

تأثیر دیواره قوسی بر پایداری و تغییر شکل گودهای عمیق شهری

سعید غفاریپور جهرمی^{۱*}، یاسمن دهقان بنادکی^۲

^۱ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۹، پذیرش: ۱۴۰۰/۱/۱۸، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۱/۱۸

چکیده

امروزه گودبرداری یکی از مراحل حساس و مهم ساخت‌وسازهای شهری محسوب می‌شود که همواره مهندسان تلاش می‌کنند با انتخاب روش‌های مختلف آن را تحلیل، طراحی و اجرا نمایند. اهمیت این موضوع زمانی مشخص می‌شود که در محیط‌های شهری، تحلیل تغییر مکان و تغییر شکل‌های اطراف گود براساس ضوابط و مقررات ملی ساختمان الزامی است زیرا بناها و ساختمان‌های اطراف گود، نسبت به نشست نامتقارن حساسیت زیادی دارند. لذا مهندسان علاوه بر تحلیل پایداری گود، با استفاده از اطلاعات ژئوتکنیکی ساختگاه، هندسه گود، سربارهای اطراف گود و شبیه‌سازی مراحل گودبرداری، به ارزیابی و پیش‌بینی تغییر شکل‌ها و تغییر مکان‌های اطراف گود نیز می‌پردازند. تحلیل تغییر مکان و تغییر شکل به عوامل مختلفی چون هندسه گود، نوع خاک، روش پایداری‌سازی و نحوه مدل‌سازی وابسته است. در این مقاله سعی شده تحلیل تغییر مکان و پایداری گودهای با دیواره‌های قوسی شکل در دو پروژه با خاک مختلف (مطالعه موردی) با هدف اثر قوس‌زدگی خاک در حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار گیرد. همچنین نتایج مدل‌سازی دوبعدی با حالت سه‌بعدی در شبیه‌سازی قوس‌زدگی مورد مقایسه گرفته است. برای تحلیل پایداری و تغییر شکل گود در این تحقیق از نرم‌افزارهای FLAC3D و PLAXIS2D و GEOSLOPE استفاده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهند ایجاد شعاع انحنا و قوس در دیواره گود می‌تواند ضمن افزایش پایداری، با توزیع تنش و کرنش مقدار تغییر شکل‌ها و محدوده اثر گود را کاهش دهد.

کلیدواژه‌ها: گودبرداری، مدل رفتاری، تحلیل پایداری، تغییر شکل، قوس‌زدگی.

۱- مقدمه

رود، خاک ناپایدار شده و ریزش گود حتمی خواهد بود. لذا یکی از اهداف مهندسی در ارزیابی گود، تحلیل پایداری می‌باشد به‌طوری‌که ضریب اطمینان همواره بایستی بالاتر از یک باشد. علاوه بر تحلیل پایداری، به‌دلیل تأثیر گود بر محیط اطراف، تحلیل و کنترل تغییر شکل و نشست نیز در محیط‌های شهری الزامی می‌باشد. در این راستا لازم است شبیه‌سازی مناسبی از عملیات گودبرداری به‌منظور پیش‌بینی نشست و تغییر شکل انجام شود. از علل مهم بروز آسیب گودبرداری‌های شهری به‌خصوص در مجاورت ساختمان همسایه را می‌توان به عدم پایداری و جابه‌جایی‌های افقی و قائم غیرمجاز اشاره کرد. لذا پیش‌بینی جابه‌جایی در طراحی گودهای شهری اهمیت دارد. این موضوع با توجه به متغیر بودن مشخصات خاک هر پروژه بسیار حائز اهمیت است (مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان، ۱۳۹۲).

پدیده قوس‌زدگی^۱ به مفهوم انتقال فشار جانبی خاک به‌صورت قوسی تحت تأثیر تنش فشاری به نقاط و تکیه‌گاه‌های

امروزه با گسترش شهرسازی و توسعه روزافزون ساخت سازه‌های بلندمرتبه، نیاز به گودبرداری‌های با عمق زیاد وجود دارد. تأمین پایداری گود به‌منظور جلوگیری از هرگونه مخاطرات احتمالی در محیط‌های شهری امری اجتناب‌ناپذیر است. در یک تعریف کلی، گودبرداری یعنی پاییدن رفتن از سطح زمین یا در مناطق مسکونی پایین رفتن از تراز فونداسیون همسایه قابل‌بیان است. امروزه با توسعه شهرها و احداث سازه‌های مرتفع با کاربری مختلف در محیط‌های شهری، احداث طبقات زیرزمین جهت کاربردهای مختلف مثل تأمین پارکینگ و تأسیسات، رعایت برخی اصول و قوانین مرتبط با شهرنشینی، مشکلات و چالش‌های بسیاری دارد. در اثر گودبرداری، خاک به‌عنوان یک سیستم باربر حذف شده که در نتیجه آن تعادل تنش‌های موجود در توده خاک و همچنین تنش‌های بین‌دانه‌ای خاک (تنش مؤثر) به هم می‌خورد. این تغییرات در تنش اگر از آستانه تحمل خاک فراتر

1. Arching

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۲۱-۲۲۹۷۰۰۲۱

آدرس ایمیل: saeed_ghf@sru.ac.ir (س. غفاریپور جهرمی)، y_dehghan_b@yahoo.com (ی. دهقان بنادکی).

موردبررسی دادند. نتایج این تحقیق نشان داد اثر قوسی باعث کاهش تنش افقی در فاصله بین شمع‌ها و تمرکز آن در پشت شمع‌ها شده و هرچه فاصله بین شمع‌ها بیشتر می‌شود انتقال تنش‌ها به شمع‌ها کم‌تر و تغییر شکل‌های بین شمع‌ها افزایش می‌یابد.

Li و Guo در سال ۲۰۱۵ با بررسی اثر قوس‌زدگی بر میزان فشار جانبی وارد بر شمع و سپر به این نتیجه رسیدند که خاک‌ریز پشت شمع و سپر باعث می‌شود تنش در هر دو راستای x و y تولید می‌شود و به تبع آن تغییرشکل در ذرات خاک قوس‌زدگی را باعث می‌شود. اگر فاصله بین شمع‌ها را زیاد شود تنش در هر دو راستای x و y افزایش می‌یابد و برعکس. اثر قوسی باعث انتقال تنش از وسط دهانه شمع به تکیه‌گاه شده و لذا می‌توان اثر فشار جانبی خاک بر دیواره را ناچیز در نظر گرفت.

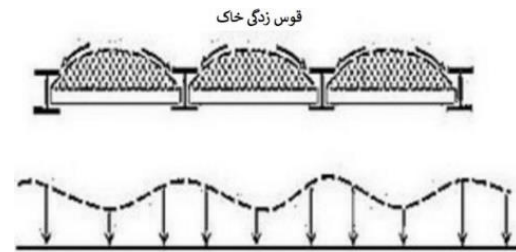
Barbosa و همکارانش (۲۰۱۷) اثر قوس‌زدگی خاک بر پایداری سازه‌های نگهبان شمع‌ی را در سازه‌های موقت و دائم با مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی در شرایط مختلف هندسی موردبررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد پدیده قوس‌زدگی در خاک‌های دانه‌ای و خاک‌های ریزدانه متفاوت است و هندسه شیب بالادست ترانشه بر این پدیده اثرگذار است. این تحقیق همچنین نشان داد مدل‌سازی و شبیه‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی نیز باید با توجه به نوع خاک انجام شود و نتایج تحقیق نشان داده تحلیل دوبعدی برای تغییرشکل‌های بزرگ محافظه‌کارانه است.

