

الله أكبر



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک

مدل سازی عددی پایداری گودبرداری های

ثبیت شده به وسیله گروه شمع

نگارنده:

عبدالرحمان تراب احمدی

استاد راهنما

دکتر رضا نادری

مهر ۱۳۹۹

ب

تقدیم اثر

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پربار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم، چراکه این دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستی‌ام بوده‌اند دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند.

تقدیم به وجود بارزشتان...

تشکر و قدردانی

این پژوهش، نتیجه حمایت‌های خاص عزیزانی است که بی‌تردید بدون پشتیبانی ایشان انجام آن ناممکن می‌نمود. از استاد محترم، جناب آقای دکتر رضا نادری به خاطر رهنمودهای ارزنده ایشان در راستای انجام این پژوهش و نیز از حسن اعتماد ایشان به اینجانب، تشکر می‌کنم.

از تمامی معلمین و اساتید دلسوزی که در تعلیم و تربیت اینجانب نقش داشته‌اند، نهایت سپاس و تشکر را داشته و امیدوارم که شاگردی شایسته برای آن عزیزان باشم.

همچنین جای دارد از خانواده عزیزم که همیشه برای من تکیه‌گاه و پشتیبانی مطمئن بوده‌اند، تشکر و قدردانی نمایم.

تعهدنامه

اینجانب **عبدالرحمان تراب احمدی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران گرایش ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع **مدل سازی عددی پایداری سازی گودبرداری های تثبیت شده به وسیله گروه شمع** تحت راهنمایی دکتر رضا نادری متعهد می شوم:

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

تاریخ:

امضا دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

امروزه با توجه به رشد روزافزون مناطق شهری و به منظور تأمین فضاهای زیرزمینی در کاربرد حمل و نقل و پارکینگ، نیاز به انجام گودبرداری‌های عمیق در مجاورت سازه‌های همسایه و یا در مجاورت مسیرهای حمل و نقلی می‌باشد. لذا برای افزایش ایمنی در هنگام گودبرداری می‌بایست از روش‌های جدید و رایج در پایدارسازی گود استفاده نمود. موضوع این تحقیق، تأکید بر پایدارسازی به روش استفاده از شمع دارد. استفاده از روشی که دارای سرعت انجام بالا و حداکثر پایداری را داشته باشد، از دیدگاه اجرایی ضروری به نظر می‌رسد با توجه به اهداف یادشده، استفاده از گروه شمع در پایدارسازی گودبرداری علاوه بر پایداری مؤثر، دارای سرعت اجرای بالا و نیز کارآمد بودن ستون‌های ایجادشده برای استفاده‌های عمرانی دیگر نظیر قرار دادن سقف زیرگذرها بر روی آن‌ها، می‌باشد.

تحقیق حاضر مبتنی بر محاسبات نرم‌افزاری به کمک روش حل عددی اجزا محدود و با استفاده از نرم‌افزار Abaqus است. پس از کنترل صحت مدل‌سازی و عملکرد نرم‌افزار، به مدل‌سازی عددی و بررسی پارامتریک عملکرد گودبرداری‌ها با سازه نگهبان شمع درجا در برابر بارهای وارده و نیز تغییر شکل سطح زمین، کف گودبرداری و دیواره پرداخته می‌شود. پارامترهای مورد مطالعه در این پژوهش بررسی تاثیر شاتکریت بین شمع‌ها، اجرای تیر کلاف در بالای شمع‌ها، عمق نفوذ شمع و فاصله محوری بین شمع‌ها در خاک ماسه‌ای می‌باشد. با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته شمع‌های نگهبان با فاصله محوری ۲/۵ برابر قطر شمع و عمق مدفون ۰/۴ برابر ارتفاع گود و همچنین اجرای تیر کلاف در بالا و شاتکریت در بین شمع‌ها از لحاظ عملکرد مناسب و از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه می‌باشد.

واژگان کلیدی: گودبرداری، شمع نگهبان، گروه شمع، پایدارسازی، مدل‌سازی عددی

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل ۱: مقدمه.....
۲	۱-۱. مقدمه.....
۳	۲-۱. بیان مسئله.....
۳	۳-۱. ضرورت انجام تحقیق.....
۴	۴-۱. هدف از انجام تحقیق.....
۴	۵-۱. روش تحقیق.....
۵	۶-۱. ساختار کلی پایان نامه.....
۷	فصل ۲: روش های گودبرداری.....
۸	۱-۲. مقدمه.....
۸	۲-۲. تعریف گودبرداری.....
۸	۳-۲. رفتار گودبرداری.....
۹	۴-۲. انواع روش های پایدارسازی گودبرداری.....
۹	۱-۴-۲. روش گودبرداری کاملاً باز.....
۱۰	۲-۴-۲. روش سازه های نگهبان وزنی.....
۱۱	۳-۴-۲. روش خرپایی.....
۱۳	۴-۴-۲. روش میخ کوبی.....
۱۶	۵-۴-۲. روش مهار متقابل.....
۱۷	۶-۴-۲. روش مهارسازی.....
۲۰	۷-۴-۲. روش دیواره دیافراگمی.....
۲۱	۸-۴-۲. روش سپر کوبی.....
۲۳	۹-۴-۲. روش ساخت بالا به پایین (Top - Down).....

۲۶	..... روش اجرای شمع ستونی
۳۲	..... جداره‌های مهاربندی شده توسط میکروپایل
۳۷	فصل ۳: روش‌های تحلیل گودبرداری‌ها و مروری بر تحقیقات پیشین
۳۸	..... ۱-۳. مقدمه
۳۸	..... ۲-۳. ارزیابی پایداری گودبرداری عمیق
۳۹	..... ۱-۲-۳. حالت گسیختگی
۳۹	..... ۲-۲-۳. تحلیل پایداری
۴۲	..... ۳-۳. معیار تسلیم فون مایسز
۴۳	..... ۴-۳. معیار گسیختگی موهر کولمب
۴۵	..... ۵-۳. روش‌های تحلیل
۴۵	..... ۶-۳. روش‌های تحلیلی برای نشست سطح زمین در اثر گودبرداری
۴۶	..... ۱-۶-۳. پک [۱۹]
۴۷	..... ۲-۶-۳. کلاف و همکاران [۲۰]
۴۸	..... ۳-۶-۳. کلاف و رورکه [۲۱]
۴۹	..... ۴-۶-۳. هسیه و اوو [۲۲]
۵۱	..... ۷-۳. مطالعات عددی
۵۲	..... ۸-۳. پیشینه موضوع پایداری به روش شمع نگهبان (مطالعات عددی صورت گرفته)
۵۲	..... ۱-۸-۳. پولوس و همکاران [۲۴]
۵۴	..... ۲-۸-۳. یحیی اوغلو و همکاران [۲۵]
۵۵	..... ۳-۸-۳. چانگ اویو و همکاران [۲۶]
۵۷	..... ۴-۸-۳. چانگ و همکاران [۲۷]
۵۹	..... ۵-۸-۳. مصطفی عبدو و همکاران [۲۸]
۶۵	فصل ۴: مدل‌سازی عددی گودبرداری
۶۶	..... ۱-۴. صحت سنجی

۶۶.....	۱-۱-۴. مقدمه.....
۶۶.....	۲-۱-۴. مدل سازی.....
۷۰.....	۳-۱-۴. مقایسه نتایج با مدل آقای عبدو و همکاران.....
۷۱.....	۲-۲-۴. مدل گودبرداری بدون شمع.....
۷۱.....	۱-۲-۴. هندسه مدل.....
۷۲.....	۲-۲-۴. تعریف مصالح.....
۷۲.....	۳-۲-۴. شرایط تماس، شرایط مرزی و المان بندی.....
۷۳.....	۴-۲-۴. نمایش تغییر شکل و جابجایی ناشی از گودبرداری.....
۷۶.....	۵-۲-۴. بررسی تنش افقی کل.....
۷۸.....	۳-۳-۴. مدل گودبرداری با شمع‌های نگهبان.....
۷۹.....	۱-۳-۴. تعریف مصالح.....
۷۹.....	۲-۳-۴. شرایط تماس، شرایط مرزی و المان بندی.....
۸۱.....	۳-۳-۴. نمایش تغییر شکل و جابجایی ناشی از گودبرداری.....
۸۴.....	۴-۳-۴. بررسی تنش و کرنش دیواره گود و شمع‌ها.....
۸۷.....	۴-۴. مدل گودبرداری با شمع و شاتکریت بین شمع‌ها.....
۸۸.....	۱-۴-۴. نمایش تغییر شکل و جابجایی.....
۹۰.....	۲-۴-۴. تنش و کرنش دیواره گود و شمع.....
۹۳.....	۵-۴. مدل گودبرداری با شمع نگهبان و تیر رابط در بالای شمع.....
۹۴.....	۱-۵-۴. نمایش تغییر شکل و جابجایی.....
۹۶.....	۲-۵-۴. توزیع تنش و کرنش.....
۹۹.....	۶-۴. مقایسه نتایج مدل‌ها.....
۹۹.....	۱-۶-۴. بررسی مدل‌های بیان شده در جابجایی دیواره گود در مسیر طول ضلع گود.....
۱۰۰.....	۲-۶-۴. بررسی جابجایی دیواره گود در مسیر عمق گود.....
۱۰۱.....	۳-۶-۴. بررسی کرنش در طول ضلع دیواره گود.....
۱۰۲.....	۴-۶-۴. بررسی کرنش‌ها در مسیر عمق دیواره گود.....

۷-۴. تاثیر مشخصات شمع نگهبان.....۱۰۳

۱-۷-۴. تاثیر عمق مدفون شمع۱۰۳

۲-۷-۴. بررسی تاثیر فاصله محوری بین شمع‌ها۱۰۷

فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....۱۱۱

۱-۵. نتیجه‌گیری۱۱۲

۲-۵. ارائه پیشنهادات.....۱۱۳

۱۱۵

مراجع

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۴۱.....	جدول ۱-۳. روابط ضریب اطمینان در برابر بالازدگی ارائه شده توسط ترزاقی ۱۹۴۳ و بیروم و اید۱۹۵۶
۶۷.....	جدول ۱-۴. مشخصات خاک.....
۶۷.....	جدول ۲-۴. مشخصات بتن - شمع.....
۶۸.....	جدول ۳-۴. مشخصات شیت پایل.....
۷۲.....	جدول ۴-۴. مشخصات خاک.....
۷۹.....	جدول ۵-۴. مشخصات بتن - شمع.....

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲. گودبرداری شیب‌دار.....	۱۰
شکل ۲-۲. گودبرداری به روش طره‌ای.....	۱۰
شکل ۳-۲. اجرای سازه نگهبان دیواره وزنی آجری.....	۱۱
شکل ۴-۲. مراحل اجرای گودبرداری به روش سازه نگهبان خرپایی.....	۱۲
شکل ۵-۲. پایدارسازی گودبرداری با روش خرپایی [۵].....	۱۲
شکل ۶-۲. دیوارهای حائل میخ‌کوبی شده [۵].....	۱۴
شکل ۷-۲. پایدارسازی گوه لغزش توسط میخ‌کوبی [۵].....	۱۵
شکل ۸-۲. نمونه‌هایی از پایدارسازی گود با روش مهار متقابل [۵].....	۱۷
شکل ۹-۲. موارد الزامی درباره فواصل انکرها [۷].....	۱۸
شکل ۱۰-۲. جزئیات انکر به صورت کامل [۷].....	۱۹
شکل ۱۱-۲. نحوه اجرای دیوار دیافراگمی [۶].....	۲۱
شکل ۱۲-۲. پایدارسازی گودبرداری با روش سپرکوبی [۸].....	۲۲
شکل ۱۳-۲. نمونه‌هایی از روش ساخت بالا به پایین [۵].....	۲۴
شکل ۱۴-۲. نمای کلی روش ساخت بالا به پایین.....	۲۵
شکل ۱۵-۲. نمایش قسمتی از عملیات اجرای شمع [۵].....	۲۶
شکل ۱۶-۲. دیاگرام بارهای وارده بر شمع درجا [۱۱].....	۲۷

- شکل ۲-۱۷. مراحل اجرای تیر رابط و گودبرداری [۱۱] ۲۸
- شکل ۲-۱۸. روند ساخت شمع‌های تراکمی در محل [۱۲] ۲۸
- شکل ۲-۱۹. شمع‌های جدا از هم ۲۹
- شکل ۲-۲۰. شمع‌های تانژانت [۱۳] ۳۰
- شکل ۲-۲۱. شمع‌های چسبیده به یکدیگر [۵] ۳۰
- شکل ۲-۲۲. شمع‌های سکانت ۳۱
- شکل ۲-۲۳. نحوه اجرای میکروپایل [۸] ۳۳
- شکل ۳-۱. توزیع فشار جانبی وارد بر شمع نگهبان در خاک ماسه‌ای ۳۹
- شکل ۳-۲. توزیع فشار جانبی وارد به شمع نگهبان در خاک رسی [۱۶] ۴۰
- شکل ۳-۳. اشکال مختلف ناپایداری دیوار [۸] ۴۰
- شکل ۳-۴. شکل هندسی گود و مقاومت برشی خاک، پارامترهایی جهت به دست آوردن ضریب اطمینان [۱۷] ۴۱
- شکل ۳-۵. ترسیم معیار فون مایسز و ترسکا در صفحه تنش‌های σ_1 و σ_3 ۴۲
- شکل ۳-۶. دایره موهر نشان‌دهنده رابطه (۴-۱) ۴۳
- شکل ۳-۷. ایده اصلی یک مدل الاستیک-پلاستیک [۱۷] ۴۴
- شکل ۳-۸. سطح تسلیم مدل موهر کولمب در فضای تنش‌های اصلی [۱۸] ۴۴
- شکل ۳-۹. معیار گسیختگی موهر کولمب و فون مایسز [۱۸] ۴۴
- شکل ۳-۱۰. نمودار محاسبه نشست ناشی از گودبرداری (پک، ۱۹۶۹) [۱۹] ۴۶

شکل ۳-۱۱. نمودار تخمین تغییر شکل جانبی سیستم‌های نگهدارنده گود در خاک رس [۲۰] ۴۸

شکل ۳-۱۲. پروفیل‌های محاسبه نشست سطح زمین، الف: ماسه، ب: رس‌های محکم تا بسیار محکم،

ج: رس‌های نرم تا متوسط (کلاف و رورکه، ۱۹۹۰) [۲۱] ۴۹

شکل ۳-۱۳. دو نوع پروفیل مختلف نشست [۲۲] ۵۰

شکل ۳-۱۴. پروفیل‌های محاسبه نشست زمین (هسیه و اوو ۱۹۹۸) [۲۲] ۵۰

شکل ۳-۱۵. پروفیل‌های محاسبه نشست زمین (هسیه و اوو ۲۰۱۱) [۲۳] ۵۱

شکل ۳-۱۶. پارامترهای خاک و شمع منفرد [۲۴] ۵۳

شکل ۳-۱۷. عوامل تأثیرگذار بر واکنش شمع [۲۴] ۵۳

شکل ۳-۱۸. تأثیر نیروی اعمال شده به شمع در برابر فاصله بین شمع‌ها [۲۵] ۵۴

شکل ۳-۱۹. اثر زاویه اصطکاک بر روی جابه‌جایی خاک بین شمع‌ها [۲۵] ۵۵

شکل ۳-۲۰. اثر زاویه اصطکاک بر بار اعمالی به شمع‌ها [۲۵] ۵۵

شکل ۳-۲۱. (الف): تأثیر پارامتر PSR در فاصله از لبه گود (ب): نحوه تعریف پارامتر Ir [۲۶] ۵۶

شکل ۳-۲۲. تأثیر پارامتر Ir در کاهش تغییر مکان [۲۶] ۵۶

شکل ۳-۲۳. قوس زدگی خاک لغزنده بین شمع [۲۷] ۵۷

شکل ۳-۲۴. تغییرات نسبت قوس زدگی با فاصله شمع‌ها [۲۷] ۵۷

شکل ۳-۲۵. تأثیر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون [۲۷] ۵۸

شکل ۳-۲۶. تأثیر چسبندگی خاک و زاویه اصطکاک خاک [۲۷] ۵۸

شکل ۳-۲۷. مدل پیشنهادی مصطفی عبدو و همکاران [۲۸]

الف) مدل گودبرداری و ساختمان همسایه (ب) مقطع افقی شمع‌ها و ورق شیت‌پایل ۵۹

- شکل ۳-۲۸. مش بندی سه بعدی مدل [۲۸] ۶۰
- شکل ۳-۲۹. نمودارهای تغییر مکان جانبی و لنگر خمشی شمع نگهبان [۲۸] ۶۰
- شکل ۳-۳۰. تغییر مکان جانبی شیت پایل [۲۸] ۶۱
- شکل ۳-۳۱. لنگر خمشی دیوار شیت پایل [۲۸] ۶۱
- شکل ۳-۳۲. نمودارهای تغییر مکان جانبی و لنگر خمشی شمع نگهبان [۲۸] ۶۲
- شکل ۳-۳۳. نمودارهای تغییر مکان جانبی و لنگر خمشی شیت پایل [۲۸] ۶۲
- شکل ۳-۳۴. نمودارهای تغییر مکان جانبی و لنگر خمشی شمع نگهبان [۲۸] ۶۳
- شکل ۳-۳۵. نمودارهای تغییر مکان جانبی و لنگر خمشی شیت پایل [۲۸] ۶۳
- شکل ۴-۱. هندسه مدل گود با شمع و شیت پایل ۶۷
- شکل ۴-۲. المان بندی مدل ۶۹
- شکل ۴-۳. المان بندی شمع و شیت پایل ۶۹
- شکل ۴-۴. المان بندی مدل پس از اعمال سربار ۶۹
- شکل ۴-۵. مقایسه نتایج حاصل از مدل صحت سنجی (سمت راست) با مدل آقای عبدو (سمت چپ) ۷۰
- شکل ۴-۶. مقایسه جابجایی ورق شیت پایل در مدل صحت سنجی (سمت راست) و مدل آقای عبدو (سمت چپ) ۷۱
- شکل ۴-۷. هندسه مدل گود بدون شمع نگهبان ۷۲
- شکل ۴-۸. نمایش المان بندی بلوک خاک ۷۳
- شکل ۴-۹. کانتور تغییر شکل پس از گودبرداری (مدل بدون شمع) ۷۴

- شکل ۴-۱۰. کانتورهای جابجایی افقی و قائم (مدل بدون شمع)..... ۷۴
- شکل ۴-۱۱. بررسی تاثیر عمق (نمودار چپ) و فاصله از کناره گود (نمودار راست) در جابجایی دیواره
..... ۷۵
- شکل ۴-۱۲. نمایش کانتورهای تنش افقی در راستای محور y ۷۶
- شکل ۴-۱۳. تنش در راستای محور y برای بررسی عمق..... ۷۷
- شکل ۴-۱۴. نمایش کانتور کرنش اصلی در راستای محور y ۷۷
- شکل ۴-۱۵. کرنش اصلی در راستای محور y برای بررسی عمق..... ۷۸
- شکل ۴-۱۶. هندسه مدل گود با شمع نگهبان..... ۷۹
- شکل ۴-۱۷. المان بندی بلوک خاک و شمع..... ۸۰
- شکل ۴-۱۸. کانتور تغییر شکل پس از گودبرداری (مدل با شمع)..... ۸۱
- شکل ۴-۱۹. کانتور تغییر مکان افقی دیواره گود (مدل با شمع)..... ۸۲
- شکل ۴-۲۰. کانتور تغییر مکان افقی شمع‌های نگهبان..... ۸۲
- شکل ۴-۲۱. کانتور تغییر مکان قائم گود (مدل گود با شمع)..... ۸۳
- شکل ۴-۲۲. نمودار جابجایی در طول ضلع (سمت راست) و در ارتفاع گود (سمت چپ) در راستای y
..... ۸۴
- شکل ۴-۲۳. نمایش توزیع تنش فون مایسز دیواره گود در راستای محور y ۸۵
- شکل ۴-۲۴. نمایش توزیع تنش فون مایسز شمع‌های نگهبان در راستای محور y ۸۵
- شکل ۴-۲۵. نمایش کانتور کرنش افقی دیواره گود پس از گود برداری..... ۸۶
- شکل ۴-۲۶. نمایش کانتور کرنش افقی شمع‌های نگهبان پس از گود برداری..... ۸۶

- شکل ۴-۲۷. هندسه مدل گود با شمع نگهبان و شاتکریت بین شمع‌ها..... ۸۷
- شکل ۴-۲۸. کانتور تغییر مکان افقی دیواره گود (مدل با شمع و شاتکریت)..... ۸۸
- شکل ۴-۲۹. کانتور تغییر مکان افقی شمع‌های نگهبان..... ۸۹
- شکل ۴-۳۰. جابجایی در مسیر عمق (سمت چپ) و طول ضلع دیواره (سمت راست) در راستای Y ۸۹
- شکل ۴-۳۱. نمایش توزیع تنش فون مایسز دیواره گود..... ۹۰
- شکل ۴-۳۲. نمایش توزیع تنش فون مایسز در شمع‌ها (مدل با شمع و شاتکریت)..... ۹۱
- شکل ۴-۳۳. کانتور کرنش دیواره گود در راستای محور Y ۹۲
- شکل ۴-۳۴. کانتور کرنش شمع‌های نگهبان در راستای محور Y ۹۲
- شکل ۴-۳۵. هندسه مدل گود با اجرای تیر رابط در بالای شمع‌ها..... ۹۳
- شکل ۴-۳۶. امان بندی بلوک خاک و شمع و تیر کلاف..... ۹۴
- شکل ۴-۳۷. کانتور تغییر مکان افقی دیواره گود (مدل با سرشمع) ۹۵
- شکل ۴-۳۸. کانتور تغییر مکان افقی شمع‌های نگهبان..... ۹۵
- شکل ۴-۳۹. نمایش جابجایی در مسیر عمق گود (سمت راست) و لبه بالایی ضلع بزرگ‌تر گود (سمت چپ) در راستای محور Y ۹۶
- شکل ۴-۴۰. نمایش کانتور تنش افقی دیواره در راستای محور y ۹۷
- شکل ۴-۴۱. نمایش کانتور تنش افقی دیواره گود در راستای محور y ۹۷
- شکل ۴-۴۲. کانتور کرنش دیواره گود در راستای محور Y (مدل با سرشمع)..... ۹۸
- شکل ۴-۴۳. کانتور کرنش شمع‌های نگهبان در راستای محور Y (مدل با سرشمع) ۹۸

- شکل ۴-۴۴. جابجایی در راستای عمود بر ضلع گود در مسیر طول ضلع دیواره برای مدل‌های بیان شده
 ۹۹.....
- شکل ۴-۴۵. جابجایی در راستای عمود بر ضلع گود در مسیر عمق دیواره برای مدل‌های بیان شده
 ۱۰۰.....
- شکل ۴-۴۶. کرنش در راستای عمود بر ضلع گود در مسیر طول ضلع دیواره..... ۱۰۱
- شکل ۴-۴۷. کرنش در راستای عمود بر ضلع گود در مسیر عمق دیواره..... ۱۰۲
- شکل ۴-۴۸. کانتورهای جابجایی افقی دیواره گود و شمع‌ها در سه حالت عمق مدفون
 الف- $0/2H$ و ب- $0/4H$ و ج- $0/6H$ ۱۰۵
- شکل ۴-۴۹. تغییر شکل افقی شمع با تغییر عمق مدفون شمع..... ۱۰۶
- شکل ۴-۵۰. کانتورهای جابجایی افقی دیواره گود و شمع‌ها در سه حالت فاصله محوری
 الف- $d = 1/5$ و ب- $d = 2/5$ و ج- $d = 4$ ۱۰۸
- شکل ۴-۵۱. تغییر شکل افقی شمع با تغییر فاصله محوری بین شمع‌ها..... ۱۰۹

فصل ۱

مقدمه

۱-۱. مقدمه

در بسیاری از پروژه‌های ساختمانی لازم است در زمین، گود ایجاد شود. این گودبرداری ممکن است به دلایل زیر در یک پروژه ایجاد شود:

۱. رسیدن به تراز مناسب جهت احداث پی

۲. افزایش قیمت زمین و لزوم تأمین پارکینگ و یا محدودیت ارتفاع

۳. احداث کانال‌ها، مخازن زیرزمینی و غیره

به علت محدودیت ابعاد زمین‌های داخل شهر، اکثر گودبرداری‌ها به شکل قائم اجرا می‌شوند و غالباً امکان رعایت شیب پایدار دیواره‌های گود وجود ندارد. بر این اساس این گودبرداری‌ها با مشکل پایداری دیواره‌ها، در طول مراحل خاک‌برداری مواجه می‌شوند. یکی از مهم‌ترین مشکلات و دغدغه‌های موجود در رشته مهندسی عمران، احداث سازه‌ها، حفاظت از گودبرداری و ساختمان‌های موجود در مجاورت آن می‌باشد و در صورتی که روش‌های مناسب به‌منظور حفاظت گودها و همچنین شیب‌های در حال احداث بکار گرفته نشود، منجر به خسارت جبران‌ناپذیری خواهد گردید و مخاطرات به وجود آمده ناشی از نشست‌های احتمالی و کاهش ظرفیت باربری و تغییر مکان‌های جانبی باعث ایجاد ترک در سازه‌های مجاور گود خواهد شد. [۱]

گودبرداری‌های عمیق به‌ویژه هنگامی که در مناطق شهری پرازدحام ساخته می‌شوند به طراحی و برنامه‌ریزی دقیقی احتیاج دارند. انتخاب و طراحی سیستم نگهداری و پشتیبانی مناسب از زمین می‌تواند تأثیر بسزایی در هزینه، زمان و عملکرد داشته باشد. انواع مختلفی از سیستم‌های مهاربندی وجود دارد که انتخاب سیستم پشتیبانی مناسب بستگی به طیف وسیعی از عوامل مانند مشخصات خاک، شرایط اقتصادی، حفاظت از سازه‌های مجاور، مسائل زیست‌محیطی، سهولت ساخت و موارد دیگر دارد.

۱-۲. بیان مسئله

یکی از روش‌های گودبرداری در مناطق شهری استفاده از ردیف‌های شمع‌های بتنی به صورت پیش ساخته یا اجرای در محل می‌باشد. این ردیف‌های شمعی مانند دیوار نگهبان عمل می‌کند. در این روش پیرامون زمینی که قرار است حفاری شود، شمع‌های بتنی درجا در فواصل معینی نسبت به یکدیگر اجرا می‌شود. برای ساخت این شمع‌ها نخست خاک، حفاری می‌شود و تسلیح فولادی در حفره قرار داده می‌شود. سپس داخل حفره را با بتن پر می‌کنند. این شمع‌ها فشار جانبی خاک را به صورت تیر یکسر گیردار تحمل می‌کنند. سپس خاک‌برداری را تا نزدیکی محل اجرای شمع‌ها تا عمق موردنظر می‌توان انجام داد. [۲]

شمع‌ها معمولاً در مهندسی ژئوتکنیک به عنوان سازه‌ای برای انتقال بارمحوری به لایه‌های زیرین و یا تحمل بارهای جانبی و لنگر خمشی وارد به شمع کاربرد دارند اما در بعضی از موارد در قالب شمع‌های نگهبان، جهت پایدارسازی گود مورد استفاده قرار می‌گیرند. شمع در این حالت با استفاده از مقاومت برشی خود در مقابل نیروها مقاومت می‌کند و این عملکرد کاملاً با عملکرد مهارها و نیلینگ‌ها متفاوت است. در تحقیق حاضر تلاش می‌شود نقش شمع‌های نگهبان جهت پایدارسازی گود در کنترل تغییر شکل وارده به آن و جابجایی‌های خاک مورد ارزیابی قرار گیرد.

