000). Behavior of pile subject to excavation-induced soil movement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(11), 947-954.
- [3] Kok, S.T., Bujang, B.K. (2009). Modeling of passive piles. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 14, 1-22.
- [4] Zhang, C., White, D. and Randolph, M. (2011). Centrifuge modeling of a rigid pile in soft clay. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 137(7), 717-729.
- [5] Elkady, T. (2013). Effect of Excavation-induced Movements on Adjacent Piles. In: *Proceedings of the 18th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering*. City: Paris, 707-710.
- [6] Castaldo, P. and De Iuliis, M. (2014). Effects of deep excavation on seismic vulnerability of existing reinforced concrete framed structure. *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 64, 102-112.
- [7] Nishanthan, R., Liyanapathirana, D.S. and Leo, C. (2014). Modelling issues in simulation of deep excavation. *Journal of Australian Geomechanics*, 49 (1), 91-103.
- [8] Yeganeh, N., Bolouri Bazaz, J. and Akhtarpour, A. (2015). Seismic analysis of the soil-structure interaction for a high rise building adjacent to deep excavation. *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 79, 149-170.
- [9] Dhattrak, A.I. and Kulkarn, S. (2016). Effect of Deep Excavation Adjacent to Pile Structure. *Journal of International Journal of Innovative Research in Science*, 5(4), 6313-6318.
- [10] ling zeng, L., shun hong, Z., wang, c. and zhen yang, Z. (2016). Experimental study on physical properties of clays with organic matter soluble and insoluble in water. *Journal of Applied Clay Science*, 660-667.
- [11] Myint, W.B., Arulrajah, A., Sukmakc, P. and Horpibulsuk, S. (2015). Mineralogy and geotechnical properties of Singapore marine clay at Changi. *Journal of soils and foundation*, 55(3), 600-613.
- [12] Koteswara Rao, D., Prasada Raju, G.V.R., Sowjanya, Ch., and Purnachandra Rao, J. (2009). Laboratory Studies on the Properties of Stabilized Marine Clay from Kakinada Sea Coast India. *International journal of engineering science and technology*, (3), 421-428.
- [13] Basack, S. and Purkayastha, R.D. (2009). Engineering properties of marine clays from the eastern coast of India. *Journal of Engineering and Technology Research*, 1(6), 109-114.
- [14] Jianqiao, LI., Xiaodong, Z., Meng, Z. and Hao, L. (2012). Soil Liquid Limit and Plastic Limit Treating System Based on Analytic Method. *Journal of science direct*, (5), 175-179.
- [15] Rahman, Z.A., Yaacob, W.Z.W., Rahim, S.A., Lihan, T., Idris, W.M.R. and Mohd sani, W.N.F. (2013). Geotechnical Characterisation of Marine Clay as Potential Liner Material. *Journal of Sains Malaysiana*, 42(8), 1081-1089.
- [16] Peer center, (2018). Peer Ground Motion Database. [Online] Available at: <https://ngawest2.berkeley.edu/spectras/138910/searches/128308/edit> [25 09 2018].
- [17] Humar, J.L., Bagchi, A. and Xia, H. (1998). Frequency domain analysis of soil-structure interaction. *Journal of Elsevier science*, 66, 337-351.