Lai و همکارانش در یک مطالعه به بررسی ویژگی‌های پدیده قوسی‌زدگی خاک در سازه‌ها متکی بر شمع شدند. در این مطالعه سازه‌های مختلف از نظر پدیده قوس‌زدگی طبقه‌بندی شده و مکانیزم انتقال بار در آن‌ها موردبررسی قرار گرفت. در سیستم پایداری‌سازی به روش شمع، چرخش نیروی تماس ناشی از جابه‌جایی نسبی ذرات خاک باعث تغییر در مسیر انتقال بار شده و توزیع تنش تغییر می‌کند. با این حال اندرکنش نیروهای تماس و چرخش در شرایط مختلف به‌طور قابل توجهی متفاوت است که منجر به ایجاد ساختارهای مختلف قوس‌زدگی در خاک شده و تفاوت قابل توجهی بر تغییرشکل و مکانیسم انتقال بار در سازه‌های مختلف دارد (Lai و همکاران، ۲۰۱۸).

Rui و همکارانش (۲۰۱۹) به روش تجربی گسترش قوس‌زدگی در خاک‌ریزهای مسلح شده با ژئوسنتیک^۵ مستقر بر شمع را موردبررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد مسلح‌سازی با ژئوسنتیک باعث تغییر در ساختار قوس و انتقال تنش می‌شود به‌طوری‌که نسبت کاهش تنش و تغییر شکل به‌طور متمایزی با حالت بدون مسلح متفاوت است.

King و همکارانش (۲۰۱۹) در یک تحقیق جنبش

پایدار است. این پدیده در پایداری‌سازی گودبرداری به روش اجرای شمع، در فاصله بین دو شمع وجود دارد و باعث تمرکز تنش در محل شمع می‌شود (شکل (۱)).



شکل ۱- پدیده قوس‌زدگی خاک در پشت شمع

Vermeer و همکارانش (۲۰۰۱) در یک تحقیق اثر قوس‌زدگی بر پایداری یک ترانشه ۱۶ متری که با سیستم دیوار برلنی^۲ (انکراژ^۳ و المان قائم و الوارهای افقی) پایداری‌سازی شده بود در طول ۳ کیلومتر و فاصله شمع ۴ متری مورد مطالعه قرار دادند. تحلیل سه‌بعدی آن‌ها نشان داد تماس مناسب شمع‌ها با خاک پشت باعث انتقال فشار جانبی از طریق قوسی‌زدگی می‌شود. تحلیل سه‌بعدی آن‌ها به روش المان محدود و مدل رفتاری موهرکولمب^۴ مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد قوس‌زدگی باعث می‌شود تنش بین شمع‌ها کاهش و تمرکز تنش در محل شمع افزایش یابد. البته این اثر به‌مرور زمان و با خزش خاک و همچنین ایجاد بارهای دینامیکی کاهش می‌یابد.

محقق به نام Deb با یک مدل ریاضی، اثر قوس‌زدگی خاک را بر ستون سنگی اجرا شده در خاک‌ریز خاک نرم را موردبررسی قرار داد. نتایج این تحقیق نشان داد ارتفاع خاک‌ریز، همگنی خاک، سختی ستون سنگی، فاصله بین ستون‌ها و خصوصیات مکانیکی خاک‌ریز بر قوس‌زدگی اثرگذار هستند (Deb، ۲۰۱۰).

Ma و همکارانش (۲۰۱۲) در بررسی اثر قوس‌زدگی بر شمع در خاک‌های غیرچسبنده به این نتیجه رسیدند که هرچه فشار جانبی خاک بیشتر شود اثر قوس‌زدگی نیز بیشتر می‌شود. این افزایش تا یک حد مشخصی ادامه دارد و از آن به بعد افزایش فشار جانبی خاک باعث از بین رفتن اثر قوسی می‌شود. فاصله بین شمع‌ها بر قوس‌زدگی تأثیر داشته به‌طوری‌که با افزایش فاصله شمع‌ها، اثر قوس‌زدگی به آرامی کاهش می‌یابد.

Hosseiniان و Seifabad (۲۰۱۳) در یک تحقیقی فاصله بهینه قرارگیری شمع‌ها در گودهای پایدار شده به روش دیوار برلنی را با بررسی اثر قوس‌زدگی در فواصل ۲ و ۴ متری شمع و استقرار انکرها در فواصل ۵ و ۳ متری در خاک ریزدانه (CL-ML) با مدل رفتاری موهر کولمب و نرم‌افزار Plaxis3D Tunnel

4. Mohr-Coulomb
5. Geosynthetic

2. Berlin wall
3. Anchorage

قوس‌زدگی در خاک‌ریزهای متکی بر شمع را مورد کاوش قرار دادند. در این تحقیق نشست تدریجی سطح خاک‌ریز با مدل‌سازی سه‌بعدی خاک‌ریز و مقایسه آن با تصاویر اشعه ایکس انجام گردید. نتیجه این تحقیق نشان داد در طول زمان کرنش گسیختگی ناشی از تنش برشی به‌طور پراکنده در خاک‌ریز وجود دارد که شدت آن‌ها در محل شمع بیشتر است. محدوده توسعه و رشد این کرنش‌های برشی در تراز بالای شمع به‌عنوان ارتفاع بحرانی خاک‌ریز جهت قوس‌زدگی معرفی می‌شود که باید ضخامت خاک‌ریز همواره از آن بیشتر باشد.

Lai و همکارانش (۲۰۲۰) توزیع تنش ناشی از قوس‌زدگی در خاک‌ریزهای مستقر بر شمع را مورد تحقیق قرار می‌دهند. نتیجه این تحقیق نشان داد شکل و ترکیب قوس در خاک‌ریز نامشخص و به عوامل مختلفی وابسته است و لذا وضعیت تنش و تغییر شکل در محدوده قوس پیچیده است به‌طوری‌که توزیع تنش افقی با توزیع تنش قائم متفاوت است.

Long و Tan (۲۰۲۰) تأثیر شکل ذرات در قوس‌زدگی خاک را با مدل‌سازی دوبعدی مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد ارتفاع بحرانی خاک‌ریز برای تشکیل قوس با میزان کروی یا مسطح بودن ذرات خاک ارتباط دارد. به‌طوری‌که امتداد تنش تماسی، ناهمسانی و چرخش ذرات خاک باعث تغییر در ساختار قوس می‌شود.

Chen و همکارانش (۲۰۲۰) روشی را برای محاسبه فاصله مناسب شمع در پایداری‌سازی ترانشه‌ها تحت اثر قوس‌زدگی را مورد مطالعه قرار دادند. این تحقیق نشان می‌دهد سطح اتکای شمع و خاک پشت بر شکل قوس (محدوده قوس‌زدگی) و توزیع تنش و میزان تغییر شکل‌ها اثرگذار است.

Jiao و همکارانش (۲۰۲۰) فشار جانبی محرک وارد بر سازه نگهدارنده را با توجه به اثرات قوس‌زدگی خاک و تنش‌های اصلی وارد بر سازه به روش تحلیلی مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد فشار جانبی خاک بدون در نظر گرفتن قوس‌زدگی، با لحاظ کردن تنش‌های اصلی کوچک‌تر از زمانی است که اثر تنش‌های اصلی لحاظ می‌شود. همچنین مشاهده شده ضریب فشار محرک با افزایش تنش اصلی متوسط کاهش و با افزایش زاویه زبری دیوار و خاک افزایش می‌یابد.