۱-۳. ضرورت انجام تحقیق

به علت محدودیت ابعاد زمین در مناطق شهری، اکثر گودبرداری‌ها به شکل قائم اجرا می‌شود و غالباً امکان رعایت شیب پایدار دیواره‌های گود وجود ندارد. هنگامی که زمین، به صورتی خاک‌برداری گردد که جداره‌های آن قائم یا نزدیک به قائم باشد، در تنش‌های زمین تغییراتی ایجاد می‌شود که نتیجه آن تغییر شکل و ناپایداری دیواره گود است که در صورت عدم رعایت روش‌های مناسب به منظور حفاظت

گودهای در حال اجرا، منجر به ایجاد خسارت به سازه‌های مجاور، تخریب تأسیسات شهری، خسارت به معابر شهری و تلفات جانی غیرقابل جبران می‌شود. با توجه به لزوم ایمنی گودبرداری‌های ایجادشده در مناطق مسکونی، استفاده از روش‌های ایمن، اقتصادی و اجرایی موردتوجه مهندسان قرار گرفته است و راهکارهای متعددی با توجه به مشخصات مصالح بستر و موقعیت اجرایی گودبرداری گسترش یافته‌اند. استفاده از شمع‌های نگهبان در پایدارسازی گودها یکی از روش‌های مرسوم و مقرون‌به‌صرفه است که در سال‌های اخیر در پروژه‌های عمرانی استفاده شده است. [۳]

۴-۱. هدف از انجام تحقیق

با توجه به پارامترهای مختلف و گوناگونی که بر عملکرد گودبرداری پایدار شده با استفاده از شمع‌های درجا تأثیر می‌گذارد، بررسی و مطالعه رفتاری دیوارهای قائم تثبیت‌شده با شمع درجا دارای پیچیدگی گسترده می‌باشد. مرور ادبیات فنی نشان می‌دهد که تحقیقات اندکی در این زمینه صورت گرفته است. در این تحقیق سعی شده است عملکرد روش شمع درجا در گودبرداری شهری با استفاده از مدل‌سازی اجزاء محدود موردبررسی و تأثیر پارامترهایی نظیر عمق مدفون و فاصله محوری شمع‌ها و همچنین تأثیر شاتکریت در بین شمع‌ها و تیر رابط در بالای شمع‌ها مورد مطالعه قرار گیرد.

۵-۱. روش تحقیق

با توجه به اینکه جابجایی خاک ناشی از گودبرداری در واقعیت به صورت سه‌بعدی می‌باشد، جهت مدل‌سازی و تحلیل گود و شمع‌های نگهبان از محیط سه‌بعدی نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus/CAE استفاده شده است. ترتیب روند تحلیل به این صورت است که: ابتدا و در گام اول خاک به تنهایی و تحت تنش‌های ژئواستاتیکی مدل می‌شود. سپس اعضای قائم سازه نگهبان کار گذاشته می‌شوند و پس‌از آن

تحلیل عددی گودبرداری انجام می‌شود.

خلاصه‌ای از کل مراحل مدل‌سازی و تحلیل عددی به ترتیب زیر در نظر گرفته شده است:

۱. انتخاب محدوده مناسب برای مدل و تعدیل واحدها
۲. مدل‌سازی توده خاک و اجزای سازه نگهبان
۳. تعریف مشخصات برای مصالح مختلف و انتخاب مدل رفتاری مناسب و تعیین پارامترهای آن
۴. جایگذاری و سرهم کردن اجزای مختلف مدل در فضای تحلیلی نرم‌افزار
۵. تعریف مراحل گودبرداری، حذف و فعال‌سازی اجزای مختلف به صورت مرحله‌ای و متناسب با مراحل گودبرداری
۶. تعریف اندرکنش‌ها و قیود مناسب بین اجزای مدل
۷. اعمال شرایط مرزی و تنش‌های اولیه به مدل
۸. انتخاب نوع المان و مش بندی
۹. تحلیل مدل توسط نرم‌افزار
۱۰. ارائه‌ی نتایج و بررسی آن

۱-۶. ساختار کلی پایان‌نامه

در راستای دستیابی به اهداف عنوان شده در بخش قبل این پایان‌نامه در پنج فصل به شرح زیر تدوین شده است:

فصل اول شامل مقدمه که در آن تعاریف کلی و اهداف پایان‌نامه مشخص می‌گردد.

در فصل دوم، انواع روش‌های گودبرداری و سازه نگهبان، به همراه کاربردها و مزایا و معایب آن‌ها بیان می‌شود. در این فصل روش‌های مختلف پایدارسازی گود نظیر روش مهارسازی، دوخت به پشت،

سپرکوبی، اجرای شمع درجا، میکروپایل و ... مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

در فصل سوم به تحلیل پایداری گودبرداری، روش‌های تحلیل و مروری بر روش اجزای محدود و مسائلی در مورد تغییر شکل دیواره گود، به‌طور کلی بیان می‌شود و در ادامه، تحقیقات و پژوهش‌های پیشین انجام‌شده در مورد پایداری گود با شمع نگهبان، بیان می‌گردد.

در فصل چهارم ابتدا به صحت سنجی مدل‌سازی در پایان‌نامه پرداخته خواهد شد و در ادامه فصل، یک گود پایدار شده به‌وسیله شمع‌های نگهبان به‌صورت سه‌بعدی مدل می‌شود سپس مطالعات پارامتریک با نرم‌افزار Abaqus در خاک ماسه‌ای انجام می‌گیرد و در نهایت تغییر مکان افقی گود و شمع نگهبان و نتایج پارامترهای بررسی‌شده در هر حالت بر روی نمودار آورده شده و مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل پنجم نتایج حاصل از این پژوهش ارائه‌شده است و در پایان پیشنهادهایی جهت ادامه تحقیقات ارائه‌شده است.

فصل ۲

روش‌های گودبرداری

۲-۱. مقدمه

در این فصل ابتدا رفتار گودبرداری و سپس روش‌های مختلف گودبرداری ذکر می‌شود، همچنین انواع سازه‌های نگهبان در ادامه معرفی می‌گردد.

۲-۲. تعریف گودبرداری

بنا به تعریف مهندسی، به هرگونه حفاری و خاک‌برداری در تراز پایین‌تر از سطح زمین یا تراز پایین‌تر از زیر پی ساختمان مجاور گودبرداری گفته می‌شود. امروزه به دلیل افزایش روزافزون احداث سازه‌های بلند و نیاز به پارکینگ در طبقات پایین‌تر از سطح زمین در این ساختمان‌ها، تعداد گودبرداری‌ها به‌خصوص گودبرداری‌های عمیق و نیمه عمیق رو به افزایش است.

گودبرداری به چند منظور انجام می‌شود که از دلایل اصلی آن می‌توان به رسیدن عمق و خاک مقاوم اشاره کرد. [۴]

۲-۳. رفتار گودبرداری

گسیختگی یک گودبرداری عمیق می‌تواند خیلی خطرناک باشد. خطرات ناشی از تخریب امنیت جانی افراد درون گود را به خطر می‌اندازد و آسیب جدی به ساکنین ساختمان‌های مجاور و سازه‌های موجود در مجاورت گودبرداری وارد می‌شود. تغییر شکل‌های ناشی از گسیختگی گودبرداری عمیق محدوده وسیعی از ساختمان‌های مجاور گودبرداری و سازه‌های موجود بر روی آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. گودبرداری‌ها برای پایداری و تغییر شکل محدود و مشخص طراحی می‌شوند بنابراین می‌توان گفت که پایداری یک گودبرداری عمیق بسیار حائز اهمیت است و در نتیجه تحلیل پایداری یکی از مراحل مهم

طراحی گودبرداری‌های عمیق را تشکیل می‌دهد.

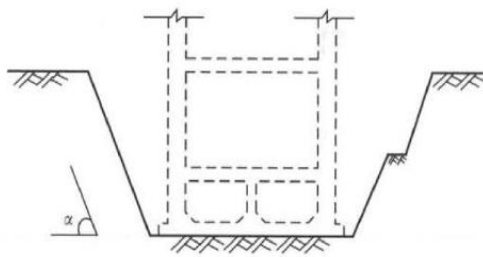
بنابراین مشخص می‌شود که یک گودبرداری پایدار، گودبرداری است که دیواره‌ی آن دچار گسیختگی نشده، در کف دچار تورم غیرقابل کنترل نگردد و تغییر شکل در زمین‌های مجاور دیواره‌ی گود در محدوده‌ی مجاز قرار گیرد.

۲-۴. انواع روش‌های پایدارسازی گودبرداری

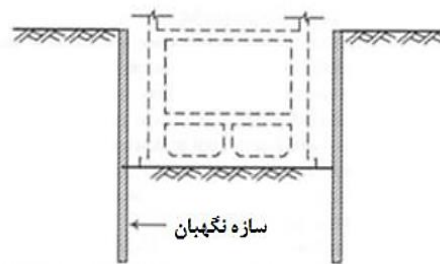
گودبرداری‌ها از نظر پایداری به دو گروه کلی حفاظت‌شده یا مهاربندی‌شده و حفاظت نشده یا مهاربندی نشده تقسیم می‌شوند. باید توجه داشت در گودبرداری‌های حفاظت نشده پایداری شیب‌ها یا جداره‌های قائم گودبرداری‌ها، صرفاً توسط مشخصات مکانیکی خاک تأمین می‌شوند. انواع روش‌های معمول گودبرداری برحسب پایداری را می‌توان به صورت زیر بیان نمود.

۲-۴-۱. روش گودبرداری کاملاً باز

این روش گودبرداری را می‌توان به دو روش شیب‌دار و طره‌ای تقسیم نمود. در روش شیب‌دار، احتیاجی به دیوار نگهدارنده و نگه‌دارنده‌ها نیست و گود با جداره‌های شیب‌دار اجرا می‌گردد. اگر عمق گود زیاد نباشد، این روش هزینه بسیار کمی دارد. شکل ۱-۲ این نوع گودبرداری را نشان می‌دهد. در گودبرداری‌های کاملاً باز به روش طره‌ای، از دیوار نگهدارنده طره‌ای برای پایدار نگاه‌داشتن گود استفاده می‌گردد. در این روش سختی دیوار نگهدارنده سبب پایداری گود می‌شود و از قیده‌های فشاری و کششی استفاده نمی‌گردد. در شکل ۲-۲ روش طره‌ای نشان داده شده است. [۲]



شکل ۱-۲. گودبرداری شیب‌دار



شکل ۲-۲. گودبرداری به روش طره‌ای

۲-۴-۲. روش سازه‌های نگهدار وزنی

در بسیاری از پروژه‌های ساختمانی در صورتی که عمق گودبرداری کم باشد (تا حدود ۴ متر) به جهت صرفه‌جویی در هزینه‌های سازه‌های نگهدار از شیوه‌های سنتی دیواره‌های وزنی آجری (منبری) استفاده می‌شود. در این روش ابتدا خاک‌برداری با شیب پایدار انجام می‌شود. سپس در بدنه شود و در محل اجرای دیوار وزنی آجری به ضخامت مشخص و محاسبه‌شده شیپارهایی اجرا می‌شود. سپس در محل شیپارها، دیوار آجری با ملات ماسه سیمان به صورت پله‌ای اجرا می‌گردد. در حین چیدن دیوارهای منبری برای نگهداری خاک بین منبری‌ها، در محل‌های از پیش مشخص شده سوراخ‌هایی جهت عبور پروفیل تعبیه می‌گردد. دیوار وزنی، شکاک بین منبری‌ها به صورت مرحله‌ای برداشته می‌شود. برای نگهداری خاک بین منبری‌ها در ارتفاع‌های مشخص پروفیل قرار داده‌شده و سپس خاک‌برداری انجام می‌شود. در صورت عدم اجرای صحیح سازه نگهدار وزنی و یا عدم انجام محاسبات درست، امکان ریزش خاک پشت

دیواره گود به همراه ساختمان‌های مجاور آن وجود دارد. نمونه‌هایی از اجرای این روش، در شکل ۲-۳ نشان داده شده است [۲].

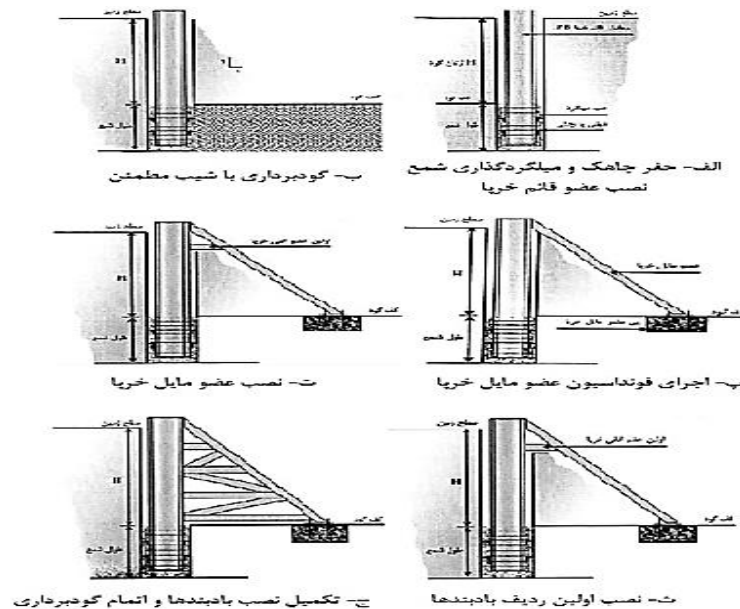


شکل ۲-۳. اجرای سازه نگهدار دیواره وزنی آجری

۲-۴-۳. روش خرپایی

این روش متداول‌ترین روش اجرای سازه‌های نگهدار در مناطق شهری است و اجرای آن ساده بوده و به تخصص بالایی نیز نیاز ندارد. در این روش ابتدا چاه‌هایی در کنار گود در فواصل مشخص و محاسبه شده حفر می‌گردد پس از حفاری چاه‌ها، قسمت انتهایی چاه با عمق مشخص آرماتوربندی شده و سپس عضو قائم خرپا درون چاه قرار داده می‌شود. سپس در قسمت انتهایی چاه با عمق مناسب بتن‌ریزی صورت می‌گیرد. عمق این چاه‌ها و عمق بتن‌ریزی انتهایی چاه باید به گونه‌ای باشد که قسمت انتهایی چاه‌ها بتواند پس از بتن‌ریزی کشش ایجاد شده در سیستم را تحمل نمایند. پس از این مرحله، خاک‌برداری با شیب پایدار برداشت می‌گردد. در کف گود، فونداسیون جهت اتصال عضو مورب خرپا با ابعاد مشخص طبق محاسبات اجرا می‌گردد. سپس عضو مورب خرپا با شیب مناسب به فونداسیون اجرا شده در کف گود متصل می‌شود. در ادامه خاک‌برداری به صورت مرحله‌ای تا انتهای گودبرداری انجام شده و در هر مرحله اعضای دیگر خرپا اجرا می‌شوند. پس از اتمام گودبرداری و اجرای خرپاها، جهت جلوگیری از کمانش عضوهای خرپا و کل سیستم خرپایی، باید عضوهای مورب خرپا به وسیله تیرهای افقی و بادبندها

در فواصل مشخص و محاسبه شده مهار شوند. مراحل اجرای خرابای مورب در شکل ۲-۴ نشان داده شده است [۸].



شکل ۲-۴. مراحل اجرای گودبرداری به روش سازه نگهبان خرابایی

ذکر این نکته ضروری است که در مراحل اجرای خاکبرداری و احداث خرابا، جهت جلوگیری از ریزش خاک بین خراباها، اعضای مناسب بین خراباها قرار داده شود. این موضوع به خصوص در گودبرداری زمین‌های با خاک‌های دانه‌ای حائز اهمیت بیشتری است. نمونه‌هایی از سیستم سازه‌های نگهبان ساخته شده به روش خرابایی در شکل ۲-۵ نشان داده شده است.



شکل ۲-۵. پایدارسازی گودبرداری با روش خرابایی [۵]

در بسیاری از پروژه‌ها جهت تسریع در عملیات گودبرداری و احداث سازه نگهبان، ابتدا محل اجرای پروژه با شیب پایدار و معمولاً به صورت پله‌ای حفاری می‌شود. برای نصب خرپاها به وسیله بیل مکانیکی در دیواره گود شیپ‌هایی ایجاد شده و سپس برای نصب خرپاها، در محل شیپ‌های ایجاد شده، چاه حفاری و سپس آرماتور گذاری می‌گردد. سپس خرپای ساخته شده در محل چاه حفاری شده نصب و بتن‌ریزی چاه اجرا می‌گردد و عضو مورب خرپا نیز به فونداسیون اجرا شده متصل می‌شود.

مزایای روش خرپایی عبارت‌اند از:

- ۱- برای عموم گودهای واقع در مناطق شهری مناسب است.
- ۲- از نظر اجرا در شرایط مختلف، قابلیت انعطاف زیادی دارد.
- ۳- امکان استفاده‌ی مجدد از خرپا وجود دارد.
- ۴- ساده است و به تخصص دستگاه‌های خاص نیاز ندارد.

معایب روش خرپایی نیز عبارت‌اند از:

- ۱- سرعت اجرا، در مقایسه با روش‌های پیشرفته‌تر نسبتاً کمتر است.
- ۲- خرپاها فضای زیادی را اشغال می‌کنند.
- ۳- احتمال الزامی بودن برداشتن بخشی از خاک با روش‌های دستی موجود

۲-۴-۴. روش میخ‌کوبی

میخ‌کوبی یا نیلینگ روش خلاقانه مهندسی استرالیایی بود که در حدود دهه ۶۰ میلادی جهت پایدارسازی جدار تونل بکار گرفته شد. استفاده از میخ‌کوبی به‌طور گسترده در طرح‌های مختلف عمرانی نظیر تثبیت ترانشه‌های خط آهن و بزرگراه‌ها، ساخت سازه‌های نگهبان گودبرداری شده در مناطق شهری جهت احداث ساختمان‌های بلندمرتبه که شامل چندین طبقه در داخل زمین هستند و تثبیت

شیب‌های زمین در برابر لغزش‌های احتمالی به کار بسته می‌شود.

میخ‌کوبی دیواره‌ها به معنای تسلیح برجای خاک موجود با نصب میلگردهای فولادی نزدیک به هم (Nail) در یک سطح شیب‌دار با شیب ملایمی در حدود ۱۰ تا ۲۰ درجه در زیر سطح افق یا در محل گودبرداری و با اجرای از بالا به پایین می‌باشد. در این روش اجرایی، میخ‌ها در هنگام بهره‌برداری تحت تنش‌های کششی قرار گرفته و پایداری دیوار را تأمین می‌کنند. در شکل ۲-۷ نمونه‌ای از دیوار حائل میخ‌کوبی شده را نشان داده شده است.



شکل ۲-۶. دیوارهای حائل میخ‌کوبی شده [۵]

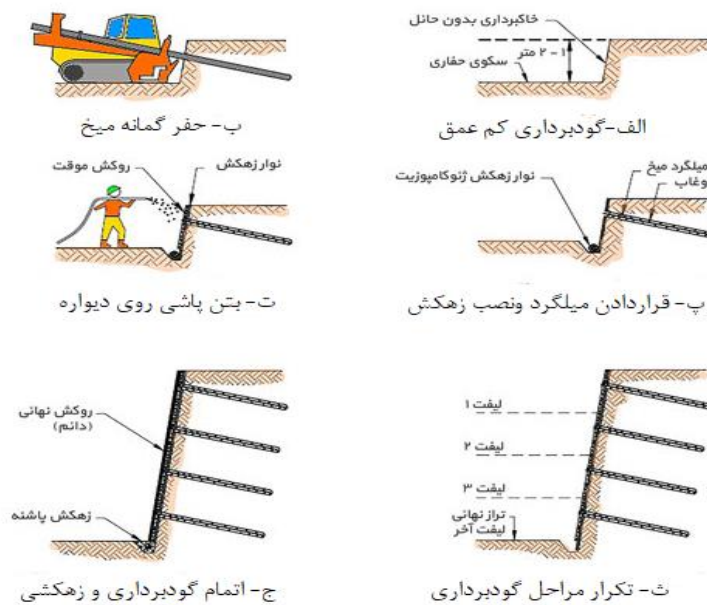
فلسفه اصلی روش میخ‌کوبی بر مبنای پایداری سازی گوه لغزش به وسیله نیل‌ها استوار است. به طوری که سطح شکست و فروپاشی در خاک‌های با دانه‌بندی مختلط به صورت گوه خواهد بود. لذا به وسیله میخ‌ها (نیل‌ها) این گوه به حجم پشتی خاک دوخته می‌شود و بر این اساس این گوه پایدار خواهد گردید. میلگردها معمولاً داخل گمانه‌هایی که در دیواره خاکی ایجاد شده و توسط دوغاب سیمان با هدف جلوگیری از خوردگی میلگردها و همچنین انتقال مناسب‌تر نیروها بین خاک و میلگرد پر می‌شوند، قرار می‌گیرند. این عملیات یک مقطع مسلح پایدار ایجاد می‌کند که توانایی نگهداری خاک پشت خود را دارد. این مسلح سازی به صورت Passive عمل کرده و اثر خود را از طریق اندرکنش خاک-میلگرد حاصل از ایجاد تغییر شکل در خاک، اعمال می‌کند میخ‌ها (نیل‌ها) غالباً در کشش عمل می‌کنند ولی در شرایط خاصی، عملکرد خمشی و برشی آنها نیز در نظر گرفته می‌شود.

اثر مسلح سازی برای بهبود پایداری با دو عملکرد زیر حاصل می شود:

۱- افزایش نیروی قائم و در نتیجه مقاومت برشی در سطح لغزش، در خاک های اصطکاکی.

۲- کاهش نیروی رانشی در سطح لغزش در خاک های اصطکاکی و چسبنده.

پس از نصب میلگردها، یک دیواره سطحی کم ضخامت که معمولاً شامل شاتکریت با تسلیح سبک می باشد، سطح دیواره شیروانی یا گود را می پوشاند. ضخامت دیواره شاتکریت شده نیز مابین ۱۰ الی ۱۵ سانتیمتر خواهد بود. هدف از اجرای این دیواره جلوگیری از فرسایش سطحی خاک، ایجاد سطح تمام شده مناسب تر برای ساخت وسازهای احتمالی بعدی، ایجاد لایه محافظ و یکپارچه و در نتیجه پخش یکنواخت نیروی عکس العمل و افزایش بازدهی عملکرد سیستم خاک تحکیم یافته به ویژه در بخش های نزدیک به دیواره گود می باشد. در شکل ۲-۸ مراحل اجرای روش میخ کوبی به طور شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۲-۷. پایدارسازی گوه لغزش توسط میخ کوبی [۵]

دیوارهای میخکوبی شده می توانند به دو صورت موقت یا دائمی اجرا شوند. میخ کوبی های موقت بسته به نوع خاک و طرح و اجرا دارای طول عمر سرویس کمتر از ۱۸ ماه هستند. سازه های میخ کوبی شده ی

دائم طول عمر بیشتر از این مقدار دارند. چنانچه یک گودبرداری توسط دیوارهای میخ‌کوبی شده‌ی موقت مسلح شود، اما به دلیل تأخیرات کارگاهی طول مدت ساخت بیشتر از ۱۸ ماه طول بکشد، عوامل اجرایی موظف هستند از یک سیستم نگهداری دائمی برای تثبیت گودبرداری استفاده کنند. در این روش سوراخ‌هایی در داخل زمین حفاری شده و سپس میلگردهای فولادی در آن کار گذاشته شده و فضای خالی حفره را با دوغاب پر می‌کنند. روش پیشنهادی به منظور اجرای نیلینگ جهت پایدارسازی دیواره گودها معمولاً مشتمل بر ۵ مرحله اصلی خاک‌برداری، حفاری گمانه‌ها، نصب میلگرد تسلیح، تزریق دوغاب سیمان، بتن پاشی و نصب صفحه و مهره می‌باشد. پس از تکمیل مراحل اجرایی فوق برای گام اول گودبرداری، این مراحل برای گام‌های بعدی گودبرداری تا رسیدن به رقوم کف گود موردنظر، تکرار می‌گردد.

۲-۴-۵. روش مهار متقابل

این روش برای گودهای به عرض کم مناسب است. در این روش ابتدا در دو طرف گود، در فواصل معین از یکدیگر چاهک‌هایی را حفر می‌کنیم. طول این چاهک‌ها برابر با عمق گود به اضافه‌ی مقداری اضافه‌تر حدود ۰/۲۵ تا ۰/۳۵ برابر عمق گود است. این عمق اضافه‌تر به منظور تأمین گیرداری انتهای تحتانی پروفیل‌هایی است که در چاهک قرار داده می‌شوند. سپس در درون این چاهک‌ها پروفیل‌های فولادی مطابق با محاسبات و نقشه‌های اجرایی، قرار می‌گیرد. طول این پروفیل‌ها معمولاً به گونه‌ای در نظر می‌شود که انتهای فوقانی آن‌ها تا حدی بالاتر از تراز بالای گود قرار گیرند. آنگاه قسمت فوقانی هر دو پروفیل قائم متقابل مزبور به کمک تیرها یا خرپاهایی به یکدیگر متصل می‌شود. این کار موجب می‌شود که هر دو پروفیل قائم متقابل، به پایداری یکدیگر کمک کنند. پس از آن، عملیات گودبرداری به تدریج انجام می‌گیرد. در صورتی که خاک خیلی ریزشی باشد باید در بین اعضای قائم از الوارهای چوبی یا اعضای

مناسب دیگر استفاده شود. سیستم مهار متقابل فوق‌الذکر باید در جهت عمود بر سیستم قابی آن، یعنی در جهت طول گود، نیز به صورت مناسب مهاربندی شود [۶]. در شکل ۲-۹ نمونه‌هایی از پایدارسازی گودبرداری به روش مهار متقابل نشان داده شده است.



شکل ۲-۸. نمونه‌هایی از پایدارسازی گود با روش مهار متقابل [۵]

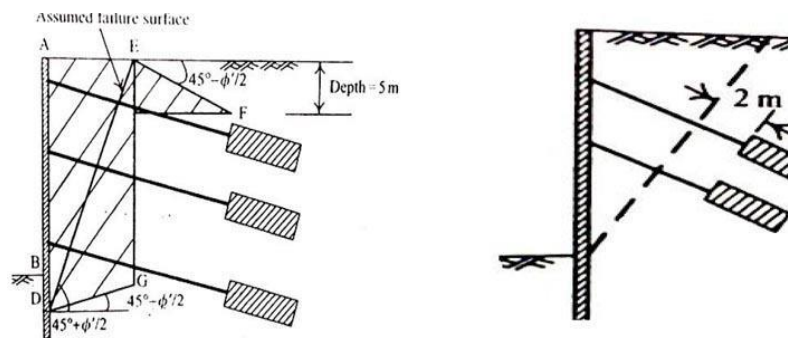
مزایای روش مهار متقابل عبارت‌اند از:

- ۱- در گودبرداری‌های با عرض کم دارای مزایای بسیار زیادی است که از آن جمله سرعت زیادتر، هزینه کمتر و جاگیری کمتر را می‌توان نام برد.
 - ۲- این روش، به‌ویژه در بسیاری از عملیات اجرای کانال‌ها می‌تواند بسیار سودمند واقع شود.
- از معایب این روش می‌توان گفت در صورتی که عرض گود زیاد، مثلاً بیش از حدود ۱۰ متر شود و نیز در صورتی که عمق گود زیاد باشد ممکن است مهاربندی‌های عرضی و یا مهاربندی‌های ترازهای مختلف دست و پاگیر شده و موجب بروز مشکل در اجرای کار گردد.

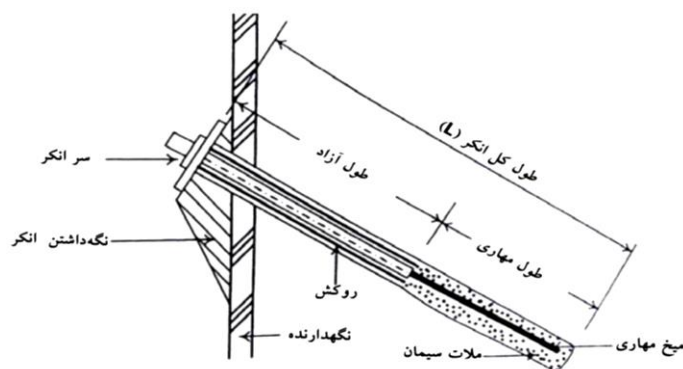
۲-۴-۶. روش مهارسازی

در این روش، برای مهار حرکت و رانش خاک، با استفاده از تمهیداتی خاص، از خود خاک‌های دیوار کمک گرفته می‌شود. ابتدا در حاشیه زمینی که قرار است گودبرداری شود، در فواصل معین چاه‌هایی حفر می‌شود.

پس از حفر چاه‌ها، در درون آن‌ها پروفیل‌هایی H شکل قرار می‌گیرد به منظور تأمین گیرداری و مهارتی کافی برای این پروفیل‌ها، انتهای پروفیل‌ها به میزان ۰/۲۵ تا ۰/۳۵ عمق گود، پایین‌تر از رقوم کف گود در درون بخش شمع ادامه می‌یابد و در انتهای پروفیل‌ها نیز شاخک‌هایی اتصال داده می‌شود. سپس، شمع انتهای تحتانی، که قبلاً آرماتوربندی آن را اجرا و کار گذاشته شده است، بتن‌ریزی می‌شود. پس از اجرای مراحل فوق، عملیات گودبرداری به صورت مرحله‌به‌مرحله اجرا می‌شود. در هر مرحله، پس از برداشتن خاک در عمق آن مرحله، برای جلوگیری از ریزش خاک، با استفاده از دستگاه‌های حفاری ویژه، در بدنه‌ی گود چاهک‌هایی افقی یا مایل، به قطر حدود ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر، در جداره‌ی گود حفر می‌شود. آنگاه درون این چاهک‌ها میلگردهایی کار گذاشته و سپس درون آن‌ها بتن تزریق می‌شود. طول این چاهک‌ها، به نوع خاک و پارامترهای فیزیکی و مکانیکی آن و نیز به عمق گودبرداری و محل چاهک‌ها از سطح خاک بستگی دارد و مقدار آن در حدود ۵ تا ۱۰ متر است. پس از انجام این مرحله، پانل‌های بتنی پیش‌ساخته در بین پروفیل‌های قائم قرار داده و از سویی به میلگردهای بیرون آمده از چاهک‌ها متصل می‌شود. به‌جای استفاده از این پانل‌های پیش‌ساخته می‌توان آن‌ها را به صورت درجا ریز اجرا نمود. همچنین می‌توان ابتدا بر روی دیوار آرماتوربندی کرده و سپس بر روی آن بتن پاشی (shotcrete) کرد.



شکل ۲-۹. موارد الزامی درباره فواصل انکرها [۷]



شکل ۲-۱۰. جزئیات انکر به صورت کامل [۷]

مزایای روش مهارسازی عبارت‌اند از:

۱- مشخصات مکانیکی خاک بر اثر تزریق بتن در درون چاهکها بهبود می یابد، لذا بر اثر این امر، علاوه بر کمک گرفتن از خاک اطراف جداره برای مهار رانش خاک، میزان رانش خاک نیز بر اثر بهبود مشخصات مکانیکی خاک کاهش می یابد.

۲- سازه نگهبان در داخل گود جاگیر نیست.

معایب روش مهارسازی نیز عبارت‌اند از:

۱- استفاده از بدنه‌ی خاک مجاور دیواره گود ضروری است. لذا در مواردی که خاک مجاور گود در زیر یک ساختمان یا در حریم همسایه یا در حریم معابر شهری باشد، از این روش نمی‌توان استفاده کرد یا استفاده از آن با محدودیت همراه است.

۲- به دلیل ضرورت اجرا عملیات به صورت مرحله‌به‌مرحله، به زمان زیادی نیاز دارد.

۳- هزینه اجرای عملیات، به دلیل تکنولوژی پیشرفته‌تر، در مقایسه با روش‌های ساده‌تر بیشتر است.

۴- به دستگاه‌های خاص نظیر دستگاه‌های لازم برای حفر چاهک‌ها، تزریق، حمل پانلها و ... نیاز دارد.

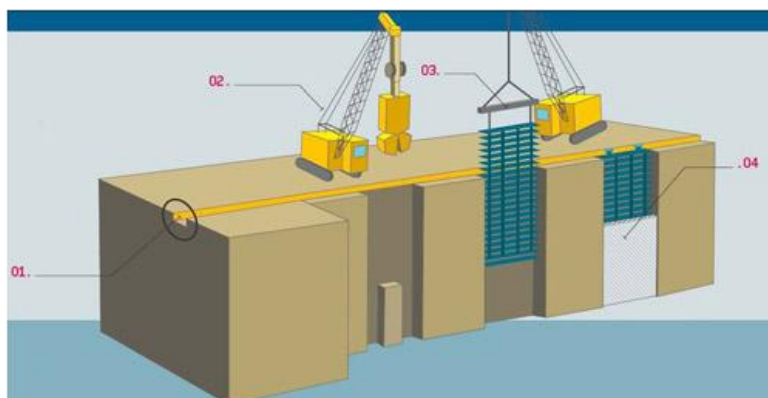
۵- به افراد با تخصص‌های بالاتر در رده‌های مختلف فنی برای اجرای عملیات مربوطه، در مقایسه با

روش‌های ساده‌تر نیاز دارد. [۹]

۲-۴-۷. روش دیواره دیافراگمی

دیوارهای دیافراگمی بتن مسلح را، به -علت نحوه ساخت آن‌ها، روش دیوارهای دوغابی نیز می‌نامند. در این روش ابتدا توسط دستگاه‌های حفاری ویژه (grab) متناسب با شرایط زمین حفاری قسمتی از دیوار انجام می‌شود و هم‌زمان با حفاری جهت پایداری جداره دیواره حفاری شده و جلوگیری از ریزش‌های موضعی از دوغاب بنتونیت استفاده می‌شود. تشکیل کیک بنتونیت در داخل دیواره حفاری شده و نفوذ در لایه‌های دانه‌ای جداره باعث می‌گردد جداره همواره پایدار بماند و سپس بلافاصله پس از رسیدن به عمق موردنظر آرماتور گذاری شده و درنهایت بتن‌ریزی می‌گردد. بتن‌ریزی در این روش با استفاده از لوله‌های ترمی انجام می‌گیرد. لوله‌ترمی، لوله‌ای است که به‌وسیله آن بتن در تراز پایین گودبرداری ریخته می‌شود با این کار در زمان بتن‌ریزی، وزن مخصوص بالای بتن نسبت به بنتونیت، سبب بالا آمدن بنتونیت گردیده و معمولاً بنتونیت بالا آمده برای استفاده مجدد جمع‌آوری می‌گردد. این روش در زیر هسته سدهای خاکی و تسهیلات شهری مانند مترو نیز کاربرد بسیار دارد و از هرگونه نشستی جلوگیری می‌نماید. استفاده از این روش در مناطق شهری نیز با محدودیت‌های نظیر استفاده از روش مهاربندی افقی و مایل و المان‌های کششی دارا می‌باشد.

ضخامت دیوارهای دیافراگمی بین ۰/۶ تا ۱/۱ متر متغیر است. دیوار به‌صورت پانل‌های با عمق متناسب با عمق گود به‌صورت کامل ساخته می‌شود. عرض پانل‌ها بین ۲/۵ تا ۶ متر است. از عرض‌های کوچک ۲/۵ متر برای خاک‌های با پایداری کم، سربار زیاد و گودبرداری‌های عمیق استفاده می‌شود. مقطع این‌گونه دیوارها اصولاً به‌صورت مستطیلی ساخته می‌شوند اما سایر اشکال مانند T و L برای اهداف خاص قابل استفاده است. شکل ۲-۱۲ نحوه اجرای دیوار دیافراگمی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۱. نحوه اجرای دیوار دیافراگمی [۶]

مزایای روش دیواره دیافراگمی عبارت‌اند از:

- ۱- صلبیت بسیار بالا نسبت به سایر روش‌ها و در نتیجه تغییر مکان‌های کوچک‌تر.
- ۲- قابل استفاده به‌عنوان سازه نگهبان دائمی
- ۳- قابلیت استفاده به‌عنوان یک المان سازه‌ای
- ۴- مناسب برای حفاری‌های با طول زیاد نظیر ایستگاه‌های مترو
- ۵- سرعت و درجه ایمنی بالا

معایب روش دیواره دیافراگمی نیز عبارت‌اند از:

- ۱- در پروژه‌های کوچک از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نیست.
- ۲- دستگاه‌های حفار این‌گونه دیوارها (گرب و هیدروفرز) نیاز به فضای کار زیادی داشته در نتیجه استفاده از این روش در مناطق شهری با محدودیت همراه است.
- ۳- در این روش به دستگاه‌های حفاری ویژه‌ای نیاز است.
- ۴- در این روش به نیروهای با تخصص بالا برای کار با دستگاه‌های موردنظر و سایر موارد نیاز است.

۲-۴-۸. روش سپرکوبی

در این روش پیرامون زمینی که قرار است گودبرداری شود سپرها توسط دستگاه‌های کوبنده و یا به‌وسیله

دستگاه‌های ارتعاش دهنده داخل خاک رانده می‌شوند. شکل ۲-۱۰ نمونه‌ای از انجام عملیات سپرکوبی، شکل سپر و محدوده گودبرداری را نشان می‌دهد.

پس از عملیات سپرکوبی خاک داخل گود برداشته می‌شود. حداقل عمق سپرهای کوبیده شده ۳/۱ برابر عمق دیواره گود می‌باشد [۲]. در بسیاری از موارد با افزایش عمق گود، جهت پایداری دیواره به سپرهای با ضخامت زیادتر احتیاج خواهد بود. در این حالت معمولاً از روش مهار متقابل به همراه روش سپرکوبی استفاده می‌شود.

برای این منظور پس از برداشت مرحله اول گودبرداری روی سپرها یک کمرکش به صورت افقی قرار داده می‌شود و سپرها با تیرهای مهار متقابل پایدار می‌شوند.



شکل ۲-۱۲. پایدارسازی گودبرداری با روش سپرکوبی [۸]

ذکر این نکته ضروری است که در روش سپرکوبی با استفاده از مهار متقابل توزیع نیروی ناشی از فشار خاک از روابط عمومی دیوارهای حائل (فشار محرک رانکین) تبعیت نمی‌کند و باید مقدار فشار جانبی با توجه به نوع خاک از روابط مناسب استخراج گردد. جهت طراحی سپرها اغلب از نرم‌افزارهایی که بر پایه روابط مکانیکی خاک استوار هستند، استفاده می‌شود. به طور خلاصه می‌توان مزایای روش سپرکوبی را به روش زیر برشمرد [۷]:

۱- راحتی در کوبیدن، نصب و بیرون کشیدن آن‌ها، به نحوی که مصالح آن مجدداً قابل استفاده در پروژه‌های دیگر می‌باشد.

۲- دیوارهای سپری نسبت به سایر روش‌ها فضای کمتری را اشغال می‌کنند.

۳- به دلیل انعطاف‌پذیر بودن این نوع دیوارها و پدیده بازپخش لنگرها عمدتاً رفتار لرزه‌ای مناسبی دارند.

معایب روش سپرکوبی نیز عبارت‌اند از:

۱- در این روش به دستگاه‌های سپرکوبی که به‌هرحال یک دستگاه ویژه است، نیاز است.

۲- تغییر شکل‌های زیادی را پس از گودبرداری متحمل می‌شود.

۳- دستگاه‌های سپرکوب به‌جای کافی برای اجرای کار نیاز دارند.

۴- این روش برای گودبرداری‌های با عرض کم مناسب‌تر است.

۲-۴-۹. روش ساخت بالا به پایین (Top - Down)

از این روش معمولاً برای اجرای ساختمان‌هایی که محدودیت فضای عملکرد دارند استفاده می‌شود. در ساختمان‌هایی که عملیات عمرانی با توجه به فضای محیطی یا شرایط ترافیکی به‌سختی می‌تواند پیش برود، برای بهبود عملکرد ساخت‌وساز از روش ساخت بالا به پایین (Top - Down) استفاده می‌کنند. این ساختمان‌ها معمولاً به علت داشتن گود با عمق زیاد و درعین‌حال سطح کم باعث می‌شوند فضا برای گودبرداری با محدودیت‌های خاصی همراه باشد. این محدودیت‌ها عملکرد ماشین‌آلات و روند پیشرفت پروژه را با کندی مواجه خواهد کرد که از نظر مالی به ضرر پروژه خواهد بود. به همین علت روش ساخت بالا به پایین گزینه مناسبی برای اجرای این‌گونه از پروژه‌ها می‌باشد.

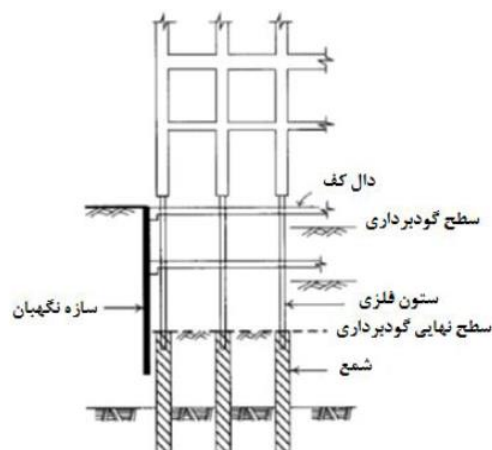
علاوه بر این نیز، در پروژه‌هایی که با محدودیت زمان مواجه می‌باشیم مثل پروژه‌هایی که با ترافیک خیابان‌های اصلی تداخل دارند و تأخیر در پروژه به دلیل ایجاد مشکلات ترافیکی خواهد بود می‌توان از این روش استفاده کرد که دارای سرعت اجرای بیشتر نسبت به روش‌های اجرای مشابه می‌باشد.

همچنین در سازه‌هایی که سطح آب زیرزمینی بالا است، حفاری و اجرای سازه‌های نگهدارنده و فونداسیون با مشکلاتی همراه است که اگر از این روش استفاده کنیم می‌توانیم با استفاده از دیوار دیافراگمی و شمع‌های عمیق مشکلات اجرای ناشی از بالا بودن سطح آب زیرزمینی را کاهش بدهیم.



شکل ۲-۱۳. نمونه‌ای از روش ساخت بالا به پایین [۵]

نحوه اجرای این روش برخلاف روش‌های توضیح داده شده قبل، به این صورت است که پیش از عملیات گودبرداری، نخست دیوار نگهدارنده در محل مورد نظر درون زمین اجرا می‌گردد. سپس شمع‌هایی در عمق خاک و در زیرتراز کف گودبرداری، جایی که ستون‌های سازه اصلی در آن قرار می‌گیرد، اجرا می‌شود. پس از اجرای شمع‌ها، ستون‌ها بر روی شمع‌ها در داخل خاک قرار می‌گیرند. سپس گودبرداری شروع و تا تراز نزدیک‌ترین سقف سازه زیرزمینی به سطح زمین ادامه می‌یابد. در این مرحله سقف تراز مذکور اجرا می‌شود و سپس گودبرداری تا عمق بعدی ادامه می‌یابد و همزمان ساخت سازه اصلی نیز می‌تواند در بالای سطح زمین شروع شود. فرآیند مذکور تا عمق نهایی ادامه می‌یابد و بنابراین آن قسمت از سازه که زیر سطح زمین قرار دارد با اتمام گودبرداری اجرا شده است [۱۰]. باید توجه داشت که در طراحی و اجرا به روش ساخت بالا به پایین حتماً بازشوهای مناسب برای تأمین دسترسی مصالح و ماشین‌آلات به طبقات پایین‌تر در نظر گرفته شده باشد. این بازشوها تا رسیدن به تراز کف باقی می‌مانند و سپس از انتها شروع به بسته شدن می‌کنند. طبیعتاً در نظر گرفتن آرماتورها و اتصالات مناسب برای این بازشوها از نکات حائز اهمیت در این روش اجرا می‌باشد.



شکل ۲-۱۴. نمای کلی روش ساخت بالا به پایین

از مزایای این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- کاهش نشست خاک در اطراف محدوده حفاری، ایمنی بسیار بالا در حین گودبرداری و قابلیت ساخت سازه‌های زیرزمینی به خصوص در زمین‌های سست.
- ۲- عدم نیاز به سیستم‌های پایدارکننده و محافظ گود (ساخت و نصب استرات‌ها و ...) برای گودبرداری‌های عمیق و بالطبع کاهش هزینه
- ۳- استفاده از دیوار محیطی به‌عنوان آب‌بند، محافظ گود و در انتها به‌عنوان مهار جانبی
- ۴- حذف یا به حداقل رساندن اجرای عملیات قالب‌بندی سقف‌ها و ستون‌های زیرزمینی به دلیل استفاده از سطح رگلاژ شده زمین طبیعی و بالطبع کاهش زمان اجرا و هزینه‌های انجام پروژه
- ۵- امکان تسریع در شروع عملیات اجرایی تأسیسات مکانیکی و برقی
- ۶- این روش این امکان را می‌دهد که رو سازه و زیر سازه با اعمال تمهیدات لازم در مراحل طراحی و ساخت به‌طور هم‌زمان اجرا و باعث شتاب گرفتن روند ساخت می‌گردد.
- ۷- این روش کارایی بسیار گسترده‌ای برای ساختمان‌های دارای طبقات زیاد زیرزمین دارد.
- ۸- امکان اجرای هم‌زمان فعالیت‌های ساخت سازه، تأسیسات برقی و مکانیکی هم‌زمان با افزایش طبقات در زیر و روی زمین موجب افزایش سرعت اجرا و کوتاه شدن برنامه زمان‌بندی ساخت می‌گردد.

از معایب این روش نیز می‌توان به هزینه بالا به دلیل اجرای پی‌های شمعی اشاره نمود.

۲-۴-۱۰. روش اجرای شمع ستونی

در این روش شمع‌های بتنی به صورت ردیفی قرار می‌گیرند. این ردیف‌های شمعی مانند دیوار نگهدارنده عمل می‌کنند. شمع‌های بتنی را می‌توان بر اساس نحوه ساخت و اجرا به سه دسته شمع‌های بتنی درجا ریز، شمع‌های تراکمی و شمع اختلاطی در محل تقسیم نمود که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

۲-۴-۱۰-۱. شمع‌های بتنی درجا ریز

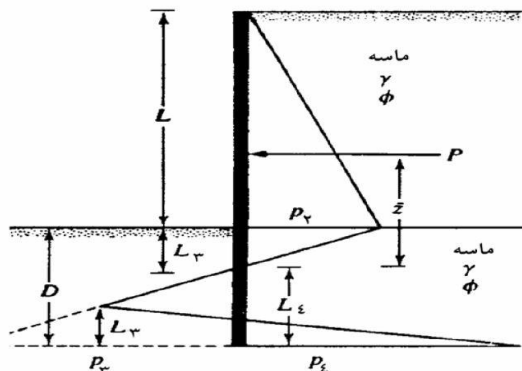
در این روش، در حاشیه زمینی که قرار است گودبرداری شود در فواصل معین و محاسبه شده چاه‌هایی حفر می‌شود. این حفاری‌ها با استفاده از دستگاه‌های حفاری و یا با استفاده از روش دستی صورت می‌گیرد. پس از حفر چاه‌ها، داخل چاه‌ها به‌طور کامل آرماتور گذاری صورت گرفته و سپس عملیات بتن‌ریزی انجام می‌گردد. در شکل ۲-۱۶ نمونه‌هایی از این مورد نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۵. نمایش قسمتی از عملیات اجرای شمع [۵]

در این روش، شمع‌ها فشار جانبی خاک را به صورت تیرهای یکسر گیردار تحمل می‌کنند. عمق نفوذ این سیستم باید گیرداری انتهای شمع را تأمین کند. این گیرداری به منظور استفاده بهینه از ظرفیت خمشی شمع می‌بایست مقدار کافی را داشته باشد که معمولاً طول گیرداری لازم در انتهای شمع‌ها

چیزی در حدود ۳۰ تا ۱۰۰ درصد عمق گود هست. [۱۱] شکل ۲-۱۷ دیاگرام بارهای وارده به شمع درجا را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۶. دیاگرام بارهای وارده بر شمع درجا [۱۱]

پس از اجرای شمع‌ها، می‌توان عملیات گودبرداری را آغاز و به صورت قائم گودبرداری کرد. به‌طور معمول قطر این شمع‌ها بین ۳۵ تا ۱۵۰ سانتی‌متر می‌باشد و طول آن‌هم می‌تواند به ۵۰ متر برسد. در این روش به علت هوازگی خاک بین شمع‌ها، در پایداری کوتاه‌مدت کارایی دارد و باعث ریزش خاک بین شمع‌ها شده و برای جلوگیری از ریزش آن می‌توان از بتن پاشی و بستن مش استفاده کرد. اغلب جهت رفتار یکپارچه‌ی شمع‌ها با یکدیگر، در قسمت فوقانی شمع‌ها تیر رابطی اجرا می‌گردد. پس از اجرای تیر رابط عملیات گودبرداری به‌طور کامل انجام می‌شود.

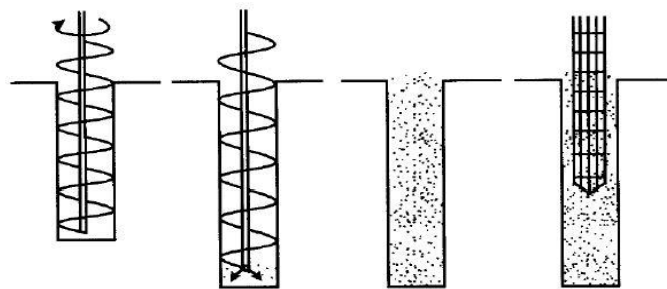
در شکل ۲-۱۸ مراحل اجرای تیر رابط و گودبرداری نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۷. مراحل اجرای تیر رابط و گودبرداری [۱۱]

۲-۴-۱۰-۲. شمع‌های تراکمی

در این روش نخست به وسیله مته حلزونی تا عمق مورد نظر حفاری می‌گردد. در حین حفاری، خاک‌های گمانه از طریق دوران مته به بیرون از گمانه هدایت می‌شوند و زمانی که مته به عمق نهایی می‌رسد، از انتهای مته ترکیب خاک و سیمان به داخل گمانه تزریق می‌شود و متراکم می‌گردد. سپس شمع فولادی با مقطع H با آرماتورهای فولادی داخل گمانه قرار می‌گیرد. قطر شمع‌های تراکمی حاصل ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر است. در خاک‌های ماسه‌ای اگر از این روش برای دیوار نگهدارنده استفاده شود، برای آب‌بند نمودن باید از تزریق استفاده نمود. فرآیند ساخت این روش در شکل ۲-۱۹ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۸. روند ساخت شمع‌های تراکمی در محل [۱۲]

۲-۴-۱۰-۳. شمع اختلاطی در محل

در این روش از نوعی وسیله حفاری برای حفر گمانه استفاده می‌شود که حین حفر گمانه ملات سیمان

را نیز با خاک مخلوط می‌نماید. پس از رسیدن به عمق موردنظر، وسیله حفاری به تدریج از گمانه به بالا آورده می‌شود و هم‌زمان خاک و ملات بتن را به خوبی ترکیب می‌نماید. سپس مسلح کننده فولادی با شمع‌های H شکل را داخل گمانه قرار می‌دهند.

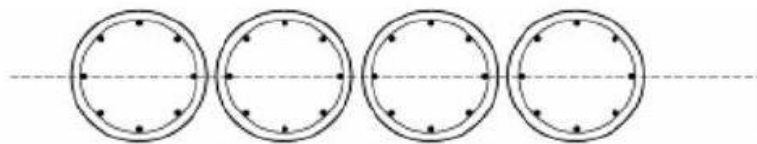
روش اختلاط عمیق DM در حدود سال ۱۹۷۰ توسط ژاپنی‌ها به منظور ساخت دیوار جداکننده آب‌بند ابداع شد. در روش DM ستون‌های خاک و سیمان با استفاده از شمع‌های فولادی با مقطع H که داخل ستون‌ها قرار می‌گیرد، مسلح می‌شوند. این روش از آن زمان توسعه یافت و امروزه به نوع پیشرفته آن، دیوار اختلاط خاکی SMW گفته می‌شود و همچنین به عنوان دیوار اختلاط خاکی عمیق DSM نیز شناخته می‌شود.

شمع‌های ستونی با الگوهای هندسی اجرایی زیر اجرا می‌شوند.

۱- الگوی مستقل

در این روش شمع‌ها در فاصله‌های مشخصی از یکدیگر قرار می‌گیرند.

شکل ۲-۲۰، نحوه قرارگیری شمع‌ها در این الگو را نشان می‌دهد. در این روش آب‌بندی حاصل نمی‌گردد.