Li و همکارانش (۲۰۲۲) مکانیسم حرکت خزشی خاک تحت اثر قوس‌زدگی را در خاک‌های رسی نرم مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد قوس‌زدگی در خاک چندلایه و فرایند انتقال تنش به تفاوت سختی خاک و سازه وابسته است و مکانیسم خزشی خاک تحت اثر قوس هنوز ناشناخته است. تفسیر دقیق از گسترش قوس‌زدگی و جابه‌جایی خاک تحت اثر جریان خزش در خاک نرم رسی در پشت دیوار قرار دارد به‌طوری‌که در درازمدت محدوده قوس به سطح زمین گسترش می‌یابد باعث نشست در سطح زمین می‌گردد. در بعضی از

پروژه‌ها دیواره گودبرداری مستقیم نیست بلکه قوسی شکل و یا دارای زاویه می‌باشد. بنابراین عملکرد آن (پایداری و تغییر شکل) با دیواره مستقیم متفاوت است و برای تحلیل آن نمی‌توان از روش‌های معمول گذشته (تحلیل دوبعدی) استفاده کرد، بلکه باید از نرم‌افزارهای سه‌بعدی برای تحلیل آن استفاده نمود. دیواره قوسی در گودبرداری می‌تواند یک پوسته فضایی باشد که در پلان دارای انحنا است. پوسته شاتکریت بتن مسلح در سیستم میخ‌کوبی و دیوار برلنی، می‌تواند با عملکرد خمشی بخش از بار را به تکیه‌گاه منتقل کند که با داشتن قوس یا شکستگی باعث ایجاد رفتار خمشی- فشاری مضاعف در مصالح شده و رفتار آن نسبت به سطوح بدون قوس متفاوت است. پوسته با انحنای اولیه، دارای مقاومت خمشی بیشتری نسبت به صفحه است و اغلب از طریق تنش‌های غشایی که در آن به وجود می‌آید در مقابل بارهای خارجی مقاومت بیشتری دارد. همچنین هرگاه تکیه‌گاه یک توده خاک به هر نحوی گسیخته گردد، بخشی از خاک نزدیک تکیه‌گاه نسبت به توده مجاور به‌سمت خارج حرکت خواهد کرد. بسیج مقاومت برشی در محل تماس ناحیه گسیخته شده و توده ثابت باعث خواهد شد تا در برابر تغییر شکل ناحیه لغزان مقاومت شود. این عمل سبب کاهش فشار روی تکیه‌گاه گسیخته شده و افزایش فشار بر روی توده‌های مجاور خواهد شد. پدیده انتقال فشار از یک توده در حال گسیختگی خاک به مرزهای مجاور را نیز شامل قوس‌زدگی می‌شود. این عملکرد متفاوت می‌تواند بر ضریب اطمینان پایداری و میزان تغییر شکل افقی و قائم دیواره اثرگذار باشد. معمولاً قسمت اعظم فشار جانبی خاک به گوشه گود و در محل تقاطع و تکیه‌گاه کناری دیواره منتقل می‌گردند که این امر ناشی از عملکرد قوس‌زدگی است. بخش از فشار افقی نیز با عملکرد کنسولی به کف منتقل می‌گردد. بنابراین رفتار دیواره گود ترکیبی از رفتار قوسی به‌صورت نوارهای افقی و رفتار طره‌ای به‌صورت نوارهای قائم است. تنش کششی در یک قوس ناچیز و قابل اغماض است. خاصیت طبیعی خمیدگی قوس و توانایی آن در انتقال فشار، به‌طور قابل ملاحظه‌ای تأثیر تنش کشش در پشت دیواره قوس را کاهش می‌دهد. هرچند با زیاد شدن زاویه انحنا و خمیدگی قوس، اثر تنش کششی نیز کاهش بیشتری دارد. آنچه در مطالعات قبلی کمتر به آن توجه شده است اثر پدیده قوس‌زدگی بر تحلیل و پایداری گود و میزان تغییر شکل‌ها است. لذا در پژوهش حاضر پایداری و جابه‌جایی‌های افقی و قائم دیواره گودهای شهری که به شکل قوسی شبیه‌سازی شده‌اند با مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۲- تحلیل، طراحی و مدل‌سازی

بررسی رفتار سه‌بعدی و قوسی شکل دیواره گود در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC3D انجام شده

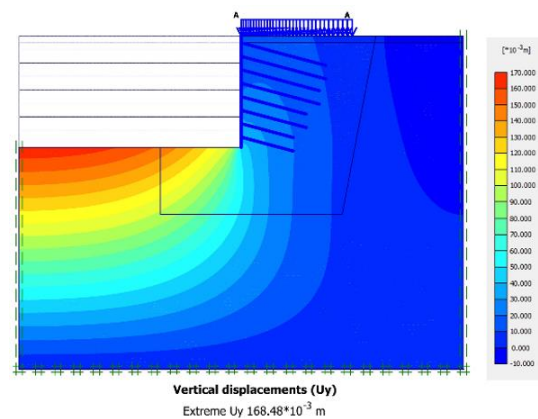
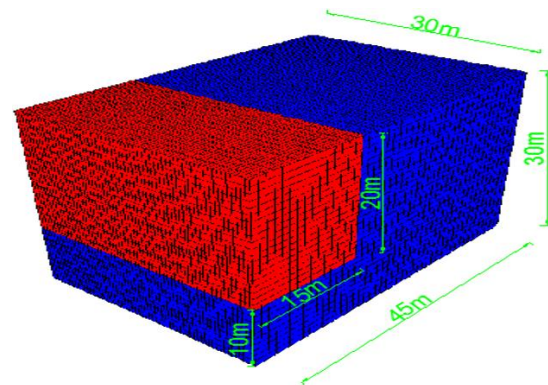
داده است. تا عمق دو متری خاک دستی لحاظ شده است. مدل رفتاری مناسب خاک نیز برای ماسه (خیابان ملاصدرا) از مدل سخت‌شونده^۶ و برای رس (لاله‌زار) از مدل CAM-Clay استفاده شده است. مدل در ناحیه مرزی دارای تکیه‌گاه غلتکی و قید در سه صفحه XY و XZ و YZ به مدل اعمال شدند. در این تحقیق از دو نوع مسلح‌کننده برای پایدارسازی گود استفاده شده است که شامل دیوار برلنی (المان قائم فولادی به‌عنوان شمع) و کابل‌های استرند^۷ است. المان قائم فولادی از نوع ZIPE330 با فاصله ۵ متر که در قسمت پایین به‌اندازه ۰/۲۵ ارتفاع گود در یک پاشنه بتنی مدفون هستند. مشخصات فنی این مسلح‌کننده برای هر دو پروژه در جدول (۲) آمده است.

جدول ۱- پارامترهای ژئوتکنیکی برای مدل‌های رفتاری

مدل رفتاری		واحد	علامت	مشخصه خاک محل
سخت شونده	Cam Clay			
۱۴	۱۷	کیلوپاسکال	C	چسبندگی
۳۳	۱۶	درجه	ϕ	زاویه اصطکاک داخلی
۳	۴	درجه	ψ	زاویه اتساع
کیلونیوتن				
۲۰	۱۹	بر مترمکعب	γ	وزن مخصوص
-	۴۰۰۰۰	کیلوپاسکال	E	مدول الاستیسیته ^۸
سختی سکانت در آزمایش سه محوری زهکشی شده				
۵۰۰۰۰	-	کیلوپاسکال	E_{50}^{ref}	سختی تانژانت برای بارگذاری اولیه
۵۰۰۰۰	-	کیلوپاسکال	E_{oed}^{ref}	سختی باربرداری - بارگذاری مجدد
۱۵۰۰۰۰*	-	کیلوپاسکال	E_{ur}^{ref}	فاکتور وابستگی سختی به سطح تنش
۰/۵	۱	بدون بعد	m	تنش مرجع
۱۰۰	۱۰۵	کیلوپاسکال	p^{ref}	ضریب پواسون ^{۱۰}
-	۰/۳	بدون بعد	ν	ضریب پواسون
۰/۲	۰/۲۸	بدون بعد	ν'	باربرداری و بارگذاری مجدد

* مقدار $E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref}$ در نظر گرفته شده است.

است و نتایج آن با نرم‌افزار المان محدود PLAXIS و نرم‌افزار تعادل حدی GEOSLOPE مقایسه و مورد صحت‌سنجی و دقت سنجی قرار گرفته است. هندسه مدل شامل طول و ارتفاع ثابت ۳۰ متر و ارتفاع گودبرداری متغیر با مقادیر ۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر بوده و ۱۰ متر کف گود جهت حذف اثرات بالازدگی کف گود لحاظ شده است (شکل (۲)). عرض مدل نیز برابر ۴۵ متر در نظر گرفته شده است که ۱۵ متر آن در قسمت خاک‌برداری شده قرار دارد و مابقی آن به‌صورت تنش جانبی بر دیواره وارد می‌شود. ابعاد مش در راستای X معادل نیم متر در راستای Y معادل یک متر و در راستای Z نیز معادل یک متر در نظر گرفته شده است. همچنین در مجاور گود یک ساختمان سه طبقه مسکونی با سربار معادل $3t/m^2$ در نظر گرفته شده است.



شکل ۲- هندسه مدل

۳- مشخصات فنی و شبیه‌سازی

مشخصات و داده‌های مورد استفاده در تحلیل و طراحی پروژه براساس گزارش مطالعات ژئوتکنیک برای دو منطقه مختلف از نظر ساختگاه و بافت زمین‌شناسی در شهر تهران (خیابان ملاصدرا و خیابان لاله‌زار) انتخاب شده که در جدول (۱) نشان

کننده استرند در وسط المان فولادی (سولجر پایل)^{۱۴} قرار می‌گیرد فاصله بین آن‌ها ۲/۵ متر لحاظ می‌شود. هندسه قوس شامل شعاع قوس، طول خیز و نسبت خیز به دهانه در جدول (۷) آمده است.

جدول ۳- مشخصات فنی مهار کششی (استرند و انکر) در بخش آزاد غیرپیوندی هر دو پروژه

مهار کششی	مدول الاستیسیته - kPa	قطر چال - mm	ظرفیت کششی مهار - kN
انکر با قطر ۲۸ میلی‌متر	2×10^8	۱۲۰	۲۵۸
انکر با قطر ۳۲ میلی‌متر	2×10^8	۱۲۰	۳۲۱
استرند ۳ رشته	2×10^8	۱۲۰	۷۸۲/۱
استرند ۴ رشته	2×10^8	۱۲۰	۱۰۴۳

جدول ۲- مشخصات فنی المان قائم (سولجر پایل)

مشخصه	پروژه گود لاله‌زار	پروژه گود ملاصدرا
چسبندگی (kPa)	۴/۶۹	۱۳/۴
سختی برشی در سطح تماس (kPa)	10^9	10^9
مدول الاستیسیته (kPa)	2×10^8	2×10^8
سطح مقطع (مترمربع)	۰/۱۲۵۲	۰/۱۲۵۲
ضریب پواسون	۰/۲۵	۰/۲۵
فاصله (متر)	۵	۵

همچنین در این تحقیق طراحی گود براساس المان‌های کششی (استرند) نیز انجام شده است که مشخصات فنی آن برای هر دو پروژه برای قسمت پیوند^{۱۱} و قسمت آزاد^{۱۲} در جداول (۳) تا (۵) آمده است. مشخصات فنی شاتکریت^{۱۳} به‌عنوان پوسته دیواره قوسی نیز در جدول (۶) آمده است. در این تحقیق طول دهانه المان‌های قائم فولادی ۵ متر و با توجه به این که مسلح

جدول ۴- مشخصات فنی مهار کششی (استرند و انکر) قسمت پیوند در پروژه لاله‌زار

مهار کششی	مشخصات فنی دوغاب		مدول الاستیسیته (kPa)	قطر چال (mm)	ظرفیت کششی مهار (kN)	ظرفیت مجاز پیش-تیندگی (kN)
	چسبندگی (kPa)	اصطکاک (درجه)				
انکر با قطر ۲۸ میلی‌متر	۴/۶۹	۲۲/۷۱	2×10^8	۱۲۰	۲۵۸	۱۵۴
انکر با قطر ۳۲ میلی‌متر	۴/۶۹	۲۲/۷۱	2×10^8	۱۲۰	۳۲۱	۱۹۲
استرند ۳ رشته	۴/۶۹	۲۲/۷۱	2×10^8	۱۲۰	۷۸۲/۱	۴۶۹
استرند ۴ رشته	۴/۶۹	۲۲/۷۱	2×10^8	۱۲۰	۱۰۴۳	۶۲۶

جدول ۵- مشخصات فنی مهار کششی (استرند و انکر) قسمت پیوند در پروژه ملاصدرا

مهار کششی	مشخصات فنی دوغاب		مدول الاستیسیته (kPa)	قطر چال (mm)	ظرفیت کششی مهار (kN)	ظرفیت مجاز پیش-تیندگی (kN)	مهار کششی	مشخصات فنی دوغاب
	چسبندگی (kPa)	اصطکاک (درجه)						
انکر با قطر ۲۸ میلی‌متر	۱۳/۴	۲۶	2×10^8	۲/۴×۱۰ ^۷	۱۲۰	۲۵۸	۲۵۸	۱۵۴
انکر با قطر ۳۲ میلی‌متر	۱۳/۴	۲۶	2×10^8	۲/۶×۱۰ ^۷	۱۲۰	۳۲۱	۳۲۱	۱۹۲
استرند ۳ رشته	۱۳/۴	۲۶	2×10^8	۶/۰۲×۱۰ ^۷	۱۲۰	۷۸۲/۱	۷۸۲/۱	۴۶۹
استرند ۴ رشته	۱۳/۴	۲۶	2×10^8	۸/۰۹×۱۰ ^۷	۱۲۰	۱۰۴۳	۱۰۴۳	۶۲۶

جدول ۷- نسبت خیز به دهانه براساس شعاع قوس‌های مختلف

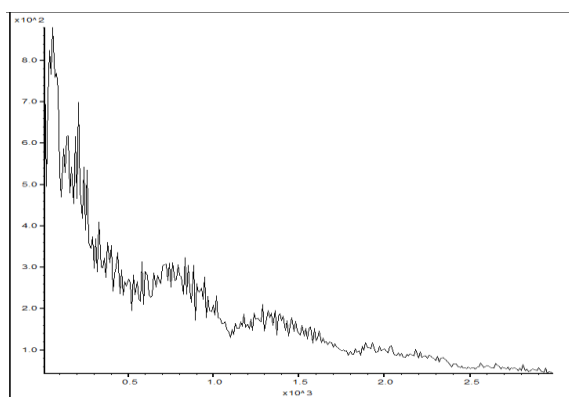
شعاع قوس (متر)	طول خیز نسبت به حالت بدون قوس (cm)	نسبت خیز به دهانه
۳	۱۳۲/۶	۰/۵۳
۴	۸۴/۹	۰/۳۳۹
۵	۶۵/۶	۰/۲۶۲
۶	۵۴/۵	۰/۲۱۸
۷	۴۵/۵	۰/۱۸۲
۸	۴۰	۰/۱۶

جدول ۶- مشخصات فنی شاتکریت

مدول الاستیسیته (kPa)	دانسیته (kN/m ³)	ضریب پواسون	ضخامت (متر)
2×10^7	۲۴	۰/۲۵	۰/۱۵

۴- تعادل استاتیکی و تعادل اولیه مدل

برای تحلیل مدل در شرایط تعادل اولیه، به ازای هر چرخه اگر بار حداکثر نیروهای نامتعادل نسبت به حالت قبل ناچیز باشد (کمتر از 10^{-4}) به معنای رسیدن به تعادل استاتیکی تلقی شده و فرآیند تحلیل متوقف می‌شود و در این مرحله تمامی تغییرمکان‌ها صفر می‌شوند (شکل (۳)). سپس حفاری به صورت مراحل ۲ متری شبیه‌سازی می‌شود یعنی هر ۲ متر حفاری یک گام خاک‌برداری تعریف می‌گردد.