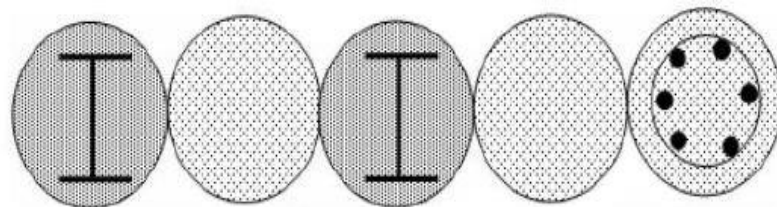
شکل ۲-۱۹. شمع‌های جدا از هم

در مواردی که توده خاک و سنگ دارای چسبندگی زیاد بوده و سطح آب‌ها پایین است، می‌توان از شمع‌های درجا ناپیوسته و بافاصله استفاده نمود. در این روش به دلیل چسبندگی بین دانه‌های خاک، بین شمع‌ها به دلیل ایجاد قوس پایداری جانبی ایجاد می‌گردد. در این روش پایداری جانبی مدنظر قرار

می‌گیرد. البته این روش در پایداری کوتاه‌مدت کارایی داشته و در اثر مرور زمان احتمال هوازگی بین شمع‌ها، تغییر مشخصات خاک و برخی از پارامترهای آن مانند از دست دادن آب و یا حالت اشباع نمودن آن باعث ریزش خاک بین شمع‌ها شده و برای جلوگیری از آن می‌بایست از طریق بتن پاشی (شاتکریت) همراه با بستن مش، پوشش لازم را جهت پایداری ایجاد نمود.

۲- الگوی خطی

این الگو یکی از متداول‌ترین الگوها می‌باشد. در این الگو شمع‌ها بر روی یک خط قرار دارند و با یکدیگر مماس می‌باشند. هر شمع به‌طور مستقل عمل می‌کند. این الگو در شکل ۲-۲۱ آمده است. به‌منظور رفع مشکل آب‌بندی در این روش نیز از تزریق دوغاب استفاده می‌شود.



شکل ۲-۲۰. شمع‌های تانژانت [۱۳]

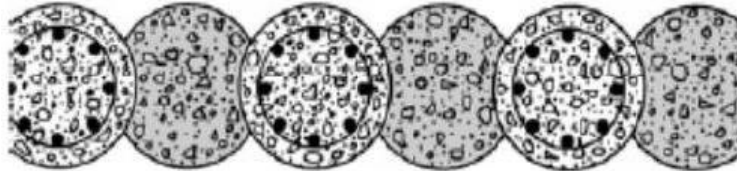
در شکل ۲-۲۲ نیز نمونه‌ای از اجرای روش شمع به‌صورت الگوی خطی را مشاهده می‌کنید.



شکل ۲-۲۱. شمع‌های چسبیده به یکدیگر [۵]

۲- الگوی هم پوشانی

طبق شکل ۲-۲۳، در این روش در ابتدا شمع‌هایی با بتن غیر مسلح یک درمیان حفاری و اجرا می‌گردد و سپس با رعایت هم پوشانی شمع‌های اصلی و سازه‌های با رعایت احداث جداره زنجیره‌ای و پیوسته اجرا می‌گردد. [۱۴]



شکل ۲-۲۲. شمع‌های سکانت

مزایای روش اجرای شمع عبارت‌اند از:

- ۱- سرعت عملیات اجرایی بسیار بالا است.
- ۲- سیستم به هیچ‌عنوان دست‌وپا گیر نیست.
- ۳- در احجام زیاد، هزینه‌ی عملیات کاهش می‌یابد.
- ۴- گاهی از اوقات می‌توان از شمع‌ها به‌عنوان سازه‌ی نگهدارنده‌ی دیوار حائل بخشی از آن نیز استفاده کرد.
- ۵- شمع‌های پیش‌ساخته را پس از جمع‌آوری می‌توان در پروژه‌های دیگر نیز استفاده کرد.

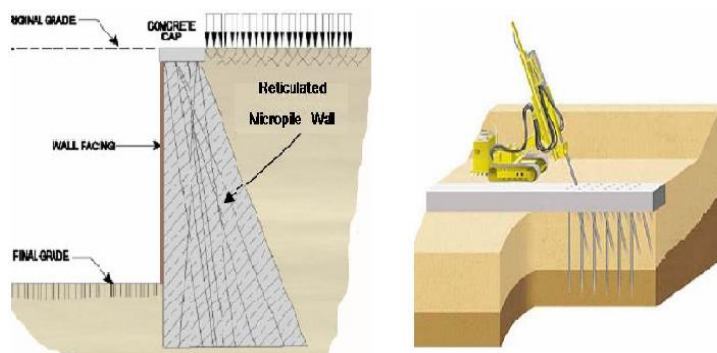
معایب روش اجرای شمع نیز عبارت‌اند از:

- ۱- در صورتی‌که ارتفاع گودبرداری زیاد باشد، هم باید فواصل شمع‌ها از هم کم شود و هم باید از مقاطع سازه‌ای قوی‌تری برای اجرای کار استفاده کرد.
- ۲- در بسیاری از پروژه‌های شهری، به دلیل مشکلات شمع کوبی، نمی‌توان از شمع‌های پیش‌ساخته استفاده کرد و فقط باید شمع‌ها را به‌صورت درجا اجرا کرد.

۲-۴-۱۱. جداره‌های مهاربندی شده توسط میکروپایل

تاریخچه ابداع میکروپایل به اوایل دهه پنجاه میلادی، توسط پیمانکار مشهور ایتالیایی صورت پذیرفت که به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد، این روش گسترش فراوانی یافت. در آغاز استفاده از میکروپایل‌ها تنها در بهسازی بستر ضعیف ساختمان‌ها مورد توجه قرار داشت. لیکن رفته رفته و با توسعه و اجرای این روش در کشورهای مختلف، دامنه کاربرد آن‌ها به دیگر عرصه‌های مهندسی ژئوتکنیک نظیر پایدارسازی شیب‌ها، گودبرداری‌ها و مقابله با روانگرایی و غیره نیز کشیده شد.

میکروپایل از یک طرف با دارا بودن عناصر تسلیح مشتمل بر جدار ضخیم فولادی و آرماتور تسلیح، قابلیت انتقال و پخش بار به لایه‌های مقاوم زیرین و نیز کنترل نشست به دلیل سختی بالای فولاد و تسلیح عمقی خاک را دارد و از سوی دیگر به دلیل تزریق دوغاب سیمان، مشخصات مکانیکی خاک نظیر سختی، تراکم پذیری، ظرفیت باربری، ضریب اصطکاک و چسبندگی و غیره را بهبود می‌بخشد. عملیات کوبش میکروپایل‌ها باعث انتقال انرژی جنبشی و ارتعاشی به توده خاک گردیده و منجر به تحکیم و تراکم توده خاکی اطراف میکروپایل خواهد شد. این امر به خصوص در خاک‌های دانه‌ای مشهودتر می‌باشد. در شرایطی که به علت وجود لایه‌های متراکم زیرسطحی، کوبش شمع‌های قطور مشکل یا غیرممکن می‌باشد، کوبش میکروپایل با قطر کوچک می‌تواند بهترین راه حل باشد. در شرایطی که میکروپایل‌ها با هدف تحکیم و بهسازی بستر پی سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، محاسبات فنی میکروپایل مشابه با محاسبات شمع‌های متداول است. این محاسبات مبتنی بر سه بخش طرح سازه‌ای، طرح ژئوتکنیک و کنترل برش پانچ می‌باشند [۸]. شکل ۲-۲۴ نمای کلی اجرای میکروپایل به عنوان دیوار حائل را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲۳. نحوه اجرای میکروپایل [۸]

روش اجرای میکروپایل مشتمل بر چهار مرحله حفاری (در صورت نیاز)، لوله کوبی، تزریق و تسلیح می‌باشد؛ که مراحل اجرای آن در زیر تشریح شده است:

۱. حفاری: آنچه لازم است قبل از هر کاری انجام شود، حفاری می‌باشد. حفاری به دو روش دورانی و دورانی-ضربه ای صورت می‌گیرد. حفاری انجام شده متناسب با عمق مورد نیاز برای انجام پروژه جهت استفاده از میکروپایل صورت می‌گیرد.

۲. لوله کوبی: پس از اجرای عملیات حفاری و ایجاد عمق برای استقرار لوله‌های میکروپایل، عملیات لوله کوبی انجام می‌شود. برای انجام لوله کوبی، در ابتدا باید از قسمت نوک تیز آن برای فرورفتن به داخل خاک استفاده کرده و پس از فرورفتن لوله اول، لوله دوم متصل و کوبیده شود. مرحله لوله کوبی به این گونه است که اگر پس از ۳۰ ضربه پشت سر هم لوله بیش تر از ۱۰ سانتی متر به داخل خاک فرو نرود، فرآیند کوبش متوقف شده و باید از حفاری برای رسیدن به عمق مورد نظر استفاده شود. پس از رسیدن به عمق مورد نظر، می‌توان نسبت به نصب لوله‌های میکروپایل اقدام کرد.

۳. تزریق: آنچه در مرحله تزریق صورت می‌گیرد، ساخت دوغاب و تزریق آن می‌باشد. این مرحله از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. تزریق دوغاب در سه بخش میکسر اولیه، ثانویه و پمپ تزریق صورت می‌گیرد. در مرحله میکسر اولیه ساخت دوغاب انجام می‌شود. در این روش ابتدا آب

متناسب با میزان سیمان، مورد استفاده قرار گرفته و بعد از آماده شدن آن داخل میکسر ثانویه ریخته می‌شود. در مرحله سوم به وسیله پمپ‌های تزریق، عملیات تزریق انجام می‌شود.

۴. تسلیح فولادی: در اجرای میکروپایل، عملیات جایگذاری آرماتور تسلیح (میکروپایل مسلح) در داخل لوله میکروپایل و نصب فلنج (در صورت نیاز) بدیهی است که آرماتور تسلیح می‌بایست قبل از گیرش سیمان، در داخل گمانه نصب شود؛ بنابراین می‌توان خاک محدوده تزریق شده در مرحله قبل را به‌عنوان بتن با مقاومت فشاری تک‌محوری خیلی کم و مجموعه غلاف و آرماتور داخل لوله میکروپایل را به‌عنوان المان‌های مسلح کننده در نظر گرفت. برای دوختن این مجموعه به خاک از Nail استفاده می‌شود که به‌صورت فنرهایی با سختی معین مدل می‌گردند. برای کنترل پایدارسازی گودها می‌توان المان‌های مسلح کننده شمع و میکروپایل را به‌عنوان المان‌هایی که تنها برش تحمل می‌کنند در نظر گرفت. مقاومت برشی این المان‌ها در تعادل نیروهای موجود در دیاگرام جسم آزاد قطاع موردنظر در شیروانی خاکی وارد می‌گردد.

از مزایای روش میکروپایل می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ۱- اجرای روش میکروپایل در زمین‌های سست و خاک‌های مسئله‌دار امکان‌پذیر و مناسب می‌باشد.
- ۲- امکان اجرای روش میکروپایل در مکان‌هایی با دسترسی محدود وجود دارد.
- ۳- روش میکروپایل امنیت بالایی دارد، زیرا امکان کنترل کیفی از نظر طراحی و اجرا را از طریق آزمایش‌های کنترلی فراهم می‌کند. این آزمایش‌ها شامل آزمایش بارگذاری فشاری، آزمایش بارگذاری کششی و آزمایش بارگذاری جانبی ریز شمع است.
- ۴- روش میکروپایل انعطاف‌پذیری بالایی در حین اجرا دارد.
- ۵- اجرای روش میکروپایل نیاز به ماشین‌آلات زیادی ندارد؛ بنابراین برای استفاده در محیط‌های شهری مناسب است.

از معایب روش اجرای میکروپایل می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ۱- نسبت طول به شعاع بالا باعث می‌شود برای خاک‌های روانگرا مناسب نباشد.
- ۲- ممکن است در پروژه‌های بزرگ که محدودیت ارتفاع ندارند در مقایسه با روش‌های دیگر اقتصادی نباشد.

فصل ۳

روش‌های تحلیل گودبرداری‌ها و
مروری بر تحقیقات پیشین

۳-۱. مقدمه

پیچیدگی مسائل مختلف در حوضه مهندسی و خلق مسائل تازه، روش‌های مختلفی برای حل این مسائل به وجود آورده است. روش‌های تحلیلی عموماً برای مسائل دارای هندسه ساده و مصالح همگن و همسان قابل استفاده است. با توجه به محدودیت‌های روش‌های تحلیلی و توسعه روش‌های عددی، مهندسان ژئوتکنیک در حل بسیاری از مسائل از روش‌های عددی، به‌عنوان مکمل مدل‌سازی فیزیکی و آزمایش‌های برجا (حتی در برخی موارد خاص که انجام مدل‌سازی فیزیکی و آزمایش‌های برجا مقدور نباشد به‌عنوان جایگزین) استفاده می‌کنند.

۳-۲. ارزیابی پایداری گودبرداری عمیق

زمانی که در یک محل گودبرداری انجام می‌شود و دیواره‌ای قائم از خاک ایجاد می‌گردد، بر این دیواره قائم دودسته نیرو اعمال می‌شود: دسته اول نیروهای محرک بوده و دسته دوم نیروهای مقاوم نامیده می‌شوند. نیروهای محرک، به نیروهایی گفته می‌شود که حاصل از وزن خاک و سربارهای اطراف گود باشند و این نیروها تمایل به تخریب دیواره گود دارند. در مقابل نیروهای مقاوم، نیروهایی هستند که تمایل به پایداری و جلوگیری از ریزش گود را دارند. [۱۵]

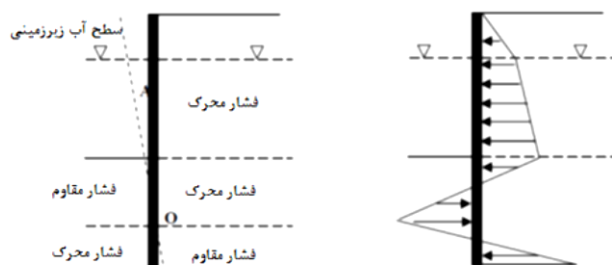
در طراحی هر سازه نگهبان و یا پایدارسازی هر دیواره گود، لازم است با در نظر گرفتن این دیدگاه عمل شود که نیروهای مقاوم را افزایش داده و یا نیروهای محرک را کاهش داد. بر این اساس هر راهکاری که جهت پایدارسازی یک دیواره ارائه می‌شود بایستی قادر باشد که نیروهای مقاوم را افزایش و یا نیروهای محرک را کاهش دهد و یا تلفیق این دو رویکرد را در پی داشته باشد. مواردی که در تحلیل پایداری گودبرداری اهمیت دارد در ادامه بررسی می‌شود.

۳-۲-۱. حالت گسیختگی

تحلیل پایداری با فرض اینکه سازه مورد بررسی در وضعیت حدی در آستانه گسیختگی است مورد بررسی قرار می گیرد و برای تحلیل پایداری نخست لازم است نحوه و محل آغاز گسیختگی شناسایی شود. با انجام تحلیل پایداری، طراحی به گونه ای انجام می شود که ضریب اطمینان در برابر وقوع گسیختگی به میزان قابل قبولی برسد. اگر گسیختگی ناشی از وقوع گسیختگی به میزان قابل قبولی به رشد و گسیختگی ناشی از وقوع تغییر شکل های زیاد باشد می توان با انتخاب ضریب اطمینان بالا، این تغییر شکل ها را تا محدوده مجاز کاهش داد.

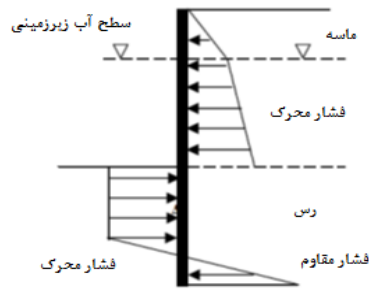
۳-۲-۲. تحلیل پایداری

جهت پایداری گود به سازه هایی نیاز است که یکی از عوامل مهم در طراحی آن سازه ها، فشار جانبی خاک می باشد. طراحی سازه های نگهدارنده گود بر اساس تئوری های گسیختگی صفحه ای رانکین و کولمب انجام می شود. بسیاری از محققان با استفاده از نتایج اندازه گیری های در محل، سعی کرده اند که مقادیر واقعی تری برای فشار جانبی خاک جهت طراحی ارائه دهند. با توجه به آنکه در قبل هم به آن اشاره شد، با توجه به مطالعات داس (۱۹۹۹) شمع های نگهدارنده رفتاری طره ای و انعطاف پذیر شبیه سپر رادارند و توزیع فشار جانبی آن ها در خاک ماسه ای مطابق شکل ۳-۱ هست.



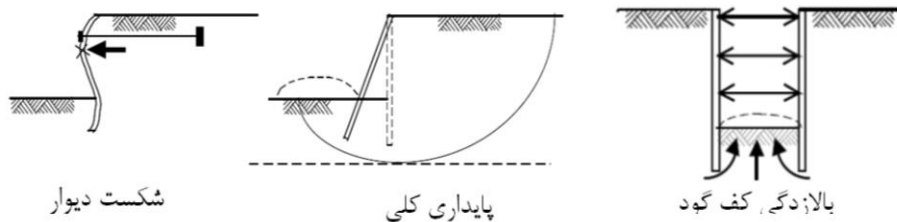
شکل ۳-۱. توزیع فشار جانبی وارد بر شمع نگهدارنده در خاک ماسه ای

علاوه بر این توزیع فشار جانبی در خاک های رسی ارائه شده است که مطابق شکل ۳-۲ می باشد.



شکل ۳-۲. توزیع فشار جانبی وارد به شمع نگهدارنده در خاک رسی [۱۶]

در انجام تحلیل پایداری گودبرداری‌های عمیق به‌طور معمول محاسبات برای سه حالت گسیختگی برشی کلی، پدیده جوشش در کف گود و بالا آمدگی کف گود انجام می‌گردد. گسیختگی برشی کلی به دو حالت گسیختگی ناشی از ناپایداری دیوار و گسیختگی ناشی از ناپایداری خاک کف گود می‌باشد که در شکل ۳-۳ این موضوع به‌خوبی مشاهده می‌شود. [۲]

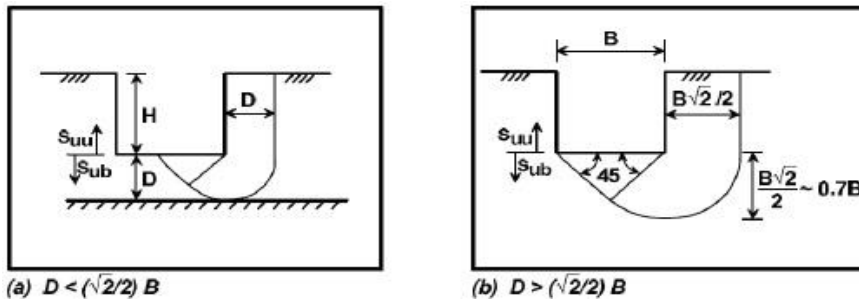


شکل ۳-۳. اشکال مختلف ناپایداری دیوار [۸]

تحلیل پایداری در برابر بالا آمدگی تنها برای خاک‌های رس با فرض زاویه اصطکاک صفر انجام می‌گردد. در این حالت سطح گسیختگی ناشی از ظرفیت باربری به‌صورت کمان دایروی فرض می‌شود. گسیختگی ناشی از بالا آمدگی کف گود نیز به‌نوعی گسیختگی ناشی از ظرفیت باربری محسوب می‌گردد و بنابراین سطح گسیختگی برای این تحلیل نیز به‌صورت دایره‌ای در نظر گرفته می‌شود.

روش‌های مختلفی برای تحلیل پایداری کف گود توسط محققین اشاره شد. اولین تحقیقات توسط ترزاقی در سال ۱۹۴۳ انجام شد و با استفاده از پارامترهایی که در شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود روابطی را برای محاسبه ضریب اطمینان در برابر بالا آمدگی کف گود ارائه کرد. همچنین بیروم و اید در سال

۱۹۵۶ روابط ترزاقی را بهبود بخشیدند که شامل ضرایب ظرفیت باربری، N_c بودند. در جدول ۳-۱ خلاصه‌ای از روابط ترزاقی و بیروم و اید مشاهده می‌گردد. علاوه بر این اوی در سال ۲۰۰۶ مرور جامعی بر این روش‌ها ارائه نمود. [17]



شکل ۳-۴. شکل هندسی گود و مقاومت برشی خاک، پارامترهایی جهت به دست آوردن ضریب اطمینان [۱۷] همچنین مبحث ۷، برای حداقل ضریب اطمینان در برابر بالا زدگی عدد $1/5$ را پیشنهاد کرده است. جدول ۳-۱. روابط ضریب اطمینان در برابر بالازدگی ارائه شده توسط ترزاقی ۱۹۴۳ و بیروم و اید ۱۹۵۶

	(a)	(b)
ترزاقی ۱۹۴۳	$FS = \frac{1}{H} \times \frac{N_c S_{ub}}{\gamma - S_{uu}/D}$	$FS = \frac{1}{H} \times \frac{N_c S_{ub}}{\gamma - 2S_{uu}/\sqrt{2}B}$
بیروم و اید ۱۹۵۶	$FS = \frac{1}{H} \times \frac{N_c S_{ub}}{\gamma}$	

مطابق با جدول فوق، ضریب اطمینان در برابر بالازدگی تابعی از H عمق گود، B عرض گود، S_{ub} مقاومت برشی زهکشی نشده و N عدد پایداری می‌باشد.

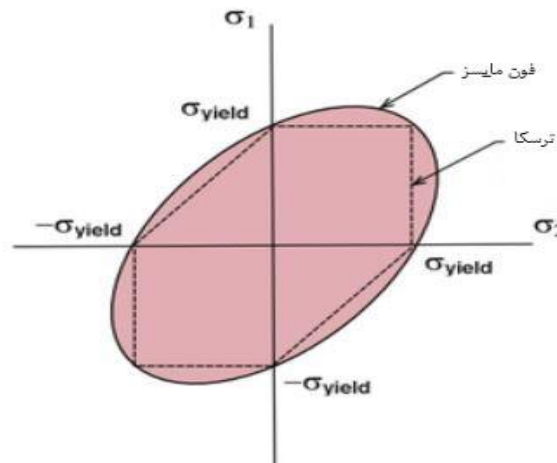
یکی دیگر از مراحل تحلیل پایداری، پایداری در برابر جوشش است. جوشش زمانی اتفاق می‌افتد که گودبرداری زیر سطح ایستایی آب انجام گردد. در این صورت نیروی تراوش در کف گود می‌تواند سبب ناپایداری خاک کف گود شود. در واقع پدیده جوشش زمانی رخ می‌دهد که تنش مؤثر در خاک بر اثر تراوش کاهش یابد و به صفر برسد؛ که به توضیح مختصر در این زمینه بسنده می‌گردد.

۳-۳. معیار تسلیم فون مایسز

برای بررسی اینکه المان‌هایی که تحت تنش‌های ترکیبی نرمال و برشی قرار دارند به نقطه تسلیم رسیده یا خیر می‌توان با استفاده از معیار تنش فون مایسز بررسی کرد. بر اساس این تئوری، اگر تنش‌های اصلی المان موردنظر که از دایره موهر بدست آمده را در رابطه کنترلی فون مایسز قرار دهیم و مقدار تنش فون مایسز بدست آمده، از مقدار تنش تسلیم ماده کمتر بود یعنی شکست رخ نمی‌دهد ولی اگر این تنش از تنش تسلیم ماده بیشتر بود، مفهوم آن رسیدن المان به نقطه‌ی تسلیم است. به‌طور کلی تنش فون مایسز از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2] + 3(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{13}^2)} \quad (۱-۳)$$

اگر آن را در فضای تنش‌های اصلی رسم کنیم، مقطعی بیضی‌گون حاصل می‌شود که بر استوانه شش‌گانه ترسیمی معیار ترسکا محیط است. [۱۸]



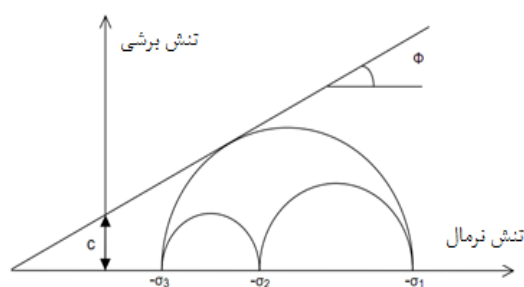
شکل ۳-۵. ترسیم معیار فون مایسز و ترسکا در صفحه تنش‌های σ_1 و σ_2

۳-۴. معیار گسیختگی موهر کولمب

معیار موهر کولمب یک معیار الاستیک پلاستیک ساده است که برای تحلیل مسائل ژئوتکنیکی قابل استفاده می‌باشد. الگوی مذکور در بسیاری از مسائل با موفقیت به کار رفته است و مزیت اصلی این روش، تعداد کم پارامترهای مورد نیاز آن می‌باشد و در قالبی ساده به صورت ارتباط خطی بین تنش برشی و تنش عمود بر سطح بر روی یک صفحه به صورت رابطه ۳-۱ ارائه می‌گردد. در شکل ۳-۶ نیز نمودار دایره موهر نشان داده شده است.

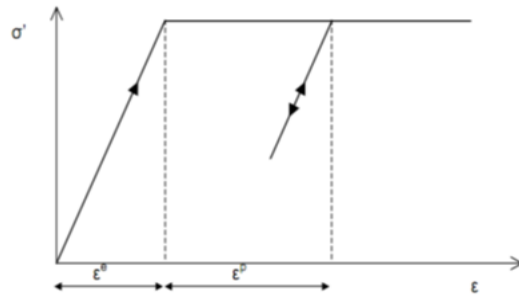
$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (۳-۲)$$

در رابطه فوق تنش برشی، تنش عمودی و به ترتیب ضریب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک نامیده می‌شوند. مسلماً مقادیر این ضرایب برای انواع خاک‌ها متفاوت می‌باشد. [۱۸]



شکل ۳-۶. دایره موهر نشان دهنده رابطه (۴-۱)

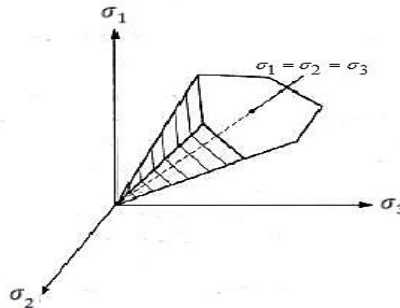
حالت پلاستیک با توسعه کرنش‌های برگشت‌ناپذیر همراه است. به عبارت دیگر برای ارزیابی رویداد حالت پلاستیک در محاسبات یا عدم رویداد آن، تابع تسلیم به عنوان یک تابع تنش و کرنش وارد می‌شود. یک تابع تسلیم اغلب به عنوان یک سطح در فضای تنش‌های اصلی ارائه می‌شود. مدل کاملاً پلاستیک یک مدل اصلی با یک سطح تسلیم ثابت است یعنی یک سطح تسلیم که کاملاً به وسیله پارامترهای مدل تعیین می‌شود و به وسیله کرنش‌های پلاستیک تغییر نمی‌کند. در شکل ۳-۶ رفتار الاستیک پلاستیک دیده می‌شود.