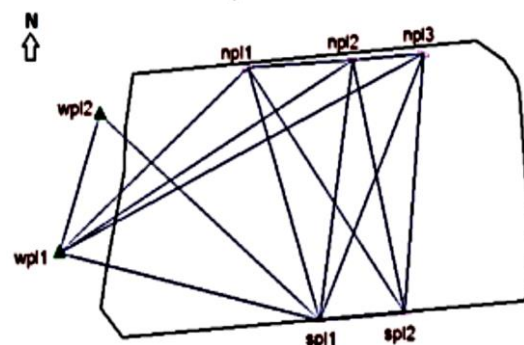
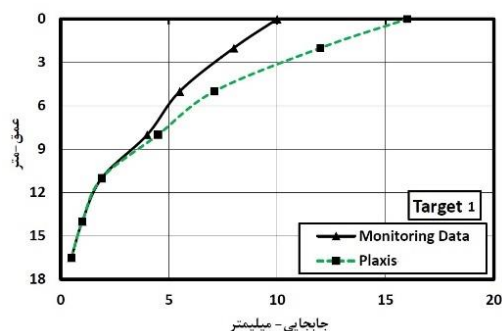
شکل ۳- نمودار تحلیل و تعادل اولیه

۵- اعتبارسنجی و دقت سنجی مدل عددی

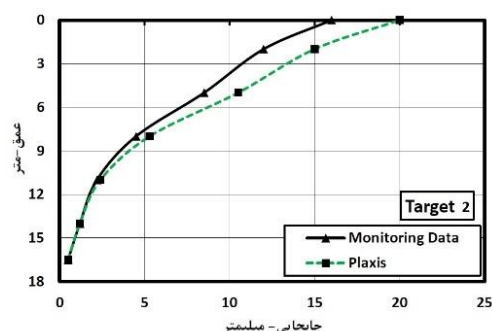
در تحقیق حاضر نتایج پایش تغییرشکل‌های گود با استفاده از ابزار دقیق به روش میکروژئودزی^{۱۵} در طول فرآیند گودبرداری و تا سه ماه بعد از اتمام گودبرداری در دسترس می‌باشد که در اعتبارسنجی این تحلیلی عددی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش ژئودتیک^{۱۶} برای پایش یک سازه در دو یا چند دوره زمانی، ابتدا یک شبکه‌ای از نقاط ثابت در اطراف آن سازه طراحی و ایجاد می‌گردد. سپس مشاهدات طول و زاویه برای تعیین مختصات دقیق نقاط انجام می‌شود. در مرحله بعد نقاطی را به عنوان نقطه برداشت^{۱۷} بر روی بدنه دیواره مورد پایش، در نظر گرفته و سعی می‌شود کلیه مشاهدات ممکن از اکثر نقاط این شبکه به سوی نقاط برداشت به دست آیند (شکل (۴)). اگر این مشاهدات در دو مرحله انجام شود، می‌توان میزان جابه‌جایی نقاط را از مقایسه تفاوت مختصات تعیین کرد.

جدول ۸- مشخصات فنی در فرآیند مدل‌سازی

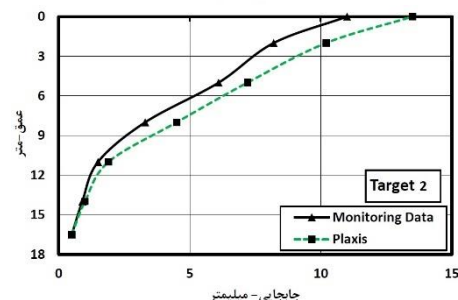
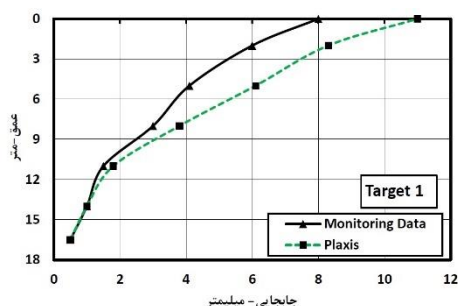
نوع چیدمان	فاصله (متر)	نسبت به افق (درجه)	طول (متر)	قسمت پیوند (متر)	ارتفاع از سطح (متر)
چیدمان مسلح‌کننده گود ۷ متری					
انکر با قطر ۲۸ میلی‌متر	۲/۵	۱۰	۶	۳	۲
انکر با قطر ۲۸ میلی‌متر	۲/۵	۱۰	۶	۳	۴/۵
چیدمان مسلح‌کننده گود ۱۰ متری					
استرند ۳ رشته	۲/۵	۱۰	۱۰	۵	۲
انکر با قطر ۳۲ میلی‌متر	۲/۵	۱۰	۸	۴	۴/۵
انکر با قطر ۳۲ میلی‌متر	۲/۵	۱۰	۶	۴	۷/۵
چیدمان مسلح‌کننده گود ۱۵ متری					
استرند ۳ رشته	۲/۵	۱۰	۱۴	۷	۲
استرند ۳ رشته	۲/۵	۱۰	۱۴	۷	۴/۵
استرند ۳ رشته	۲/۵	۱۰	۱۰	۵	۷
استرند ۳ رشته	۲/۵	۱۰	۱۰	۵	۹/۵
استرند ۳ رشته	۲/۵	۱۰	۸	۵	۱۲
چیدمان مسلح‌کننده گود ۲۰ متری					
استرند ۴ رشته	۲/۵	۱۰	۱۷	۷	۲
استرند ۴ رشته	۲/۵	۱۰	۱۶	۷	۴/۵
استرند ۴ رشته	۲/۵	۱۰	۱۴	۷	۷
استرند ۳ رشته	۲/۵	۱۰	۱۲	۶	۹/۵
استرند ۳ رشته	۲/۵	۱۰	۱۲	۶	۱۲
استرند ۳ رشته	۲/۵	۱۰	۱۰	۶	۱۴/۵
استرند ۳ رشته	۲/۵	۱۰	۹	۶	۱۷
استرند ۳ رشته	۲/۵	۱۰	۹	۶	۱۹



شکل ۴- نقاط شبکه پایش در اطراف گودبرداری و نقاط و مشاهدات شبکه پایش (عشورزاده و رستمی، ۱۳۹۴)



شکل ۵- مقایسه نتایج پایش گود با نتایج تحلیل عددی در پروژه لاله‌زار در تهران



شکل ۶- مقایسه نتایج پایش گود با نتایج تحلیل عددی در پروژه ملاصدرا در تهران

۶- تحلیل نتایج حاصل از نرم‌افزارها

نتایج حاصل از تحلیل پایداری با مدل‌سازی دوبعدی به روش تعادل حدی در نرم‌افزار Geoslope نشان می‌دهد که طرح پایدارسازی گودبرداری در هر دو پروژه، برای شرایط مختلف دارای ضریب اطمینان مطلوب است. لذا از نتایج طراحی به‌منظور تحلیل تغییر شکل و بررسی تأثیر قوس بر مقدار، میزان و محدوده

با توجه به این‌که نقاط شبکه نیز ممکن است حرکت مستقل داشته باشند، لازم است مشاهدات خارج از منطقه مورد مطالعه نیز به‌سوی ایستگاه‌های شبکه انجام و پایداری شبکه در یک دوره زمانی بررسی شود (عشورزاده و رستمی، ۱۳۹۴). برای این منظور یک شبکه هفت نقطه‌ای شامل دو نقطه ثابت در اطراف گود و خارج از محدوده تأثیر گود انتخاب و مشاهدات طول و زوایای افقی و قائم به‌سوی نقاط برداشت در شش مرحله متوالی یک ماهه (در یک بازه ۴ ماهه) انجام شده است. پس از سرشکنی هر مرحله، میزان جابه‌جایی‌ها در هر نقطه به‌دست می‌آید.

نتایج حاصل از پایش ژئودتیک در گودبرداری‌های شهری نشان می‌دهند میزان جابه‌جایی‌ها، یک تابع غیرخطی از عمق گودبرداری، روش پایدارسازی و مشخصات خاک می‌باشد. مقایسه نتایج حاصل از تحلیل عددی با مقادیر پایش گود برای دو نقطه در جبهه‌ای گود برای هر دو پروژه در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است. تراز موقعیت این نقاط در تراز صفر پروژه و در رأس گود می‌باشد. این مقایسه نشان می‌دهد در تمامی نقاط برداشت، همواره نتایج تحلیل عددی با نتایج رفتارسنجی گود تطابق دارد.

جدول ۱۲- نتایج تغییر شکل حداکثر گود ۷ متری با شعاع قوس متفاوت هر دو پروژه

شعاع قوس (متر)	پروژه لاله زار				پروژه ملاصدرا			
	رأس (cm)	افقی (cm)	قائم (cm)	شعاع تأثیر (m)	رأس (cm)	افقی (cm)	قائم (cm)	شعاع تأثیر (m)
۳	۱/۲	۱/۰۸	۰/۳	۱۵/۲	۱/۲	۱/۱	۰/۱۸	۱۳/۱
۴	۱/۲	۱/۱	۰/۳۲	۱۶/۱	۱/۲	۱/۱۳	۰/۲	۱۴/۶
۵	۱/۳	۱/۲۱	۰/۳۸	۱۶/۹	۱/۲۳	۱/۱۵	۰/۲۲	۱۵
۶	۱/۴۵	۱/۳	۰/۴۳	۱۸/۱	۱/۳۶	۱/۱۷	۰/۲۳	۱۶/۴
۷	۱/۸۵	۱/۷۵	۰/۴۷	۱۹/۲	۱/۲۷	۱/۱۷	۰/۲۷	۱۷/۵
۸	۲	۱/۹	۰/۵	۲۰	۱/۳۵	۱/۱۹	۰/۳۰۲	۱۸/۳

جدول ۱۳- نتایج تغییر شکل حداکثر گود ۱۵ متری با شعاع قوس متفاوت هر دو پروژه

شعاع قوس (متر)	پروژه لاله زار				پروژه ملاصدرا			
	کل (cm)	افقی (cm)	قائم (cm)	شعاع تأثیر (m)	کل (cm)	افقی (cm)	قائم (cm)	شعاع تأثیر (m)
۳	۲	۱/۹۲	۱/۶	۲۲	۱/۵	۱/۰۵	۱/۳۵	۲۰/۵
۴	۲/۲	۱/۲	۱/۷۵	۲۴/۳	۱/۵	۱/۰۷	۱/۴۳	۲۱
۵	۲/۵	۲/۲۳	۱/۸	۲۵	۱/۵	۱/۰۹	۱/۵	۲۲/۳
۶	۲/۵	۲/۳۵	۱/۸۴	۲۶/۵	۲	۱/۱۲	۱/۵۷	۲۳/۴
۷	۳	۲/۵۷	۱/۹۸	۲۷	۲	۱/۱۳	۱/۷	۲۵
۸	۳/۰۵	۲/۶۷	۲/۰۳	۲۹	۲	۱/۱۵	۱/۷	۲۶/۵

جدول ۱۴- نتایج تغییر شکل حداکثر گود ۱۵ متری با شعاع قوس متفاوت هر دو پروژه

شعاع قوس (متر)	خاک لاله زار				خاک ملاصدرا			
	رأس (cm)	افقی (cm)	قائم (cm)	شعاع تأثیر (m)	رأس (cm)	افقی (cm)	قائم (cm)	شعاع تأثیر (m)
۳	۳/۴	۴/۱	۲/۸	۲۴	۲/۵	۲/۳۵	۱/۴	۲۳/۵۳
۴	۴	۳/۵	۲/۸	۲۴/۵	۲/۵	۲/۰۸	۱/۲۶	۲۳/۷
۵	۲/۸۵	۲/۷۵	۲	۲۵	۲	۲/۰۸	۱/۱	۲۴/۲
۶	۳	۲/۸۳	۲/۲	۲۶	۲/۵	۲/۰۹	۱/۱	۲۴/۶
۷	۳	۲/۹۵	۲/۳۴	۲۶/۵	۳	۲/۱	۱/۳۱	۲۵
۸	۳/۵	۳	۲/۵	۳۰	۲/۵	۲/۱۱	۱/۳۵	۲۵/۳

وجود دارد و آن فاصله بین مسلح کننده‌های قائم است. ارتباط بین تغییرشکل افقی حداکثر با شعاع قوس ۳ تا ۸ متری در گود ۷ تا ۲۰ متری هر دو نوع پروژه در شکل (۸) نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهند اگر شعاع قوس از حد مشخصی متناسب با ارتفاع گود فراتر برود، میزان تغییرشکل‌ها روند افزایشی خواهند داشت.

نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که تأثیر قوس بر تغییر شکل‌ها قابل‌ملاحظه است و ایجاد قوس باعث کاهش تغییر شکل‌ها شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهند که با کاهش شعاع قوس و به‌دنبال آن افزایش انحنا و خمیدگی، میزان تغییرشکل‌ها کاهش بیشتری دارند.

این بررسی در گود ۲۰ متری تا شعاع قوس ۵ متری (برابر فاصله المان قائم) کاهش و پس از آن روند افزایشی دارد. این موضوع بیانگر ارتباط بین شعاع قوس مؤثر و بهینه با المان قائم است و می‌توان چنین نتیجه گرفت که شعاع قوس بهینه معادل فاصله المان قائم است. همچنین مقایسه نتایج نشان می‌دهند شعاع انحنای قوس بهینه به عمق گود نیز وابسته است چراکه این موضوع در دیگر گودها مشاهده نشد. این موضوع نشان می‌دهد که برای افزایش انحنا در گود ۲۰ متری محدودیتی

خواهد شد که تأثیر آن به هندسه گود، نوع خاک، مشخصات فنی سازه (المان قائم و مهار کشش) دارد.

در گودهای کم عمق با افزایش انحنای قوس، تغییر شکل‌ها کاهش می‌یابند اما در گودهای عمیق این کاهش تغییر شکل تا شعاع قوس بهینه ادامه دارد و از آن به بعد با کاهش شعاع قوس، تغییر شکل افزایش می‌یابد. این نتیجه می‌تواند ناشی از این واقعیت باشد که با افزایش نسبت خیز به دهانه و نزدیک شدن قوس به نیم‌دایره، رفتار قوس تغییر کرده و ممان‌های بیشتری به قوس وارد می‌آید که این امر موجب افزایش تغییر مکان‌ها می‌شود.

به نظر می‌رسد تأثیر ایجاد شعاع قوس در خاک‌های ضعیف بیشتر از خاک‌های قوی می‌باشد. همچنین تحلیل دوبعدی دلالت بر تغییر شکل‌های بیشتری در مقایسه با تحلیل سه‌بعدی دارد. محدوده اثر گود که بیانگر فاصله نقطه شروع تغییر شکل‌های در محیط اطراف گود است با اجرای قوس کاهش می‌یابد که علت آن عملکرد قوسی پوسته بتنی شاتکریت و تأثیر آن بر توزیع تنش‌های فشاری و کشش توده لغزشی از طریق تنش‌های غشایی می‌باشد. در گودهای کم عمق، ضخامت پوسته شاتکریت دیواره‌های قوسی تأثیرگذار است و بار وارده بر پوسته وابسته به دهانه قوس، عملکرد خمشی - پوسته‌ای دارند لذا با کاهش شعاع تغییر شکل‌ها کاهش می‌یابند. ولی در گودهای عمیق به علت افزایش شدت تنش و بار وارده بر پوسته، با کاهش شعاع قوس تغییر شکل‌ها تا حد مشخصی متناسب با شعاع قوس کاهش می‌یابند. لذا می‌توان نتیجه گرفت نسبت خیز به دهانه مؤثر نیز متناسب با هندسه گود، نوع خاک و مشخصات فنی مهار است.