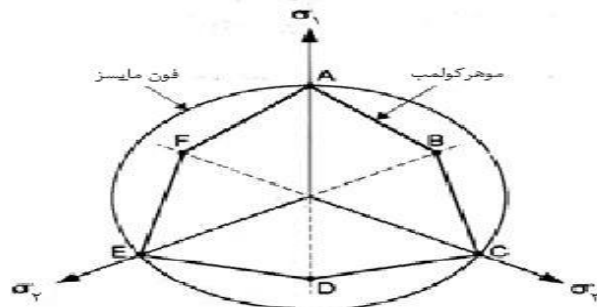
شکل ۳-۷. ایده اصلی یک مدل الاستیک- پلاستیک [۱۷]

حالت تسلیم موهر کولمب همان تعمیم قانون اصطکاک کولمب به حالت‌های عمومی تنش است. در واقع این شرط تضمین می‌کند که قانون اصطکاک کولمب در هر سطح داخل المان مصالح برقرار است. حالت تسلیم کامل موهر کولمب برحسب تنش‌های اصلی فرمول‌بندی می‌شود، مرکب از یک تابع تسلیم شش ضلعی است.

$$f = (\sigma_1 - \sigma_2) - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi - 2c \cos \varphi \quad (3-3)$$



شکل ۳-۸. سطح تسلیم مدل موهر کولمب در فضای تنش‌های اصلی [۱۸]



شکل ۳-۹. معیار گسیختگی موهر کولمب و فون مایسز [۱۸]

۳-۵. روش‌های تحلیل

زمانی که عملیات گودبرداری صورت می‌گیرد خاک پشت نگهدارنده گود جابه‌جا می‌شود که این جابه‌جایی به فاکتورهای متعددی از جمله کیفیت ساخت‌وساز، نوع خاک و شرایط آب‌های زیرزمینی، شکل هندسه گود، مراحل گودبرداری، مدت‌زمان گودبرداری، شرایط سربار، وجود ساختمان‌های همسایه، روش‌های ساخت‌وساز دیوارهای نگهدارنده، عمق نفوذ، سختی دیوار، وابسته می‌باشد.

برای آنالیز یک گود و محاسبه تغییر شکل‌های به وجود آمده روش‌های مختلفی وجود دارد که به ترتیب زیر هستند:

۱. روش تحلیلی

۲. روش عددی

روش‌های تحلیلی بر اساس نتایج تجربی و مشاهدات در محل، نمودارها و روابطی به‌منظور پیش‌بینی رفتار گودبرداری‌ها ارائه می‌کنند؛ که در ادامه مروری بر هر یک از روش مذکور ارائه می‌گردد.

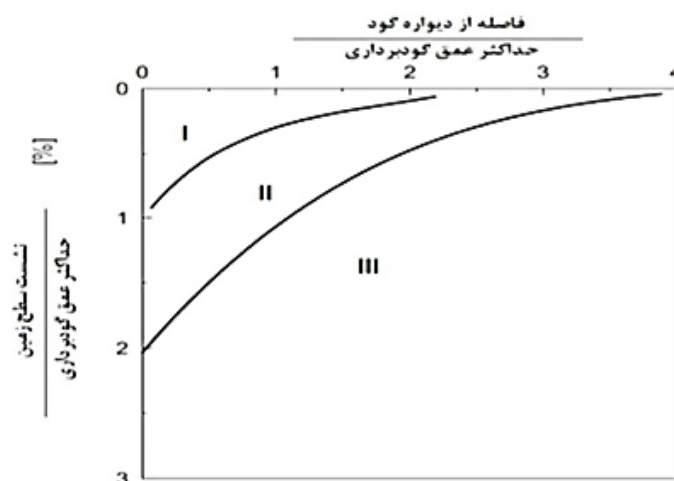
۳-۶. روش‌های تحلیلی برای نشست سطح زمین در اثر

گودبرداری

در این بخش به بررسی مطالعات انجام‌شده که در گذشته برای پایداری گودبرداری‌های مختلف با استفاده از روش تحلیلی و نتایج حاصل از مطالعات عددی صورت گرفته پرداخته می‌شود و مختصری از کارهای صورت گرفته و نتایج آن ارائه می‌گردد.

۳-۶-۱. پک [۱۹]

اولین تحقیقات توسط پک در سال ۱۹۶۹ به طور خلاصه، مشاهدات نشست سطح زمین اطراف گودبرداری را در منحنی شکل ۳-۸ نشان داد؛ که این منحنی نشست در سه محدوده III, II, I رده بندی شده است که به نوع خاک و طرز ساخت و ساز وابسته می باشد. در نتایج حاصل از تحقیقات پک، N_b عدد پایداری و N_{cb} عدد پایداری بحرانی برای جابجایی را بیان می کند. این مطالعه حاصل اندازه گیری های میدانی حاصل از اجرای گودبرداری با سیستم شمع نگهبان و استفاده از سپر (همراه با قیود مهاری) می باشد. همچنین ماکزیمم نشست زمین برای رس نرم تا خیلی نرم ۱٪ عمق ماکزیمم گودبرداری است. با توجه به فناوری های جدید، سیستم های نگهدارنده ساخته شده از لحاظ سختی، نحوه ساخت و کیفیت سیستم در سطح بالاتری از سیستم های ساخته شده در سال ۱۹۶۹ می باشد، همین امر موجب تخمین نشست های دست بالاتر و در نواحی وسیع تر از اطراف گود شده است. به هر حال روش پک اولین شیوه تجربی برای تخمین نشست سطح زمین بود که در واقع یک از نتایج مانیورینگ موارد مطالعاتی در شیکاگو و اوسلو برای ایجاد رابطه بین نشست سطح زمین و فاصله از دیوار برای خاک های مختلف استفاده کرد [۱۹].



شکل ۳-۱۰. نمودار محاسبه نشست ناشی از گودبرداری (پک، ۱۹۶۹) [۱۹]

در نمودار ارائه شده سه ناحیه مجزا مشخص شده است که به ترتیب زیر می باشند:

ناحیه I: ماسه و رس نرم تا سخت، عملکرد اجرایی متوسط

ناحیه II:

الف) رس خیلی نرم تا نرم

۱. عمق محدود در زیر کف گود

۲. عمق قابل توجه رس در کف گود $(N_{cb} = 5.14, N_b = \gamma H / C_{ub}) N_b < N_{cb}$ که C_{ub} مقاومت برشی

زهکشی نشده رس زیر سطح گودبرداری، γ وزن واحد حجم خاک، H ارتفاع گودبرداری است.

ب) نشست مؤثر ناشی از ساخت و سازهای دشوار

ناحیه III: رس نرم تا بسیار نرم با عمق قابل توجه و با $N_{cb} = 5.14, N_b \geq N_{cb}$

۳-۶-۲. کلاف و همکاران [۲۰]

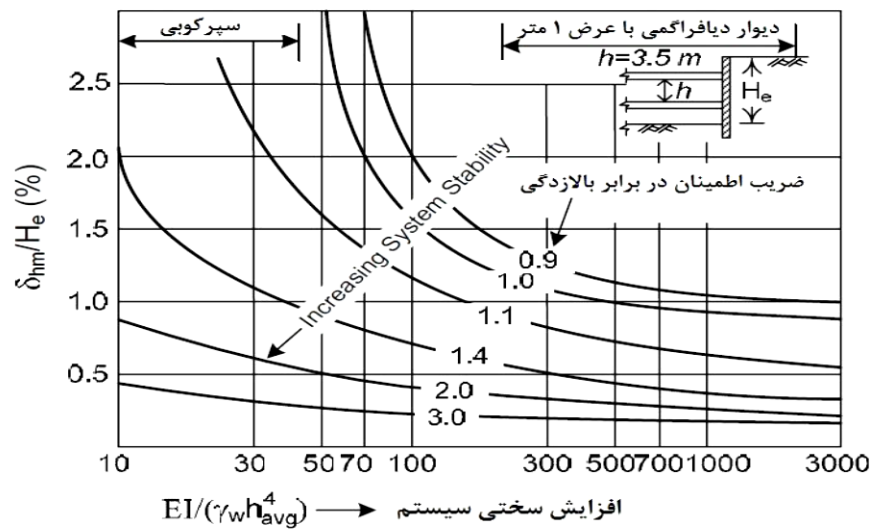
کلاف و همکاران نیز در سال ۱۹۸۹، روش نیمه تجربی برای تخمین جابه جایی گودبرداری ها در رس، وقتی که ماکزیمم تغییر شکل جانبی دیوار δ_{hm} ارزیابی شده، به ضریب اطمینان و سختی سیستم وابسته است که به صورت زیر تعریف می شود.

$$\text{System stiffness}(\eta) = EI / \gamma_w h^4 \quad (۴-۳)$$

EI سختی سیستم نگهدارنده گود و وزن مخصوص آب و h متوسط فاصله نگه دارنده ها از یکدیگر می باشد.

کلاف و همکاران، تأکید کردند که FS، مانند یک پارامتر شاخص، به وسیله سختی سیستم تعیین می شود مانند رفتار خمشی دیوار، متوسط فاصله نگهدارنده های عمودی و وزن مخصوص آب که در نرمالیزه کردن پارامترها استفاده می شود. شکل ۳-۱۱ رابطه بین سختی سیستم برای ضریب اطمینان های

مختلف جهت به دست آوردن را نشان می‌دهد. [۲۰]



شکل ۳-۱۱. نمودار تخمین تغییر شکل جانبی سیستم‌های نگهدارنده گود در خاک رس [۲۰]

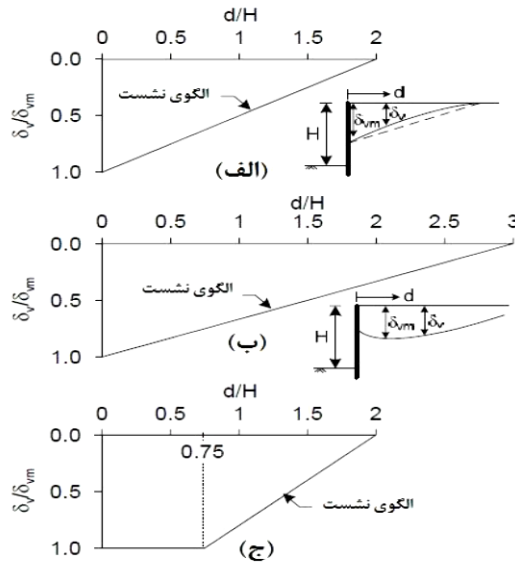
نمودارهای رسم شده در شکل برپایه شرایط متوسط، طرز ساخت مناسب و فرض آنکه تغییر شکل دیوارها به صورت طره‌ای است، می‌باشد.

۳-۶-۳. کلاف و رورکه [۲۱]

بر اساس چندین مورد مطالعاتی، کلاف و رورکه در سال ۱۹۹۰ پیشنهاد کردند که پروفیل نشست برای گودبرداری در خاک ماسه‌ای یا رس سخت، مثلثی شکل می‌باشد و ماکزیمم نشست سطح زمین در نزدیک دیوار نگهدارنده اتفاق می‌افتد. نمودار نشست سطح زمین در شکل ۳-۱۲ (الف) و ۳-۱۲ (ب) نشان داده شده است که در آن‌ها ناحیه مؤثر به ترتیب ${}^2\text{He}$ برای خاک ماسه‌ای و ${}^3\text{He}$ برای رس‌های سخت تا بسیار سخت می‌باشد. برای یک گودبرداری در رس نرم تا متوسط، ماکزیمم نشست معمولاً در فاصله‌ای از دیوار اتفاق می‌افتد و منحنی دوزنقه‌ای شکلی، نشست زمین را ایجاد می‌کند که در شکل ۳-۱۲ (ج) نشان داده شده است [۲۱].

ماکزیمم نشست سطح زمین در ناحیه‌ای حدود $0 < d/H_e < 0.75$ اتفاق می‌افتد. این در حالی است

که $0.75 < d/H_e < 2$ به عنوان ناحیه انتقال که در آن نشست‌ها از مقدار ماکزیمم، روند کاهشی به خود می‌گیرد، شناخته می‌شود.

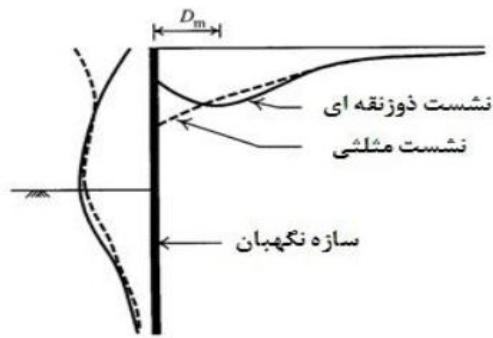


شکل ۳-۱۲. پروفیل‌های محاسبه نشست سطح زمین، الف: ماسه، ب: رس‌های محکم تا بسیار محکم، ج:

رس‌های نرم تا متوسط (کلاف و رورکه، ۱۹۹۰) [۲۱]

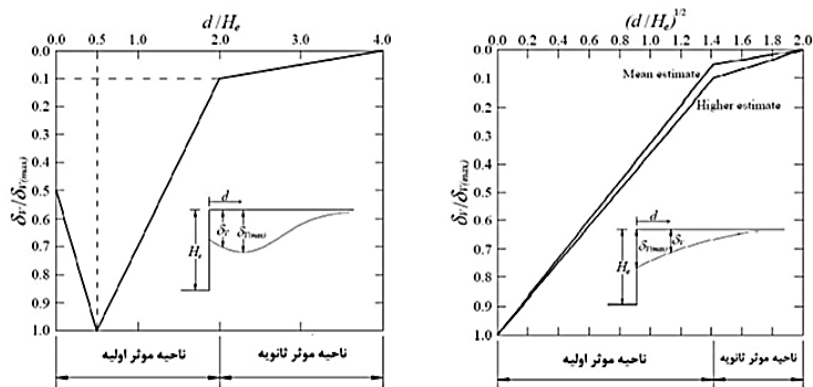
۳-۶-۴. هسیه و اوو [۲۲]

هسیه و اوو در سال ۱۹۹۸ دو نوع پروفیل مختلف نشست ناشی از گودبرداری را ارائه کردند. الف) نشست مثلثی شکل (نوع محدب)، ماکزیمم نشست سطحی نزدیک دیوار اتفاق می‌افتد. ب) نشست دوزنقه‌ای شکل (نوع مقعر)، ماکزیمم نشست سطحی در فاصله‌ای از دیوار نگهدارنده اتفاق می‌افتد (شکل ۳-۱۳).

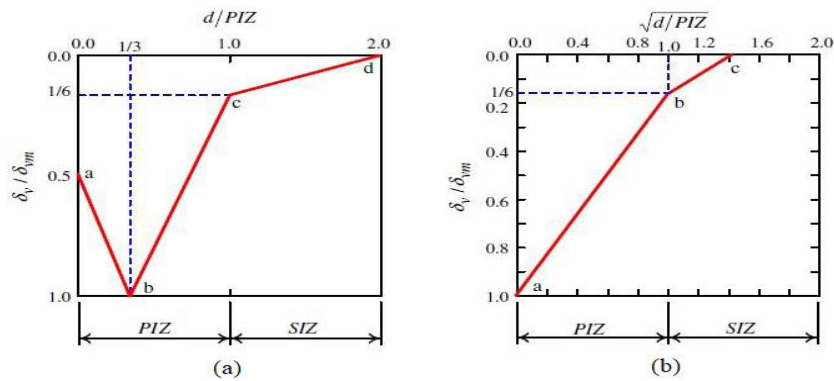


شکل ۳-۱۳. دو نوع پروفیل مختلف نشست [۲۲]

اگر تغییر شکل دیوار در اولین مرحله گودبرداری زیاد باشد و در مراحل بعدی، تغییر شکل نسبتاً کوچکی اتفاق بیفتد الگوی نشست مثلثی شکل می‌باشد. به عبارت دیگر، اگر در مراحل اولیه گودبرداری مقدار تغییر شکل دیواره که اتفاق می‌افتد در مقایسه با تغییر شکل‌های به وجود آمده در ترازهای عمیق‌تر نسبتاً کوچک باشد در ترازهای مختلف از نگهدارنده‌های جانبی استفاده می‌کنند. شکل نشست در این حالت ذوزنقه‌ای شکل می‌باشد. همچنین برای دو نوع پروفیل مختلف نشست، ناحیه مؤثر، محل وقوع ماکزیمم نشست و مقدار نشست، ارائه کردند. منحنی‌های نشست پیشنهادی در اشکال ۳-۱۴ و ۳-۱۵ نشان داده شده است [۲۲].



شکل ۳-۱۴. پروفیل‌های محاسبه نشست زمین (هسیه و اوو ۱۹۹۸) [۲۲]



شکل ۳-۱۵. پروفیل‌های محاسبه نشست زمین (هسیه و اوو ۲۰۱۱) [۲۳]

بر اساس شکل ۳-۱۵ (a)، منحنی نشست نوع مقعر می‌تواند به سه خط تقسیم شود. خط abc نشان‌دهنده ناحیه مؤثر اولیه و cd ناحیه مؤثر ثانویه می‌باشد. اثرات جداگانه هر یک از آن‌ها روی سازه‌ها مشابه حالت سهمی شکل است. خط ab در شکل ۳-۱۵ (b)، با یک شیب بیشتر، نشان‌دهنده ناحیه مؤثر اولی (PIZ) که در آن تغییر شکل زاویه‌ای در ساختمان‌ها به وجود می‌آورد، می‌باشد؛ بنابراین لازم است ایمنی ساختمان مجاور در برابر بزرگی δ_{vm} مورد توجه قرار گیرد. خط bc نشان‌دهنده ناحیه ثانویه (SIZ) اثر کمتری بر سازه‌های مجاور دارد (d فاصله از لبه گود). [۲۳]

۳-۷. مطالعات عددی

به خاطر پیچیدگی زیاد در مراحل گودبرداری، گاهی اوقات روش‌های تجربی نمی‌توانند به‌طور رضایت بخشی تغییر شکل‌های دیواره گود را پیش‌بینی کنند. علاوه بر این تأثیر فاکتورهای مؤثر بر گودبرداری را با استفاده از اطلاعات تجربی نمی‌توان به دست آورد به دلیل آنکه تعداد کمی از گودبرداری‌ها در شرایط خاک و ساخت‌وساز یکسان قرار دارند. از این‌رو استفاده از روش‌های عددی می‌تواند تأثیر فاکتورهای مؤثر بر گودبرداری را بیان کند. این روش‌ها شامل روش‌هایی همچون روش اجزا محدود، اختلاف محدود، حجم محدود و ... می‌باشد. روش‌های اجزاء محدود و اختلاف محدود نسبت به تیر بر بستر ارتجاعی نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهند، چراکه پارامترهای مؤثر بیشتری را در آنالیز شرکت

می‌دهند. در ادامه به معرفی روش اجزاء محدود به صورت خلاصه پرداخته می‌شود.

روش اجزاء محدود (Finite Element Method) یکی از روش‌های عددی است که اغلب در مسائل مکانیک جامدات مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش دارای دو ویژگی زیر است که آن را از سایر روش‌های عددی متمایز می‌سازد:

۱. در این روش از یک فرمول‌بندی انتگرالی جهت ایجاد یک دستگاه معادلات جبری استفاده می‌شود.
۲. در این روش از توابعی هموار و به‌طور قطعه‌های پیوسته، به نام توابع درونیاب، جهت تقریب کمیات مجهول استفاده می‌شود.

همچنین روش اجزاء محدود یکی از قدرتمندترین روش‌های عددی در تحلیل مسائل ژئوتکنیک از جمله گودبرداری عمیق نیز به حساب می‌آید. این روش با موفقیت توسط بسیاری از پژوهشگران برای تحلیل تنش کرنش گودبرداری‌های عمیق به کار رفته است. عوامل بسیاری بر رفتار گودبرداری‌های عمیق تأثیرگذار می‌باشد، از جمله لایه‌بندی خاک گود، سطح آب زیرزمینی، هندسه گودبرداری، سازه نگهبان و اندرکنش آن با خاک گود، تراوش به داخل گودبرداری، رفتار تنش کرنش خاک و غیره تمامی موارد مذکور را می‌توان در تحلیل‌های اجزاء محدود لحاظ نمود؛ بنابراین روش اجزاء محدود ابزاری بسیار کارآمد در تحلیل گودبرداری‌های عمیق به حساب می‌آید.

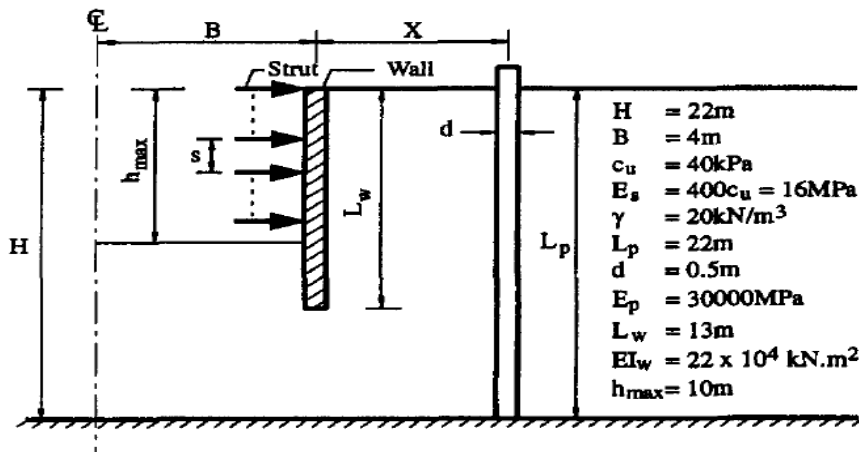
۳-۸. پیشینه موضوع پایدارسازی به روش شمع نگهبان

(مطالعات عددی صورت گرفته)

۳-۸-۱. پولوس و همکاران [۲۴]

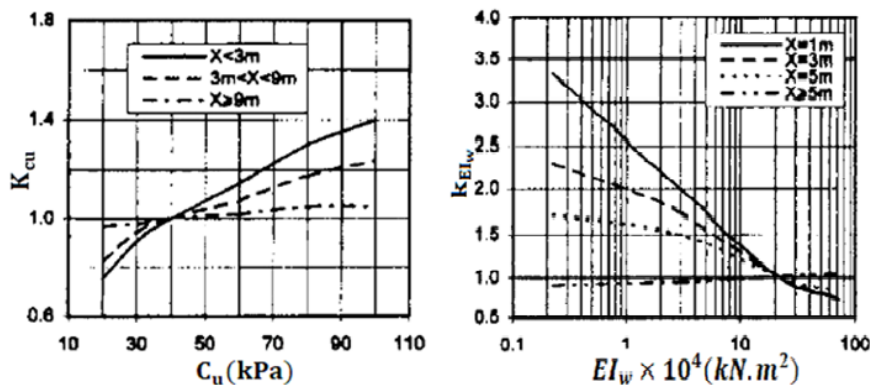
در سال ۱۹۹۷ پولوس و همکاران به پژوهش در مورد ممان خمشی ایجادشده در شمع مجاور گودبرداری

در خاک رسی پرداختند. برای این منظور از روش اجزا محدود و اجزا مرزی استفاده کردند. برای ناحیه خاک و المان‌هایی که با خاک تماس دارند از مدل الاستوپلاستیک ترسکا و برای ناحیه دیوار از نوع الاستیک خطی استفاده شده است. در این مدل فرض بر آن است که خاک موردنظر دارای یک‌لایه رس یکنواخت و در شرایط زهکشی نشده می‌باشد. پارامترها و ابعاد مورد استفاده برای مدل موردنظر در شکل ۱۶-۳ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۶. پارامترهای خاک و شمع منفرد [۲۴]

آن‌ها تاثیر پارامترهای فیزیکی خاک و همچنین سختی دیوار حائل و... را بر روی شمع، مورد مطالعه قرار دادند.



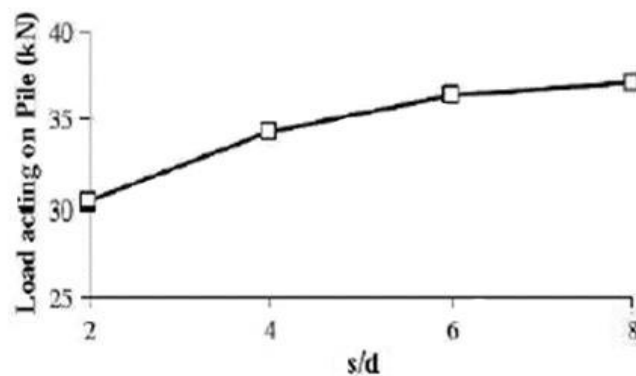
شکل ۳-۱۷. عوامل تأثیرگذار بر واکنش شمع [۲۴]

نتایج تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش مقاومت برشی زهکشی نشده، واکنش شمع افزایش می‌یابد و با افزایش سختی سیستم حائل و سختی استارت‌ها کاهش پیدا می‌کند.

۳-۸-۲. یحیی اوغلو و همکاران [۲۵]

در این پژوهش یک سری شبیه‌سازی عددی با استفاده از روش المان محدود برای بررسی نیروهای اعمال‌شده به شمع‌های با فواصل متفاوت با در نظر گرفتن اثر قوس زدگی در خاک ماسه‌ای انجام گردید و اثر فاصله بین شمع‌ها (از ۲ تا ۸ برابر قطر شمع) و زاویه اصطکاک داخلی (۲۵ تا ۳۵ درجه) بر رفتار قوس زدگی را مورد بررسی قرار دادند و به نتایج زیر رسیدند. [۲۵]

۱- با افزایش فاصله بین شمع‌ها، بار اعمال‌شده بر آن‌ها کاهش می‌یابد. باین‌حال هنگامی که این فاصله از ۸ برابر قطر بیشتر می‌شود، هر شمع به‌صورت مجزا رفتار می‌کند و اثر قوس زدگی به‌شدت کاهش می‌یابد.