۸- مراجع

عشورزاده ی، رستمی ق، "استفاده از روش ژئودتیک برای پایش و بررسی جابه‌جایی افقی و قائم دیواره گودبرداری"، نشریه علمی - ترویجی مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، ۱۳۹۴، ۹-۱۸.

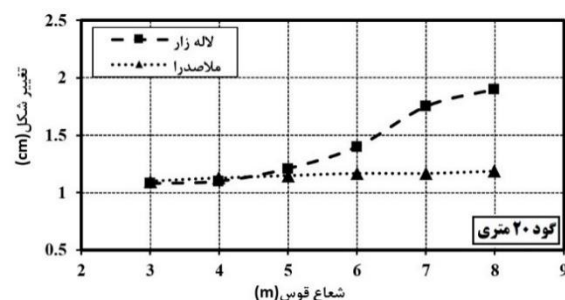
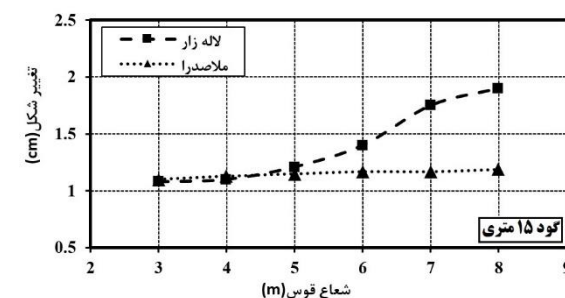
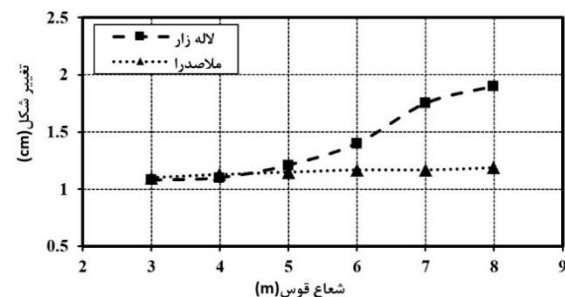
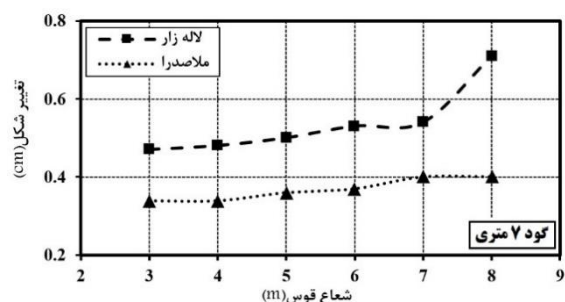
مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان، پی و پی‌سازی، ویرایش چهارم، ۱۳۹۲.

Barbosa AR, Ashford SA, Mason HB, Belejo AF, "Assessment of soil arching factor for retaining wall pile foundations (No. ca16-2532)", California Department of Transportation Division of Engineering Services, 2017

Chen G, Zou L, Wang Q, Zhang G, "Pile-spacing calculation of anti-slide pile based on soil arching effect", Advances in Civil Engineering, 2020, 5 (6), 221-243.

Deb K "A mathematical model to study the soil arching effect in stone column-supported embankment resting on soft foundation soil", Applied Mathematical Modelling, 2010, 34 (12), 3871-3883.

Guo L, Li X, "Research on arch effect between anti-slide piles and soil pressure on pile sheet", In 2015



شکل ۸- تأثیر شعاع قوس بر تغییر شکل افقی

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر اجرای دیواره گودبرداری به شکل قوسی شکل بر پایداری و میزان تغییر شکل‌ها با مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی برای دو پروژه شهری در تهران مورد بررسی قرار گرفت. در مراحل مختلف عملیات گودبرداری، ابتدا تمام مقطع فشاری عمل می‌کنند و تنش فشاری اولیه کمی از تنش کششی حاصل خمش می‌کاهد که وابسته به عملکرد پوسته‌ای قوس دارد. نتایج این تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد.

به طور کلی اجرای دیواره گود با انحنای موجب ایجاد قوس زدگی شده باعث افزایش پایداری (ضریب ایمنی) و کاهش تغییر شکل‌ها

- International Conference on Management, Education, Information and Control, Atlantis Press, 2015.
- Hosseinian S, Seifabad MC, "Optimization the distance between piles in supporting structure using soil arching effect", *Optimization*, 2013, 3 (6), 386-391.
- Jiao YY, Zhang Y, Tan F, "Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering soil arching effects and intermediate principal stress", *International Journal of Geomechanics*, 2020, 20 (11), 201-217.
- King L, Bouazza A, Dubsky S, Rowe RK, Gniel J, Bui HH, "Kinematics of soil arching in piled embankments", *Géotechnique*, 2019, 69 (11), 941-958.
- Lai HJ, Zheng JJ, Cui MJ, Chu J, "Soil arching" for piled embankments: insights from stress redistribution behaviour of DEM modelling", *Acta Geotechnica*, 2020, 15 (8), 2117-2136.
- Lai HJ, Zheng JJ, Zhang RJ, Cui MJ, "Classification and characteristics of soil arching structures in pile-supported embankments", *Computers and Geotechnics*, 2018, 98, 153-171.
- Li Z, Lin W, Ye J, Chen Y, Bian X, Gao F, "Soil movement mechanism associated with arching effect in a multi-strutted excavation in soft clay", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 110, 103-116.
- Long YY, Tan Y, "Soil arching due to leaking of tunnel buried in water-rich sand", *Tunneling and Underground Space Technology*, 2020, 95, 103158.
- Ma ZT, Wang YP, Liang SJ, "Arching Effect of Anti-Slide Piles in Non-Cohesion Soil", In *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 170, 950-953.
- Rui R, Han J, Van Eekelen SJM, Wan Y, "Experimental investigation of soil-arching development in unreinforced and geosynthetic-reinforced pile-supported embankments", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2019, 145 (1), 101-113.
- Vermeer PA, Punlor A, Ruse N, "Arching effects behind a soldier pile wall", *Computers and Geotechnics*, 2001, 28 (6-7), 379-396.

EXTENDED ABSTRACT

The Effect of Arching Soil on the Stability and Deformation of Deep Urban Excavation

Saeed Ghaffarpour Jahromi*, Yasaman Dehghan Banadaki

Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran 1678815811, Iran

Received: 28 January 2017; Accepted: 07 April 2021

Keywords:

Excavation, Soil modeling, Stability analysis, Deformation, Arching soil.

1. Introduction

With the development of urbanization and the increasing development of high-rise structures, there is a definitive need for excavation with higher depths. The important matter to be considered in such cases is providing stability of the excavation to prevent any probable risk in the urban environments. Because of excavation, the soil as a bearing system removed, and consequently, the equilibrium of in-situ stresses in the soil mass and the between-granular stresses are disrupted. If this stress change exceeded the tolerance limit of the soil, the soil would be unstable and, the excavation collapse will be inevitable. Hence, one of the aims of engineers in the assessment of excavation is the stability analysis so that the safety factor must always be above one. In addition to stability analysis and due to the effect of excavation on the surrounding area, deformation and settlement analyses are also necessary for the urban areas (Chen et al, 2020).

2. Methodology

Soil nailing means the passive strengthening of the ground without applying pre-stress loads, which performed by the installation of steel elements or nails. Generally, it is recommended to drive nails into the soil with angles of 10 to 20 degree to the horizontal to use their maximum tensile capacity. To make continuity and involvement between soil and steel elements (nails), it used from cement grouting. A shotcrete layer is also sprayed on the excavation surface to prevent local falling of soil. Commonly, this technique is widely used in urban excavations (Fig. 1).

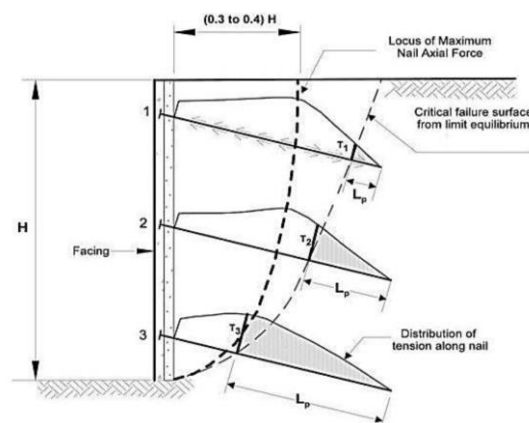


Fig. 1. The details of stabilization with soil nailing method

* Corresponding Author

E-mail addresses: saeed_ghf@sru.ac.ir (Saeed Ghaffarpour Jahromi), y_dehghan_b@yahoo.com (Yasaman Dehghan Banadaki).

On the expressing of the criterion of material failure at a certain level, in 1900 Coulomb had proposed a simple but very practical criterion that is a function of normal stress in the failure plane. In soil mechanics, this theory is expressed based on the theory of friction strength between soil particles and cohesion. For the expression of linear elastic behavior and plastic behavior of materials in the Mohr-Coulomb (MC) model, five main variables used. This model uses the combination of Hook's law and Coulomb failure criterion (Lai et al, 2018).

Hardening soil (HS) model is a powerful constitutive model to simulate the behavior of soft and hard soil types. From the main features of this model, it could mentioned the presence of two types of shear and compressive hardening as well as the non-constant failure surface of the model and its change with the increase in the plastic strains. As one of the main differences of the HS model with the MC model, the stiffness corresponded to stress level can mention. The main idea for the model's relations is the hyperbolic relation between axial strain and deviatoric stress in triaxial loading (Fig. 2).

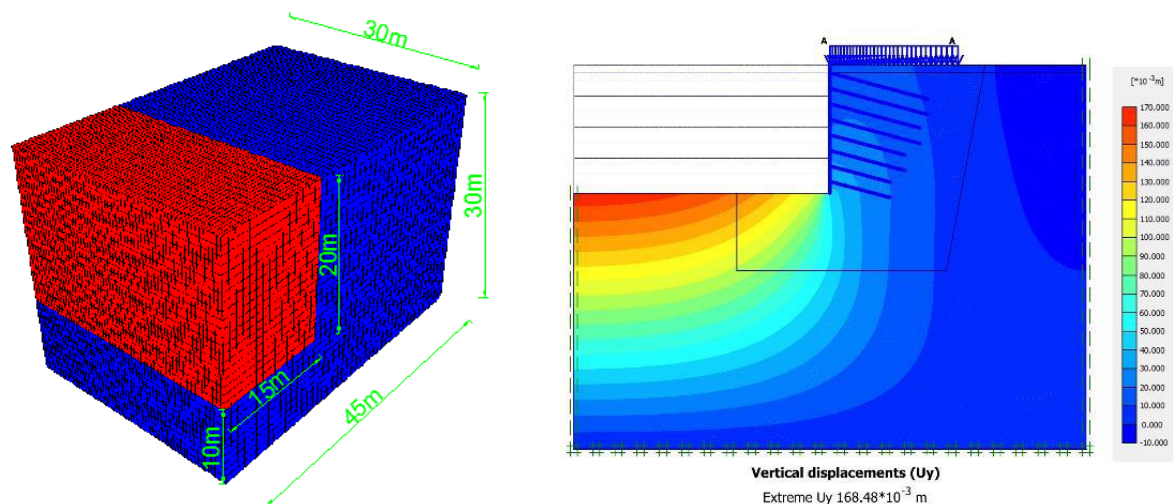


Fig. 2. Two-dimensional and three-dimensional modeling geometry

3. Validation of numerical model with case study

In the present study, the results of monitoring deformation using a micro-geodesy instrumentation during the excavation process and up to three months after the completion of excavation are available, which is used in validating this numerical analysis. In geodetic method, for monitoring a structure in two or more periods of time, a network of fixed points around the excavation is created. Then observations of length and angle used to determine the exact coordinates of these points.

Residual results from geodetic monitoring in urban excavations show that displacement is a nonlinear function of excavation depth, stabilization method and soil specification. Comparison of the results of numerical analysis with the track monitoring values for two points of harvesting in the fringe of the hole, which were stably steerable, as well as two points of harvest on the opposite front, which was stabilized by the Berlin wall method. The alignment of this point of withdrawal is at the zero level of the project and at the top of the track. This comparison shows that at all points of view, the results of numerical analysis with hardening behavior for soil are always closer to reality and better match with the results of monitoring (Fig. 3).

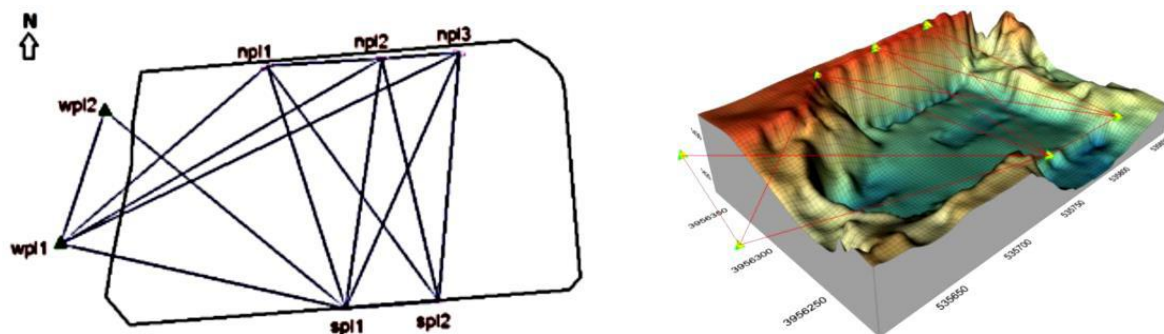


Fig. 3. Monitoring network points around the excavation and monitoring network points and observations (Ashourzadeh and Rostami, 2015)

4. Conclusions

Displacement analysis and deformation depend on various factors such as excavation geometry, soil properties, structure of stabilization and modeling method. In this paper, we try to analyze the displacement and stability of excavation in two different projects (case study) to investigate the effect of soil arching soil effect in different conditions. Also, the results of two-dimensional modeling are compared with the three-dimensional mode in simulated arching effects. FLAC3D, PLAXIS2D and GEOSLOPE software were used to analyze the stability and deformation of the excavation. The results show that a radius curvature in the wall of the excavation can increase the stability, reduce the deformation and by distributing stress and strain can effect on the coverage range of excavation.

5. References

- Ashurzadeh Y, Rostami A, "Using the geodetic method to monitor and investigate the horizontal and vertical displacement of the excavation wall", *Scientific-Promotional Journal of Mapping and Spatial Information Engineering*, 2015, 9-18.
- Chen G, Zou L, Wang Q, Zhang G, "Pile-spacing calculation of anti-slide pile based on soil arching effect", *Advances in Civil Engineering*, 2020, 5 (6), 221-243.
- Lai HJ, Zheng JJ, Zhang RJ, Cui MJ, "Classification and characteristics of soil arching structures in pile-supported embankments", *Computers and Geotechnics*, 2018, 98, 153-171.