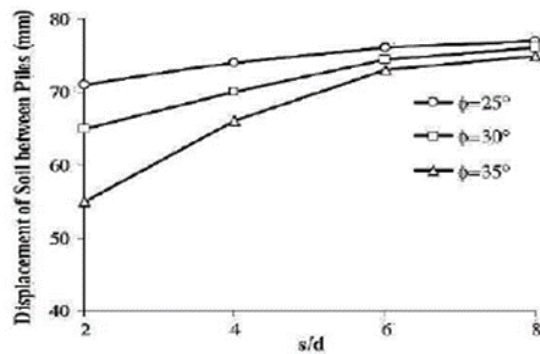


شکل ۳-۱۸. تاثیر نیروی اعمال‌شده به شمع در برابر فاصله بین شمع‌ها [۲۵]

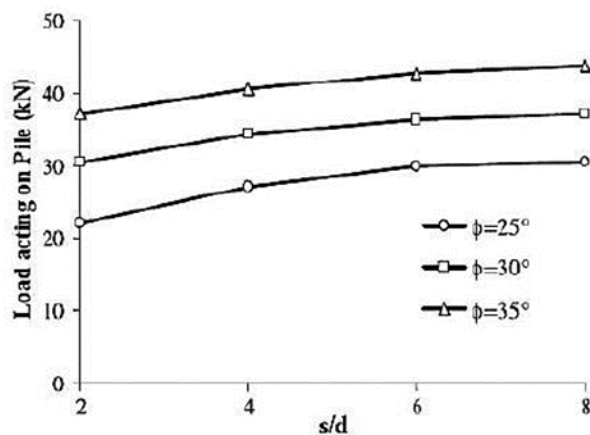
۲- خاک با زاویه اصطکاک داخلی بیشتر، قفل‌شدگی بین‌دانه‌ای بزرگ‌تر ایجاد می‌کند و در نتیجه اثر قوس زدگی در خاک قوی‌تر می‌شود. در این صورت بار بیشتری به شمع‌ها منتقل شده و در اثر قوس زدگی جابه‌جایی کمتری در خاک بین شمع‌ها به وجود خواهد آمد.

۳- اثر تفاوت در زاویه اصطکاک داخلی، هنگامی که فاصله بین شمع‌ها ۸ برابر قطر باشد، محدود می‌گردد

که این نشان دهنده مؤثر نبودن قوس زدگی در فاصله بیشتر از ۸ برابر قطر است.



شکل ۳-۱۹. اثر زاویه اصطکاک بر روی جابه‌جایی خاک بین شمع‌ها [۲۵]

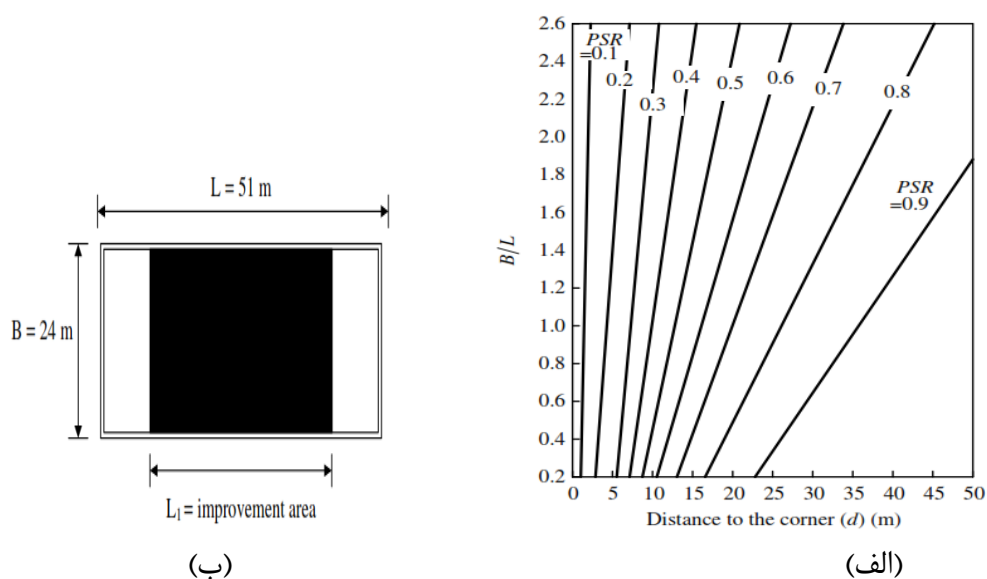


شکل ۳-۲۰. اثر زاویه اصطکاک بر بار اعمالی به شمع‌ها [۲۵]

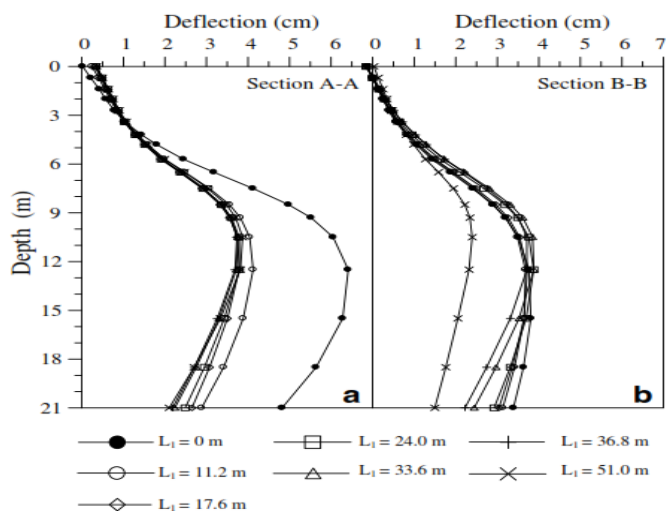
۳-۸-۳. چانگ اوپو و همکاران [۲۶]

ایشان در سال ۲۰۰۸ به بررسی تغییر مکان دیوار و نشست زمین در خاک‌برداری‌های عمیق و همچنین بررسی جابه‌جایی افقی تحت تاثیر گوشه‌های گود با روش المان محدود پرداخته‌اند. برای تخمین تغییر مکان در شرایط کرنش مسطح از PSR استفاده می‌شود. این پارامتر برابر نسبت حداکثر جابه‌جایی قائم به حداکثر تغییر مکان قائم در حالت کرنش مسطح می‌باشد. اگر PSR برابر یک باشد یعنی مقطع در حالت کرنش مسطح قرار دارد. هر چه این مقدار بالاتر باشد به این معنی است که مقطع کمتر تحت تاثیر گوشه‌های گود می‌باشد.

در شکل ۳-۲۱ که توسط ایشان ارائه شده است، رابطه‌ای بین $\frac{B}{L}$ (نسبت عرض به طول)، d (فاصله از گوشه) و PSR بررسی شده است. چند مدل‌سازی در راستای طول انجام شده و در هر یک فرض شده است که تنها در طول مشخصی بهسازی صورت گرفته است. پارامتری تحت عنوان I_r که نسبت پیشرفت است تعریف می‌گردد که برابر با نسبت طول بهسازی شده به طول گود است. برای طول دیوار ۱۱/۲ متر میزان حداکثر تغییر مکان از ۶/۵ به ۴/۲ سانتی‌متر مطابق شکل ۳-۲۲ کاهش می‌یابد.



شکل ۳-۲۱. (الف): تاثیر پارامتر PSR در فاصله از لبه گود (ب): نحوه تعریف پارامتر I_r [۲۶]

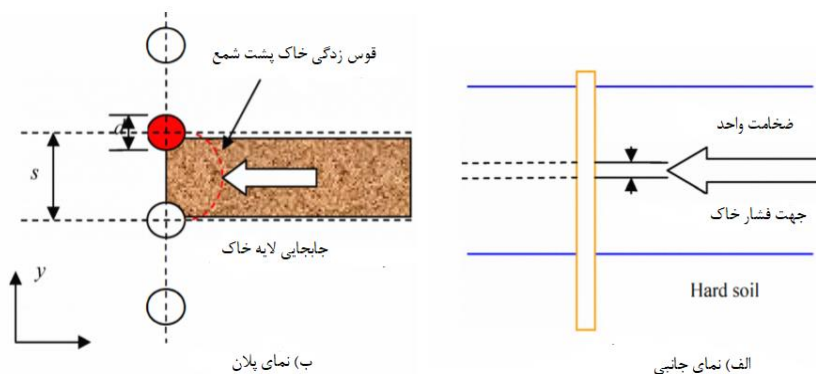


شکل ۳-۲۲. تاثیر پارامتر I_r در کاهش تغییر مکان [۲۶]

طبق بررسی‌های انجام‌شده حداکثر تغییر مکان در مرکز وجه رخ نمی‌دهد بلکه در فاصله ۱۵ متری گوشه گود اتفاق می‌افتد. با استفاده از دیوار ۱۱/۲ متری تغییر مکان رخ داده در مرکز کاهش می‌یابد.

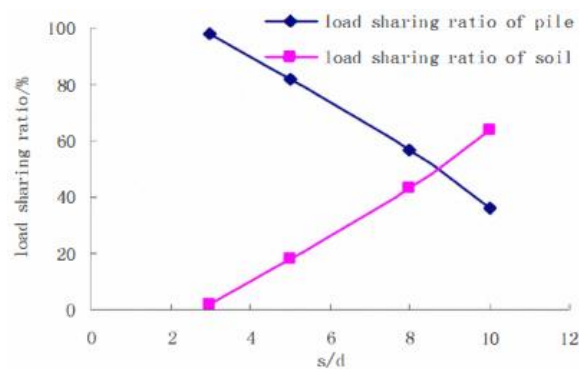
۳-۸-۴. چانگ و همکاران [۲۷]

در سال ۲۰۱۰ چانگ و همکاران به بررسی پدیده قوس زدگی بین شمع‌ها، تحت شرایط کرنش صفحه‌ای با روش اجزاء محدود پرداختند و تأثیر فاصله بین شمع‌ها، ضریب پواسون، مدول بانگ و زاویه اصطکاک داخلی خاک را در پدیده قوس زدگی مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش مدل رفتاری خاک مورد نظر موهر کولمب و رفتار شمع‌ها الاستیک در نظر گرفته شده است.



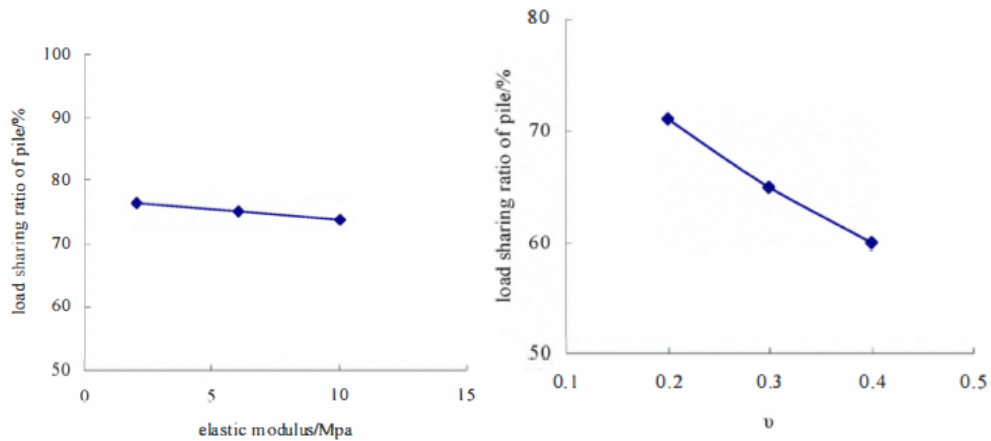
شکل ۳-۲۳. قوس زدگی خاک لغزنده بین شمع [۲۷]

تأثیر فاصله محوری شمع‌ها بر روی پدیده قوس زدگی در شکل ۳-۲۴ نشان داده شده است.



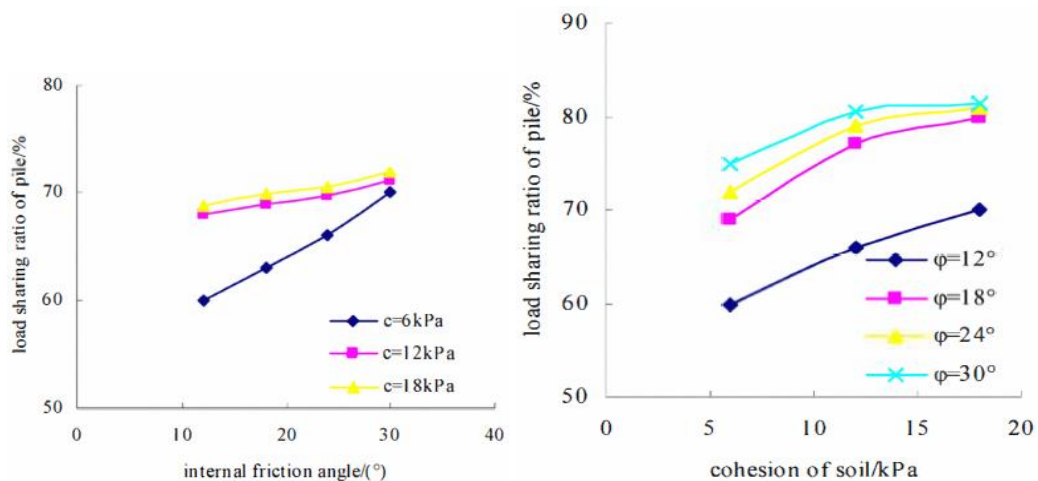
شکل ۳-۲۴. تغییرات نسبت قوس زدگی با فاصله شمع‌ها [۲۷]

نتایج تحلیل نشان داد زمانی که فاصله بین شمع‌ها ۳ تا ۸ برابر قطرشان باشد، اثر قوس زدگی وجود خواهد داشت و همچنین فاصله منطقی بین شمع‌ها را ۲/۵ تا ۳/۵ برابر قطرشان بیان کردند. شکل ۳-۲۵ تأثیرات مدول الاستیسیته و ضریب پواسون را بر روی قوس زدگی خاک ارائه می‌دهد.



شکل ۳-۲۵. تأثیر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون [۲۷]

با توجه به نمودارها می‌توان دریافت که مدول یانگ و ضریب پواسون اثر کمی روی قوس زدگی دارند. در این پژوهش همچنین تأثیرات چسبندگی و زاویه اصطکاک نیز بررسی شد که در شکل ۳-۲۶ ارائه شده است.



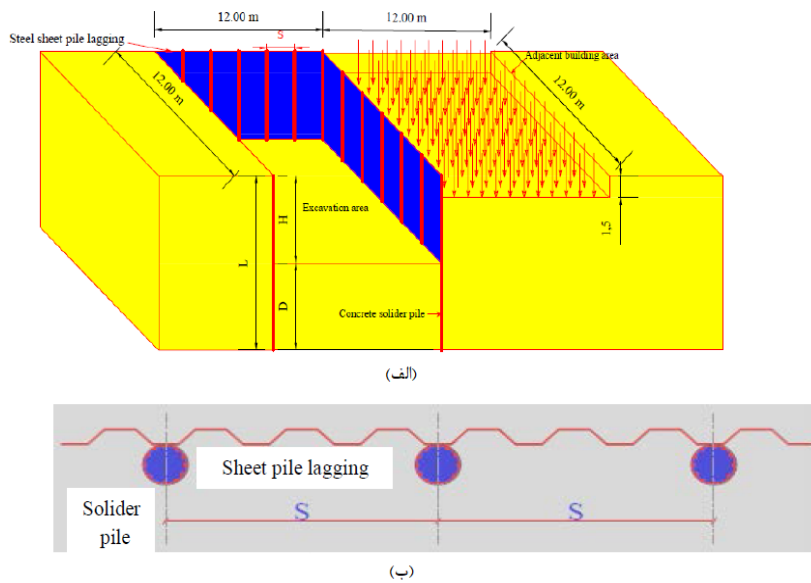
شکل ۳-۲۶. تأثیر چسبندگی خاک و زاویه اصطکاک خاک [۲۷]

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک، اثر قوس زدگی نیز افزایش پیدا

می‌کند مخصوص زمانی که چسبندگی خاک کمتر باشد این روند آشکارتر است. [۲۷]

۳-۸-۵. مصطفی عبدو و همکاران [۲۸]

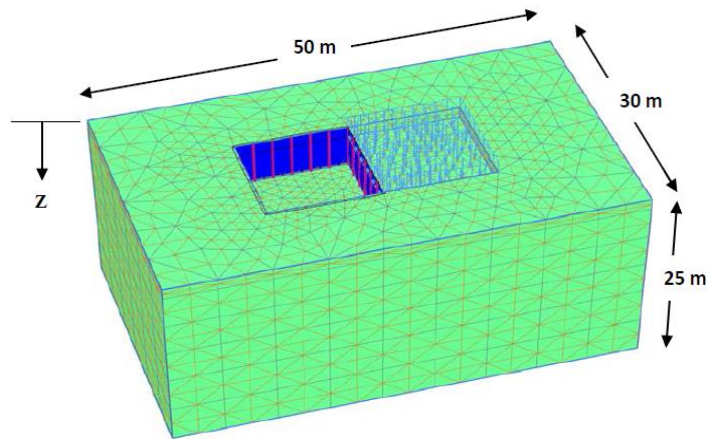
مصطفی عبدو و همکاران در سال ۲۰۱۶ با استفاده از روش عددی، یک گود پایدارشده با سیستم شمع نگهبان و شیت پایل را به صورت مدل سه بعدی المان محدود در نرم افزار Plaxis شبیه سازی کردند. در این پژوهش مطالعات پارامتریک، تاثیر فاصله‌ی بین شمع‌ها، قطر شمع‌ها، نوع خاک ماسه‌ای بر رفتار مدل موردنظر بررسی شده است.



شکل ۳-۲۷. مدل پیشنهادی مصطفی عبدو و همکاران [۲۸]

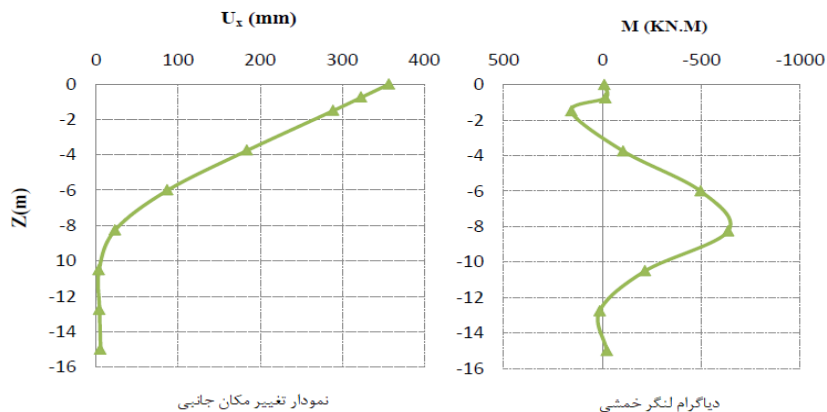
الف) مدل گودبرداری و ساختمان همسایه (ب) مقطع افقی شمع‌ها و ورق شیت پایل

مش بندی گود مدل سازی در شکل ۳-۲۸ نشان داده شده است.



شکل ۳-۲۸. مش بندی سه بعدی مدل [۲۸]

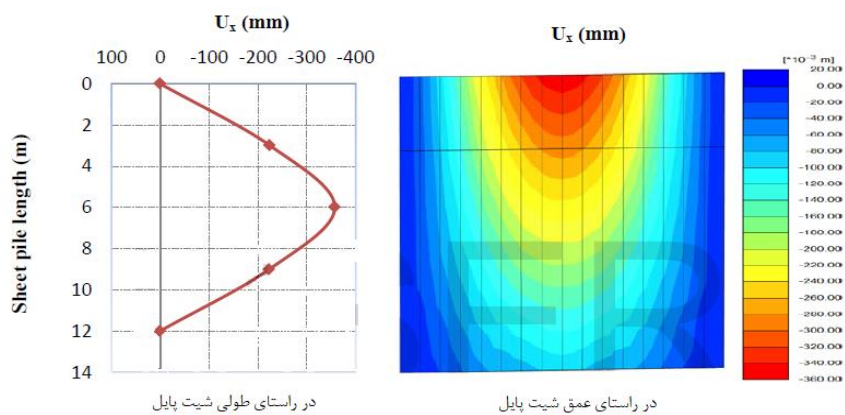
برای مرحله تحلیل از مدل رفتاری موهرکلمب برای خاک و مدل رفتاری الاستیک خطی برای بتن و فولاد استفاده شده است. برای نتایج اجزا محدود تغییر مکان جانبی و لنگر خمشی شمع نگهبان و دیوار شیت پایل، عمق گودبرداری برابر ۶ متر، فاصله بین شمع‌ها ۲، ۳ و ۴ متر و قطر شمع‌ها ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ متر در هر دو نوع خاک ماسه‌ای متوسط و متراکم بررسی شده است. بار ناحیه ساختمان مجاور گود برابر $150 \frac{KN}{m^2}$ نیز می‌باشد. شکل ۳-۳۲ تغییر مکان جانبی و لنگر خمشی شمع واقع در قسمت میانی گود، مجاور ساختمان همسایه را هنگامی که فاصله بین شمع‌ها ۳ متر و قطر شمع‌ها ۰/۵ متر و خاک ماسه‌ای متوسط می‌باشد ارائه شده است.



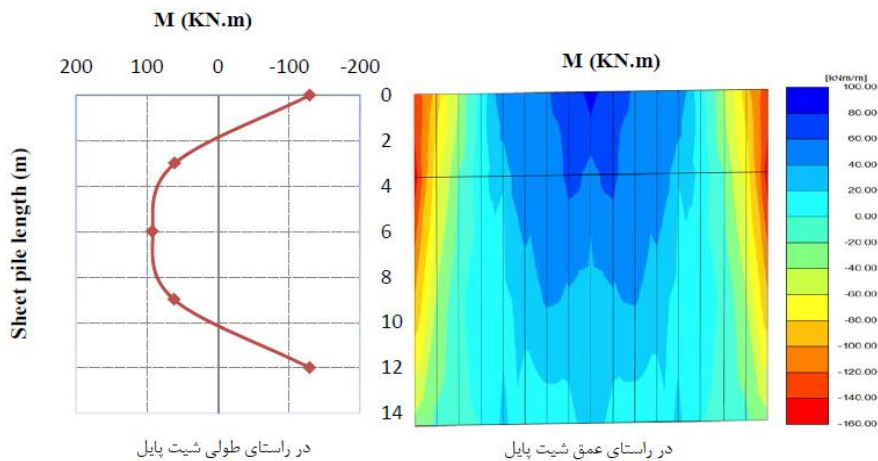
شکل ۳-۲۹. نمودارهای تغییر مکان جانبی و لنگر خمشی شمع نگهبان [۲۸]

مشاهده می‌شود که حداکثر تغییر مکان شمع در بالای شمع اتفاق می‌افتد و با افزایش عمق گودبرداری

تا عمق ۱۰/۵ متری تغییر مکان کاهش یافته و سپس با افزایش عمق تا نقطه انتهایی شمع دوباره افزایش پیدا می‌کند. همچنین حداکثر لنگر خمشی در عمق ۸/۵ متری اتفاق می‌افتد. اشکال ۳-۳۰ و ۳-۳۱ به ترتیب تغییر مکان جانبی و لنگر خمشی دیوار شیت پایل مجاور خانه همسایه را هنگامی که قطر شمع‌ها ۰/۵ متر و فاصله بین شمع‌ها ۳ متر و نوع خاک ماسه‌ای متوسط است نشان می‌دهد.



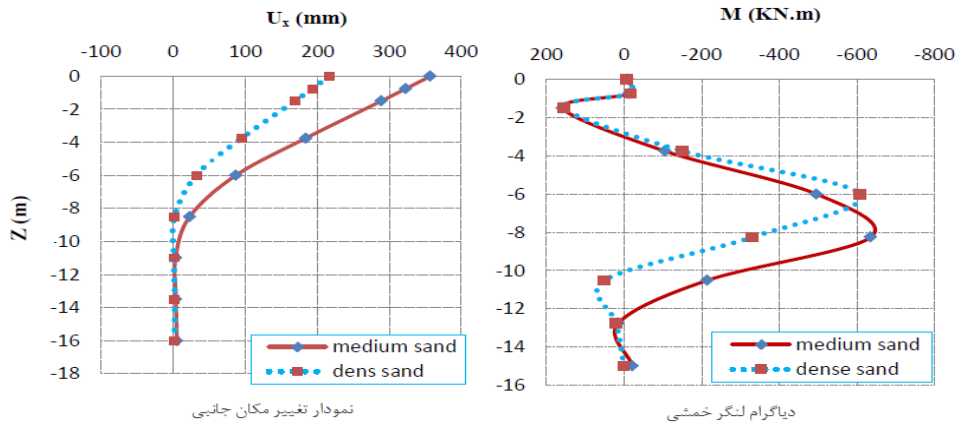
شکل ۳-۳۰. تغییر مکان جانبی شیت پایل [۲۸]



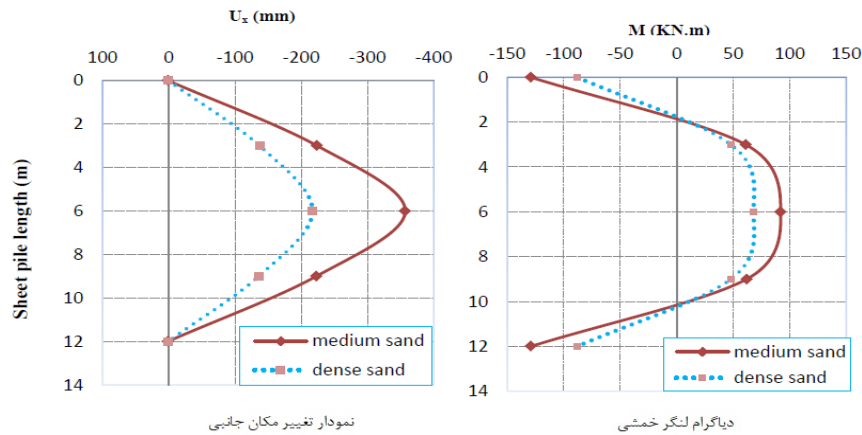
شکل ۳-۳۱. لنگر خمشی دیوار شیت پایل [۲۸]

ملاحظه می‌شود که حداکثر جابجایی جانبی و لنگر خمشی مثبت در دهانه‌ی میانی شیت پایل و در سطح زمین اتفاق می‌افتد و با افزایش عمق، کاهش پیدا می‌کند. اشکال ۳-۳۲ و ۳-۳۳ به ترتیب تاثیر قطر شمع‌ها را بر روی تغییر مکان جانبی و لنگر خمشی شمع

نگهبان و دیوار شیت پایل در حالتی که فاصله‌ی بین شمع‌ها ۳ متر و نوع ماسه‌ای متوسط است نشان می‌دهد.



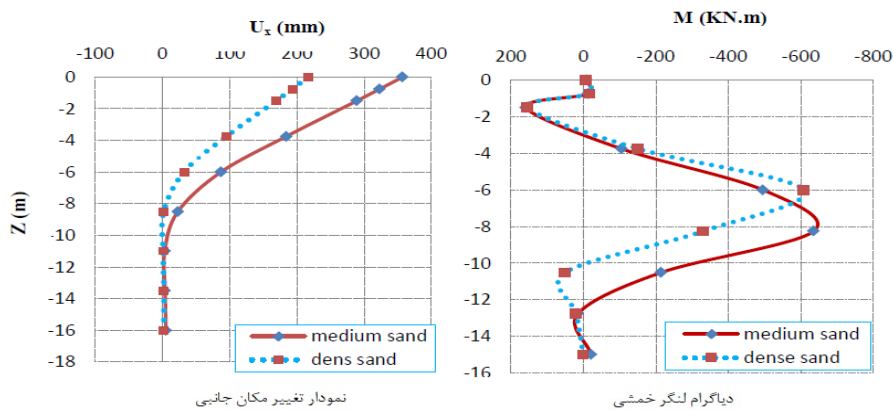
شکل ۳-۲۲. نمودارهای تغییر مکان جانبی و لنگر خمشی شمع نگهبان [۲۸]



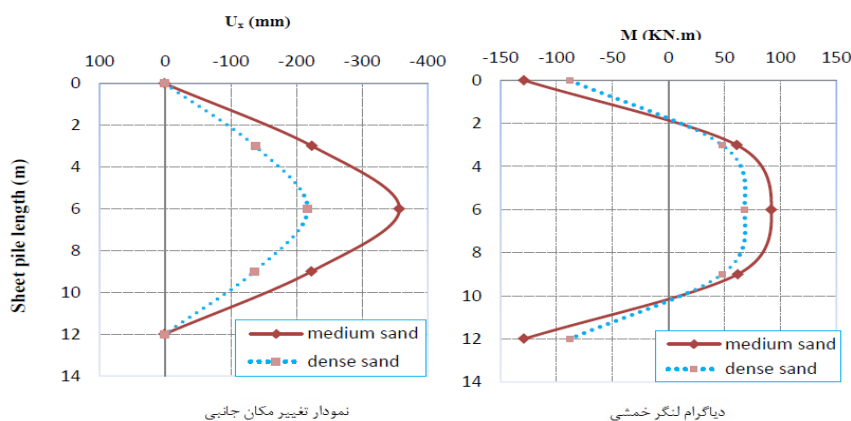
شکل ۳-۲۳. نمودارهای تغییر مکان جانبی و لنگر خمشی شیت پایل [۲۸]

نتایج تحلیل نشان می‌دهد که با افزایش قطر شمع از ۰/۴ متر (شمع A) به ۰/۵ متر (شمع B) و تا ۰/۶ متر (شمع C)، تغییر مکان جانبی شمع نگهبان کاهش ولی لنگر خمشی افزایش پیدا می‌کند. از طرفی دیگر با افزایش قطر شمع‌های نگهبان، تغییر مکان جانبی و لنگر خمشی دیوار شیت پایل کاهش پیدا کرده است.

اشکال ۳-۳۴ و ۳-۳۵ تاثیر نوع خاک ماسه‌ای را بر روی تغییر مکان جانبی و لنگر خمشی شمع نگهبان و دیوار شیت پایل در حالتی که فاصله‌ی بین شمع‌ها ۳ متر و قطر شمع‌ها ۰/۵ متر است نشان می‌دهد.



شکل ۳-۳۴. نمودارهای تغییر مکان جانبی و لنگر خمشی شمع نگهبان [۲۸]



شکل ۳-۳۵. نمودارهای تغییر مکان جانبی و لنگر خمشی شیت پایل [۲۸]

همان طور که در شکل مشاهده می‌شود با کاهش زاویه اصطکاک خاک ماسه‌ای از $\phi = 36^\circ$ (ماسه متراکم) به $\phi = 33^\circ$ (ماسه متوسط)، تغییر مکان جانبی شمع نگهبان و دیوار شیت پایل و همچنین لنگر خمشی دیوار شیت پایل افزایش پیدا می‌کند و مقدار حداکثر آن مقداری ثابت است. این در حالی است که مقدار حداکثر لنگر خمشی شمع نگهبان با تغییر زاویه اصطکاک متغیر هست به صورتی که با کاهش زاویه اصطکاک، حداکثر لنگر خمشی منفی افزایش یافته ولی مقدار حداکثر لنگر خمشی مثبت با افزایش زاویه اصطکاک خاک ماسه‌ای افزایش پیدا کرده است.

فصل ۴

مدل سازی عددی گودبرداری

۴-۱. صحت سنجی

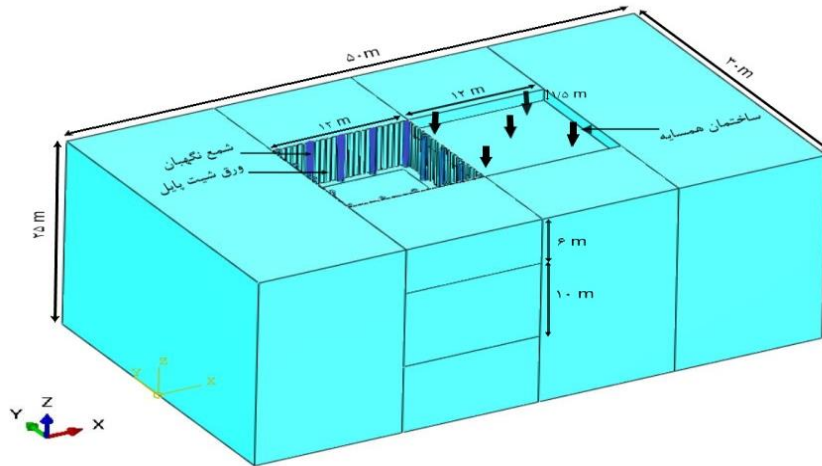
۴-۱-۱. مقدمه

در ابتدا به منظور صحت سنجی و به عنوان اولین مدل، گود به همراه شمع و شیت پایل مورد بررسی قرار گرفت. در این حالت شمع تا عمق ۱۵ متری زمین اجرا شده است. پارامتر بررسی شده در این حالت جابجایی افقی شمع و شیت پایل است که پیش از این توسط آقای مصطفی عبدو در سال ۲۰۱۶ مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج در ادامه بیان شده است.

۴-۱-۲. مدل سازی

۴-۱-۲-۱. هندسه مدل

مدل تعریف شده در این قسمت شامل بلوک خاک با ابعاد $25 \times 30 \times 50$ است که به صورت شکل پذیر مدل شده است. شمع‌ها نیز به صورت مدل ۳ بعدی و شکل پذیر با قطر 0.5 m و طول 16 m در فاصله یکسان $2/85$ متری از یکدیگر، مدل شده‌اند که تا عمق ۱۶ متری از سطح بلوک خاکی اجرا شده است. عمق گودبرداری ۶ متر است همچنین یک دیواره گود در مجاورت پی ساختمان با عمق $1/5$ متر قرار گرفته است. جهت تثبیت خاک اطراف شمع در دیواره گود از شیت پایل به طول دیواره و هم‌ارتفاع عمق گود استفاده شده است. شکل ۴-۱ هندسه مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱. هندسه مدل گود با شمع و شیت پایل

۲-۲-۱-۴. تعریف مصالح

خاک مدل شده برای بلوک، ماسه‌ای و با مشخصات جدول زیر است.

جدول ۴-۱. مشخصات خاک

مصالح	ν	E (Mpa)	γ (kN/m^3)	ψ	ϕ	C (Kpa)
ماسه	۰/۳	۲۵	۱۸	۳	۳۳	۱

شمع به صورت بتن مسلح اجرا شده است. رفتار مصالح به صورت خطی مدل شده است و مشخصات آن مطابق جدول زیر است.

جدول ۴-۲. مشخصات بتن - شمع

مشخصات	ν	E (Gpa)	γ (kN/m^3)	I (m^4)	D (m)
بتن - شمع	۰/۲	۲۲	۲۴	۰/۰۰۳۱	۰/۵

ورق‌های نگهدارنده دیواره گود (شیت پایل) از نوع فولاد و رفتار آن نیز به صورت خطی در نظر گرفته شده است و دارای مشخصات زیر است.

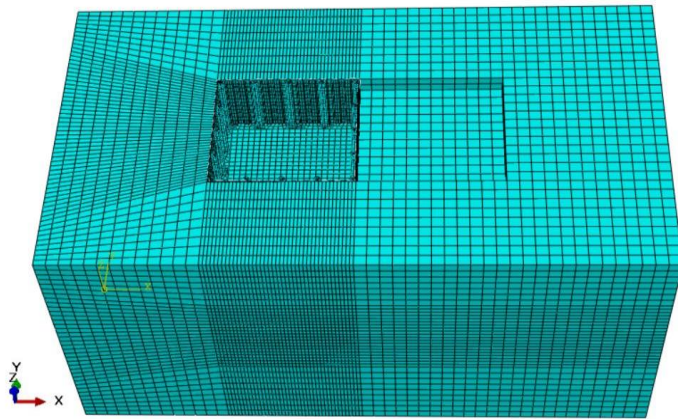
جدول ۴-۳. مشخصات شیت پایل

$G3$ (Gpa)	$G2$ (Gpa)	$G1$ (Gpa)	γ (kN/m ³)	$E3$ (Gpa)	$E2$ (Gpa)	$E1$ (Gpa)	ν	t (m)	شیت پایل
۸۱	۸۱	۸۱	۷۸/۵	۲۱۰	۲۱۰	۲۱۰	۰/۳	۰/۰۵	

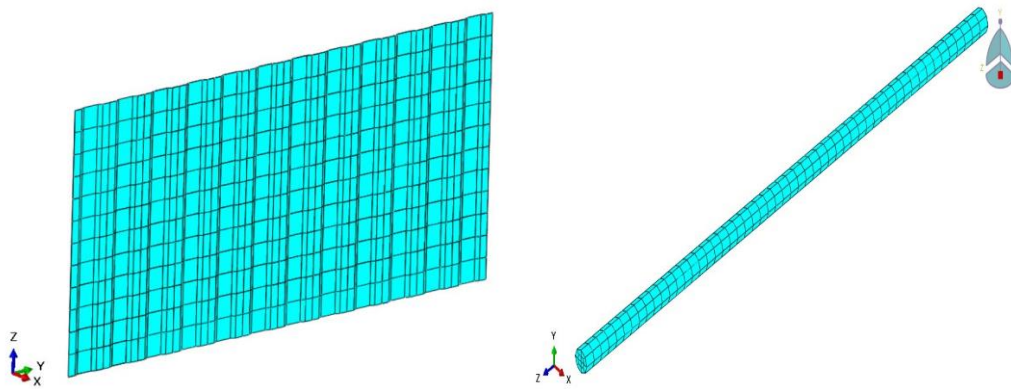
۴-۱-۲-۳. شرایط تماس، شرایط مرزی و المان بندی

بلوک خاک، شمع و شیت پایل شبیه‌سازی شده با استفاده از المان‌های توپر C3D8R المان بندی شده‌اند. رفتار المان‌ها نیز به صورت خطی لحاظ شده است. با توجه به حجم مدل و تعداد زیاد المان، ابعاد المان‌ها ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. در این مدل تماس بین خاک با شیت پایل و شمع به صورت تماس سطح به سطح تعریف شده است. همچنین این تماس به صورت تئوری پنالتی و ضریب اصطکاک ۰/۴ در راستای مماسی در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی بلوک به صورتی اعمال شده است که جابجایی در راستای عمود بر دیواره‌های مرزی بلوک خاک صفر شده است. پس از اعمال شرایط مرزی ابتدا شتاب گرانش بر مدل اعمال شده و سپس در یک ضلع دیواره گود سربار ناشی از وزن ساختمان به صورت بار گسترده در ابعاد ۱۲×۱۲ m و به میزان ۱۵۰ kN/m^3 روی خاک قرار می‌گیرد. در این مدل‌ها جابه‌جایی شمع و شیت پایل در راستای عمود بر صفحه دیواره گود مورد بررسی قرار می‌گیرد.

المان بندی بلوک خاک، شمع و شیت پایل به صورت شکل‌های ۲-۴ و ۳-۴ است.

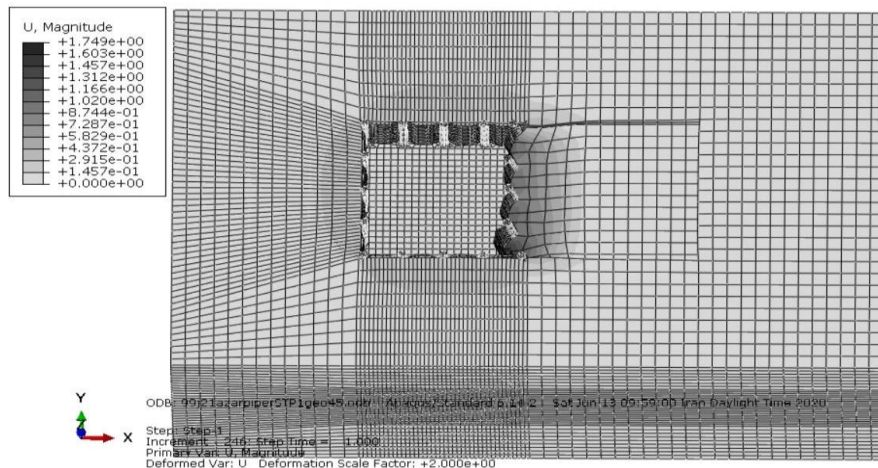


شکل ۴-۲. المان بندی مدل



شکل ۴-۳. المان بندی شمع وشیت پایل

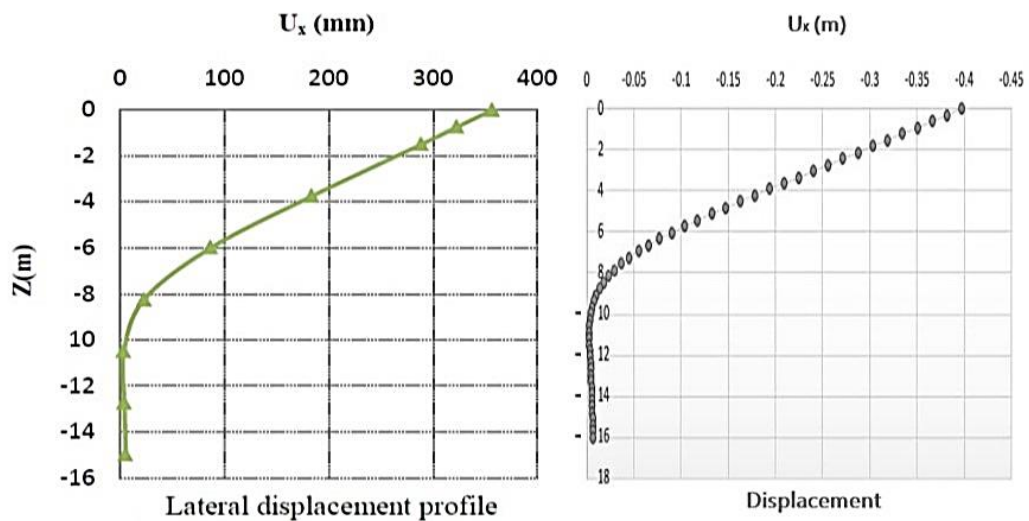
در شکل ۴-۴ میزان جابجایی مدل، پس از اعمال سربار نشان داده شده است.



شکل ۴-۴. المان بندی مدل پس از اعمال سربار

۴-۱-۳. مقایسه نتایج با مدل آقای عبدو و همکاران

نمودار شکل ۴-۵ نشان‌دهنده رفتار شمع در اثر وزن ناشی از سربار است. نمودار سمت راست مربوط به جابجایی شمع مدل شده در ضلع مجاور به سربار ساختمان است. این جابجایی در اثر بار 150 kN/m^3 و در راستای عمود بر صفحه دیواره گود اندازه‌گیری شده است. نمودار سمت چپ نتایج مدل آقای عبدو و نمودار سمت راست نتایج مدل صحت‌سنجی است. در مدل نگارنده سطح مقطع و طول شمع با المان‌های 30 cm المان بندی شده است. همچنین خاک از نوع ماسه‌ای با تراکم نسبی 50% در نظر گرفته شده است. سطح خاک، سطح مبنا در نظر گرفته شده و با افزایش عمق مقدار Z افزایش پیدا می‌کند. نتایج گرفته شده در این بخش به صورت نمودار زیر است.

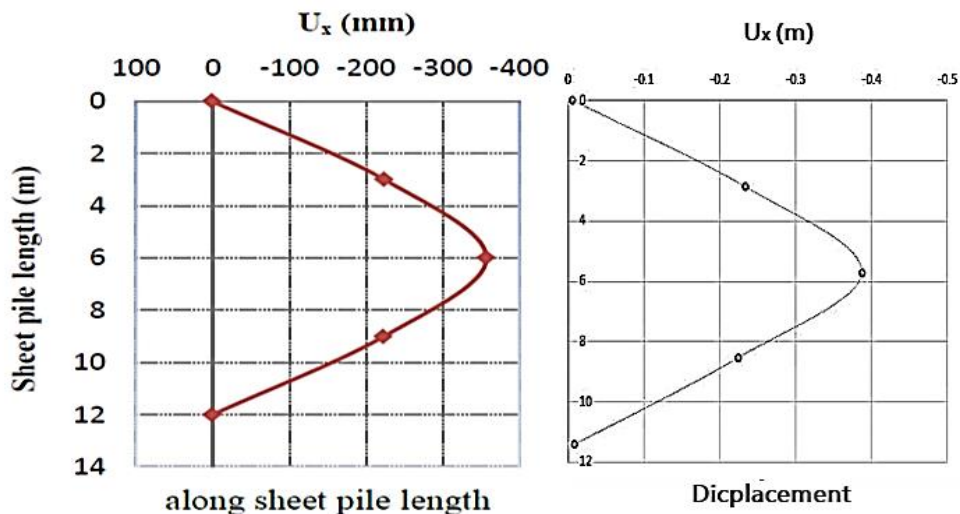


شکل ۴-۵. مقایسه نتایج حاصل از مدل صحت‌سنجی (سمت راست) با مدل آقای عبدو (سمت چپ)

طبق شکل ۴-۵، با افزایش عمق جابجایی افقی شمع کاهش می‌یابد. این روند کاملاً با نتایج مدل آقای عبدو مطابقت دارد.

برای مقایسه بیشتر نمودار جابجایی شیت پایل دیواره گود مجاور به سربار، در راستای عمود بر دیواره، در ارتفاع میانی شیت پایل (۳ متر از سطح) و در طول شیت پایل گرفته شده و با نتایج مدل آقای عبدو

مقایسه شده است. در سمت راست نمودار شکل ۴-۶ نتایج مدل صحت سنجی و در سمت چپ نتایج مدل آقای عبدو نشان داده شده است.



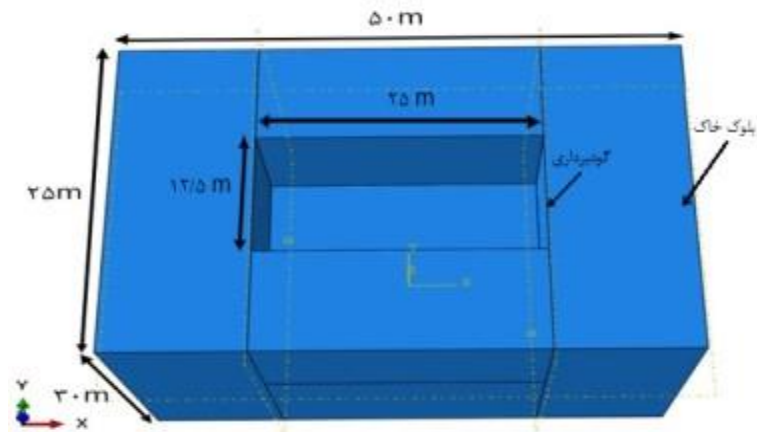
شکل ۴-۶. مقایسه جابجایی ورق شیت پایل در مدل صحت سنجی (سمت راست) و مدل آقای عبدو (سمت چپ)

در ابتدا و انتهای طول شیت پایل، شمع و خاک دیواره‌های کناری گود باعث ایجاد نیروی مقاوم در شمع می‌شوند که این نیرو در نقاط میانی لبه گود به حداقل می‌رسد؛ بنابراین با فاصله گرفتن از لبه‌های گودبرداری، با توجه به کاهش گیرداری و نیروی مقاوم، جابجایی شیت پایل و شمع افزایش می‌یابد.

۴-۲. مدل گودبرداری بدون شمع

۴-۲-۱. هندسه مدل

در این حالت خاک بدون هیچ سازه نگهدارنده‌ای خاک‌برداری شده است. مشخصات خاک مطابق با جدول ۴-۱ است. در این مدل ابعاد بلوک خاک $35 \times 40 \times 50$ m که در آن یک گودبرداری به عمق ۱۵ متر ایجاد شده، مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۴-۷ هندسه این مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۷. هندسه مدل گود بدون شمع نگهدارنده

۴-۲-۲. تعریف مصالح

در این مدل سازی خاک ماسه‌ای بدون چسبندگی در نظر گرفته شده و مدل رفتاری خاک موهر کولمب می‌باشد. مشخصات خاک استفاده شده در مدل سازی در جدول ۴-۴ آورده شده است.

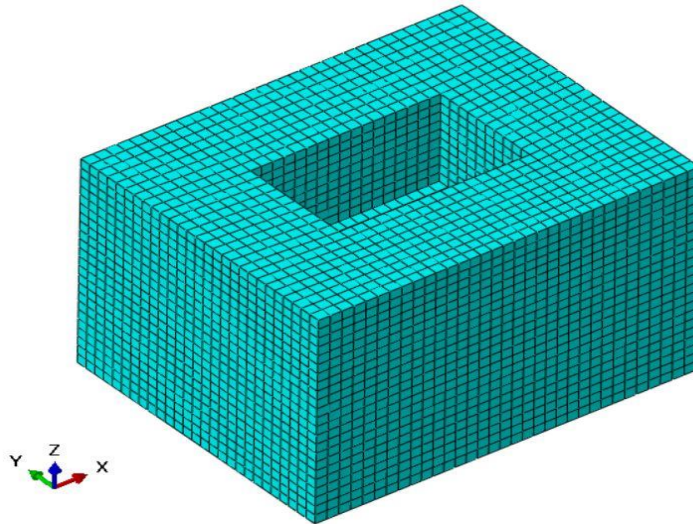
جدول ۴-۴. مشخصات خاک

مصالح	ν	E (Mpa)	γ (kN/m^3)	ψ	ϕ	C (Kpa)
ماسه	۰/۳	۲۵	۱۸	۳	۳۳	۰

۴-۲-۳. شرایط تماس، شرایط مرزی و المان بندی

بلوک خاک شبیه سازی شده با استفاده از المان‌های توپر C3D8R المان بندی شده‌اند. رفتار المان‌ها نیز به صورت خطی لحاظ شده است. با توجه به حجم مدل و تعداد زیاد المان، ابعاد المان‌ها ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی بلوک به صورتی اعمال شده است که جابجایی در راستای عمود بر دیواره‌های مرزی بلوک خاک صفر شده است. پس از اعمال شرایط مرزی شتاب گرانش مدل اعمال شده و مدل بدون سربار خارجی تحت اثر وزن خاک تحلیل شده است. در این مدل‌ها جابه‌جایی

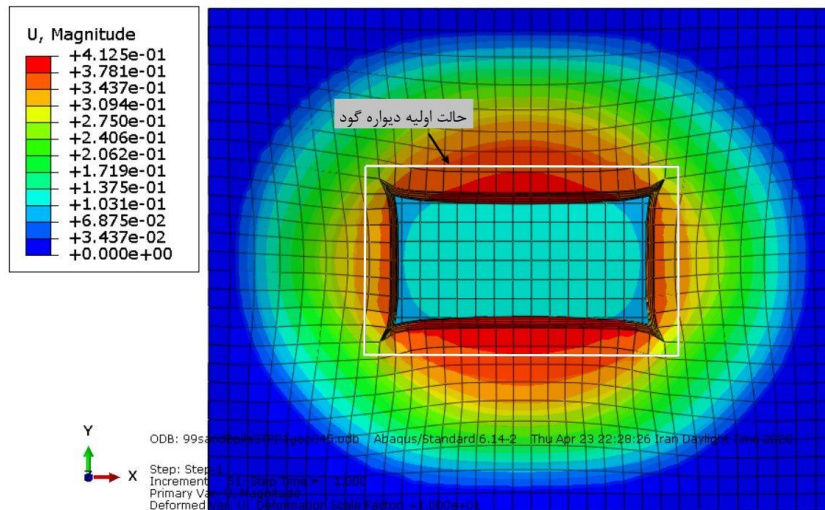
دیواره گود در راستای عمود بر صفحه دیواره گود مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است در این مدل گود ناپایدار است و تحلیل فقط در مدت زمان ۱ ثانیه ابتدایی صورت گرفته است. المان بندی بلوک خاک در این مدل به صورت شکل ۴-۸ است.



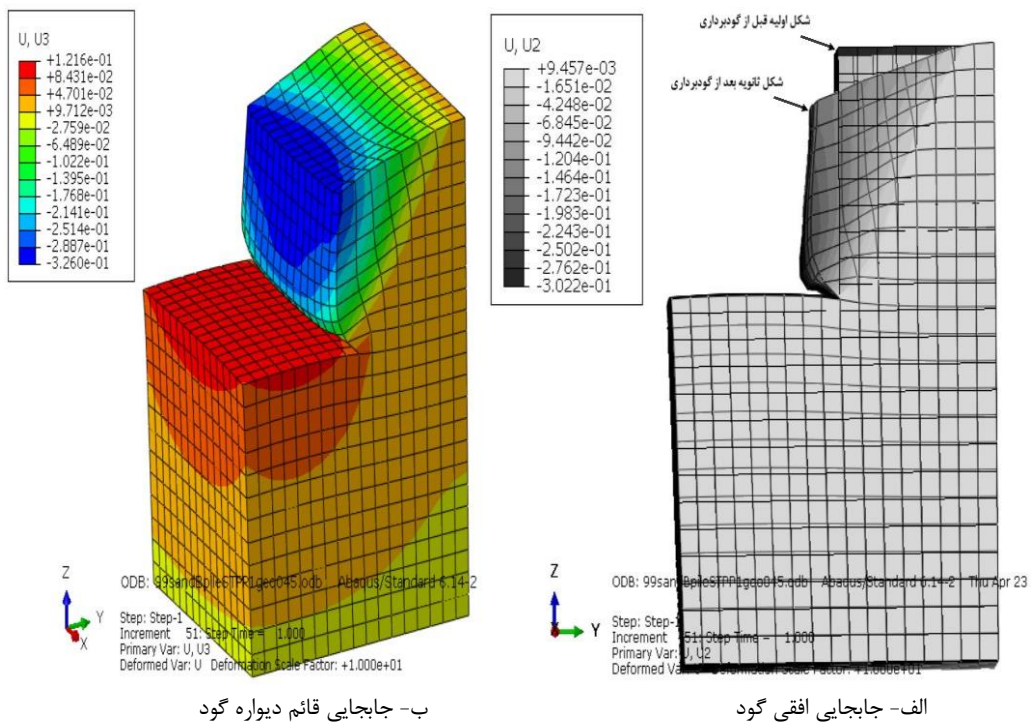
شکل ۴-۸. نمایش المان بندی بلوک خاک

۴-۲-۱. نمایش تغییر شکل و جابجایی ناشی از گودبرداری

با برهم خوردن تعادل تنش‌های ژئواستاتیک بر اثر حفاری خاک، دیواره گود به سمت داخل گود جابه‌جا می‌شود و کف گود نیز متورم می‌گردد. پس از انجام مراحل مدل‌سازی و پس از تحلیل نمونه، توزیع جابجایی در وجه طول بزرگ گود و در راستای y در شکل ۴-۹ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بیشترین جابجایی در وسط ضلع گود به وجود می‌آید که این امر ناشی از اثر گوشه‌ها در گودبرداری است.



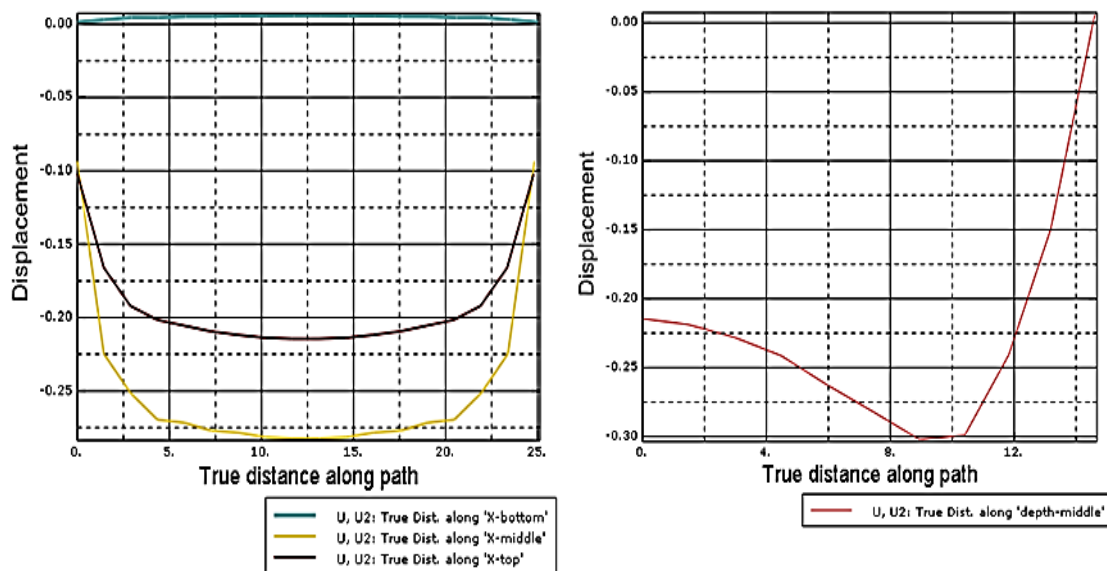
شکل ۴-۹. کانتور تغییر شکل پس از گودبرداری (مدل بدون شمع)



شکل ۴-۱۰. کانتورهای جابجایی افقی و قائم (مدل بدون شمع)

در شکل ۴-۱۰ الف جابجایی در جهت محور افقی (بر حسب متر) نشان داده شده است همان طور که ملاحظه می شود خاک در دیواره گود به سمت داخل حرکت کرده و حداکثر جابجایی افقی دیواره تقریباً برابر ۳۰ سانتی متر و همچنین با توجه با شکل ۴-۱۰ ب جابجایی های قائم مثبت و منفی مدل به صورت

شماتیک نمایش داده شده و مشاهده می شود که این مقادیر در کف گود مثبت و در سطح مدل منفی می باشد. در سطح مدل (زمین اطراف گود) بیشترین نشست در لبه گود اتفاق می افتد که این نشست رابطه مستقیم با جابجایی افقی دیوار دارد، پس برای دیوارهایی که سختی بیشتری دارند نشست کمتری در اطراف گود رخ می دهد. در کف گود، خاک دچار تورم شده و به سمت بالا حرکت کرده و حداکثر جابجایی قائم در کف گود برابر ۱۲ سانتی متر است. جابجایی بحرانی در میانه ضلع بزرگتر اتفاق افتاده است به همین جهت خروجی های نمودار در ادامه بررسی ها در این منطقه گرفته خواهد شد. خروجی ها به دو دسته جهت بررسی جابجایی عمود بر صفحه گود تقسیم بندی شده است. دسته اول در راستای ضلع بزرگتر (محور X مدل سازی) در عمق میانی گود برای بررسی خمیدگی (شکم دیواره گود) و دسته دوم راستای عمق (محور Z مدل سازی) در وسط ضلع بزرگتر برای بررسی تاثیر عمق مورد بررسی قرار گرفته و به عبارتی دیگر این نمودار پلان تغییر مکان های افقی دیواره گود را در عمق های مختلف نشان می دهد.

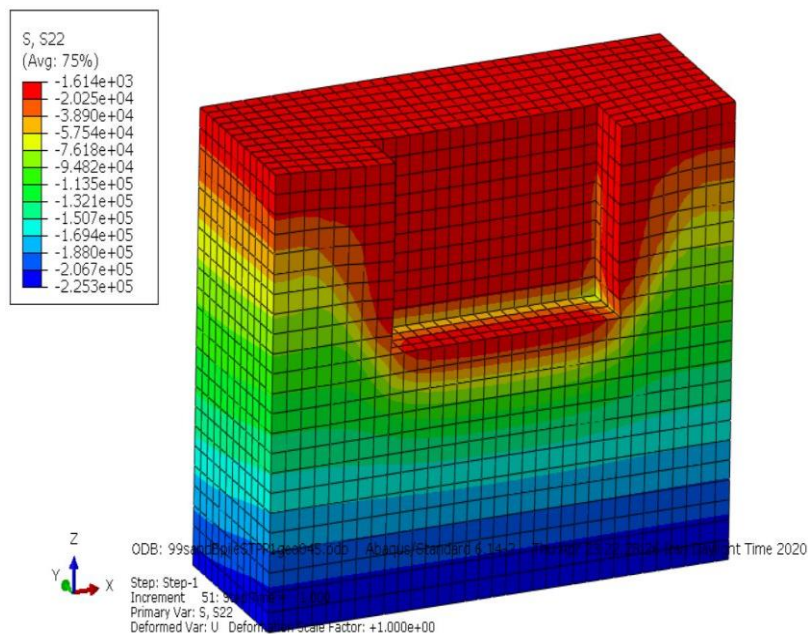


شکل ۴-۱۱. بررسی تاثیر عمق (نمودار چپ) و فاصله از کناره گود (نمودار راست) در جابجایی دیواره نمودار شکل ۴-۱۱ نشان دهنده جابجایی دیواره گود در راستای Y است. طبق توضیحات پاراگراف قبل،

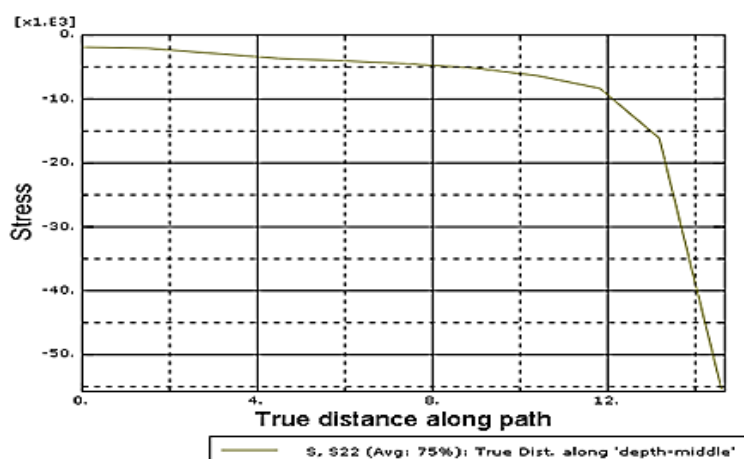
مسیر خروجی نمودار سمت چپ به بررسی عمق و نمودار سمت راست به بررسی بیرون زدگی دیواره گود در بالا، میان و پایین دیوار گود پرداخته است. با توجه نمودار ۴-۱۱ (راست) با افزایش عمق، جابجایی بیشتر می شود و به مقدار حداکثر ۳۰ سانتی متر می رسد؛ اما در عمق ۹ متری روند معکوس شده و جابجایی تا کف گود کاهش می یابد. می توان مقاومت و فشردگی خاک کف گود را در دلیل کاهش جابجایی دانست. همچنین نمودار ۴-۱۱ (چپ) نشان می دهد با فاصله گرفتن از کف گود و حرکت به سمت سطح خاک، همچنین با فاصله گرفتن از لبه های کناری گود، جابجایی افزایش می یابد. جابجایی بحرانی در هر ۳ ارتفاع، در فاصله ۱۲/۵ متری، نقطه میانی ضلع گودبرداری، اتفاق افتاده است.

۴-۲-۲. بررسی تنش افقی کل

شکل ۴-۱۱ کانتورهای تنش افقی دیواره گود را پس از مرحله گودبرداری و در انتهای تحلیل در مدل گود بدون شمع را نشان می دهد.

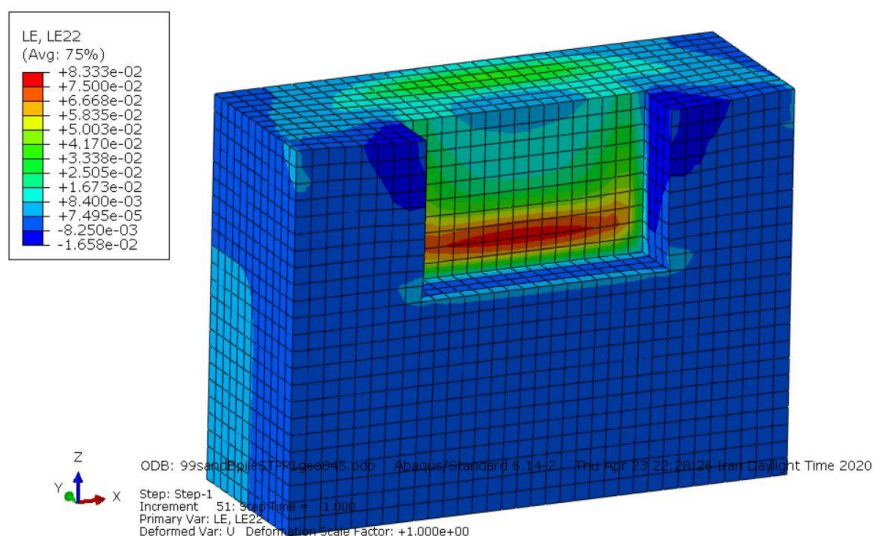


شکل ۴-۱۲. نمایش کانتورهای تنش افقی در راستای محور Y

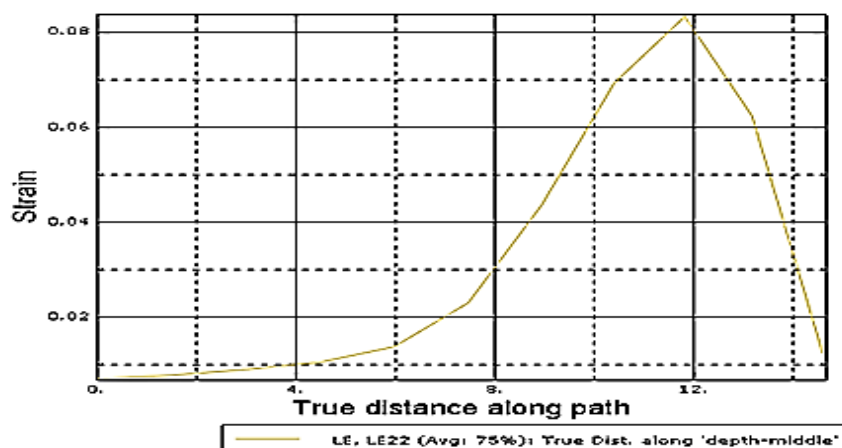


شکل ۴-۱۳. تنش در راستای محور Y برای بررسی عمق

همان‌طور که در شکل‌های ۴-۱۲ و ۴-۱۳ نشان داده است بیشترین مقدار تنش پس از انتهای تحلیل در ترازهای پایین مدل به وجود می‌آید. با توجه به توزیع تنش افقی مثلی در خاک ماسه‌ای شیب تغییرات تنش نیز به صورتی که تا عمق ۱۲ متر در محدوده ۱۰ کیلو پاسکال و از عمق ۱۲ تا ۱۵ متر در محدوده ۵۰ کیلو پاسکال قرار دارد. در شکل ۴-۱۴ کانتورهای کرنش اصلی دیواره گود در مدل گود بدون شمع را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۴. نمایش کانتور کرنش اصلی در راستای محور Y

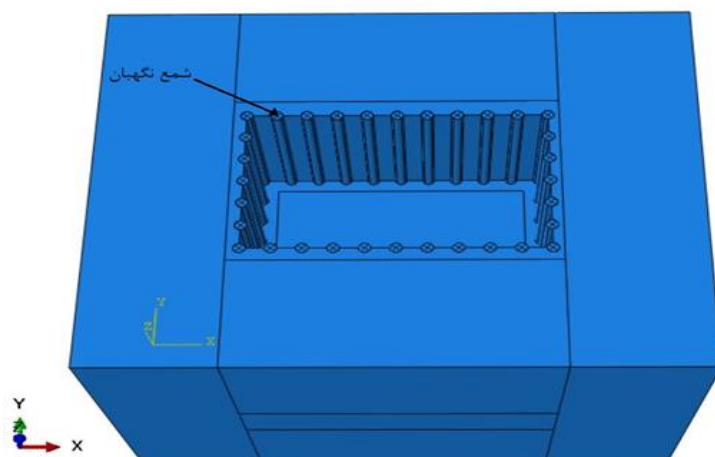


شکل ۴-۱۵. کرنش اصلی در راستای محور Y برای بررسی عمق

با توجه به نمودار شکل ۴-۱۵، بیشترین میزان کرنش در راستای عمود بر صفحه گود در عمق ۱۲ متری به میزان ۸ درصد اتفاق افتاده است. تغییرات کرنش تا عمق ۷ متر در محدوده ۲ درصد و با نزدیک شدن عمق ۱۲ متر در محدوده ۸ درصد قرار می‌گیرد که می‌توان نتیجه گرفت این نقطه مستعد شروع گسیختگی و ریزش دیواره گود باشد. با توجه به بحرانی بودن عمق ۱۲ متر، در ادامه نمودارهای جابجایی دیواره گود، در طول ضلع و در راستای محور X، در عمق ۱۲ رسم خواهد شد.

۴-۳. مدل گودبرداری با شمع‌های نگهبان

در این حالت شمع به‌عنوان سازه نگهبان برای بلوک خاک‌برداری لحاظ شده است. مشخصات خاک مطابق با جدول ۴-۱ است. در این مدل نیز ابعاد بلوک خاک $35 \times 40 \times 50$ m که در آن یک گودبرداری به عمق ۱۵ متر ایجاد شده، مورد بررسی قرار گرفته است. این گود با استفاده از شمع‌های بتنی درجا به ارتفاع ۱۵ متر که ۶ متر آن در خاک مدفون است، پایدار شده است. فاصله شمع‌ها از یکدیگر ۲/۵ متر و مقطع شمع‌ها دایره‌ای و به قطر ۱ متر در نظر گرفته شده است. شکل ۴-۱۶ هندسه این مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۶. هندسه مدل گود با شمع نگهدار

۴-۳-۲. تعریف مصالح

با توجه به مدل انتخابی، مشخصات خاک در این مدل نیز همانند جدول ۴-۴ می باشد. مشخصات شمع ها در محیط غیرمتخلخل با رفتار الاستیک خطی مدل سازی شده است [۲۹]. مشخصات بتن و شمع در جدول ۴-۵ ارائه شده است.

جدول ۴-۵. مشخصات بتن - شمع

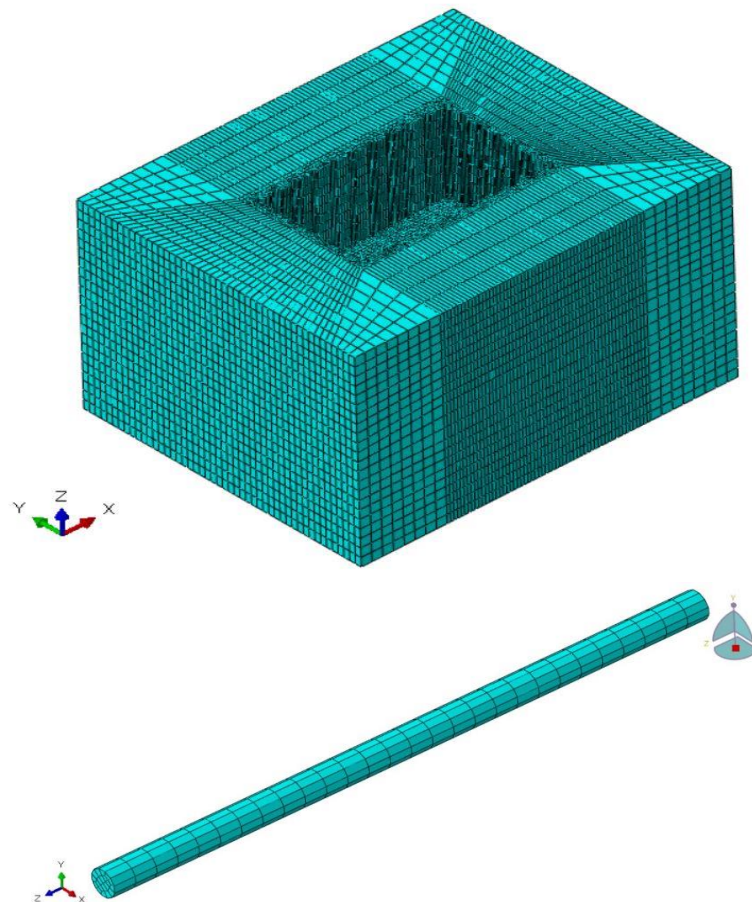
$D (m)$	$\gamma (kN/m^3)$	$E (Gpa)$	ν	مشخصات
۰/۵	۲۴	۲۶	۰/۲	بتن - شمع

۴-۳-۳. شرایط تماس، شرایط مرزی و المان بندی

بلوک خاک و شمع شبیه سازی شده با استفاده از المان های توپر C3D8R المان بندی شده اند. رفتار المان ها نیز به صورت خطی لحاظ شده است. با توجه به حجم مدل و تعداد زیاد المان، ابعاد المان ها ۵۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است. در این مدل تماس بین خاک و شمع به صورت تماس سطح به سطح

تعریف شده است. همچنین این تماس به صورت تئوری پنالتی و ضریب اصطکاک 0.4 در راستای مماسی در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی بلوک به صورتی اعمال شده است که جایجایی در راستای عمود بر دیواره‌های مرزی بلوک خاک صفر شده است. پس از اعمال شرایط مرزی، شتاب گرانش مدل اعمال شده و مدل بدون سربار خارجی تحت اثر وزن خاک تحلیل شده است. در این مدل نیز جابه‌جایی دیواره گود و شمع در راستای عمود بر صفحه دیواره گود مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است تحلیل در مدت زمان 1 ثانیه ابتدایی و قبل از فرار ماسه بین شمع‌ها صورت گرفته است.

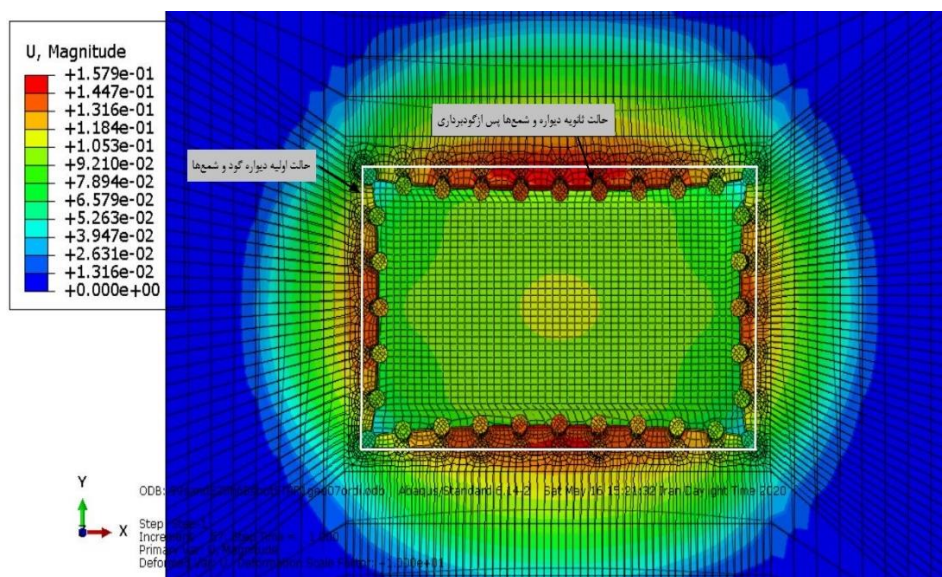
المان بندی بلوک خاک و شمع به صورت شکل ۴-۱۷ است.



شکل ۴-۱۷. المان بندی بلوک خاک و شمع

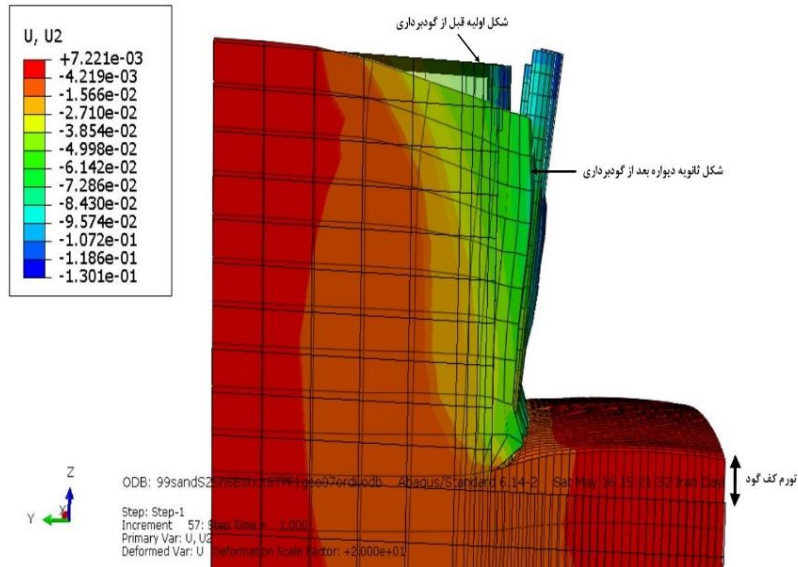
۴-۳-۱. نمایش تغییر شکل و جابجایی ناشی از گودبرداری

در این قسمت تغییر شکل‌های گود معرفی شده در قسمت ۴-۳ که با استفاده شمع‌های نگهبان پایدارسازی شده است با بزرگنمایی اغراق آمیز نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که در نمودار جابجایی جانبی دیواره گود از محل خاک پشت شمع استخراج گردیده است.

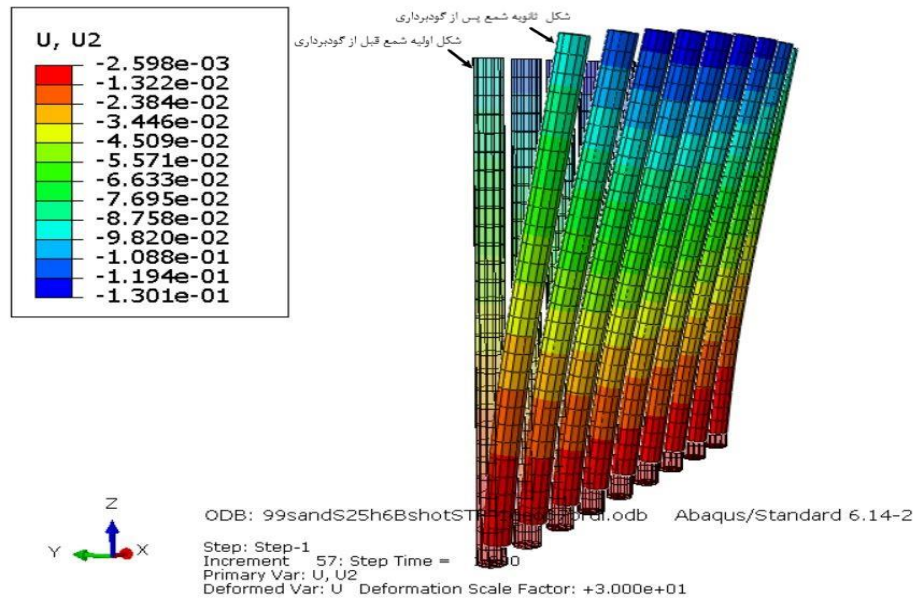


شکل ۴-۱۸. کانتور تغییر شکل پس از گودبرداری (مدل با شمع)

با توجه به شکل ۴-۱۸ که نشانگر توزیع تغییر مکان‌ها در اطراف گود است بیشترین جابجایی‌ها در لبه گود اتفاق می‌افتد که این تغییر مکان رابطه مستقیم با جابجایی افقی دیواره گود دارد. نمای تغییر شکل و جابجایی گود در حالت پایداری با شمع نگهبان بعد از پایان تحلیل به صورت کانتور تغییر مکان افقی و قائم در شکل‌های ۴-۱۹ و ۴-۲۰ نشان داده شده است.

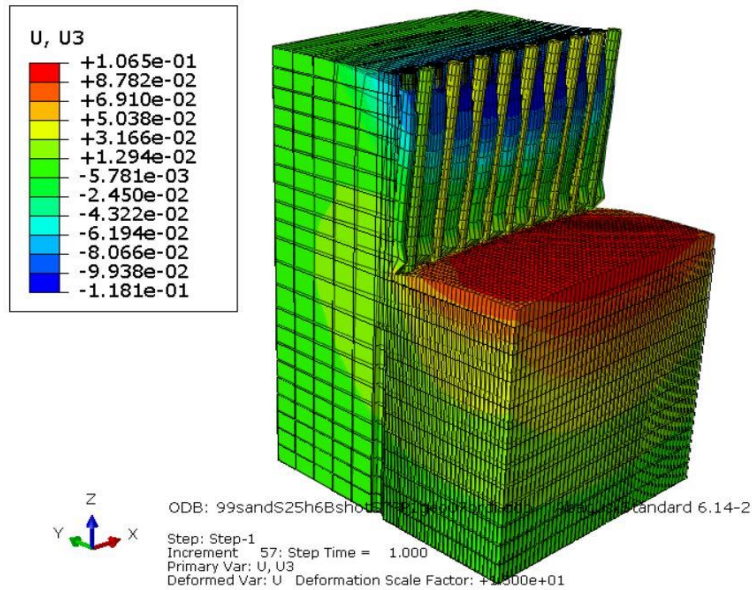


شکل ۴-۱۹. کانتور تغییر مکان افقی دیواره گود (مدل با شمع)



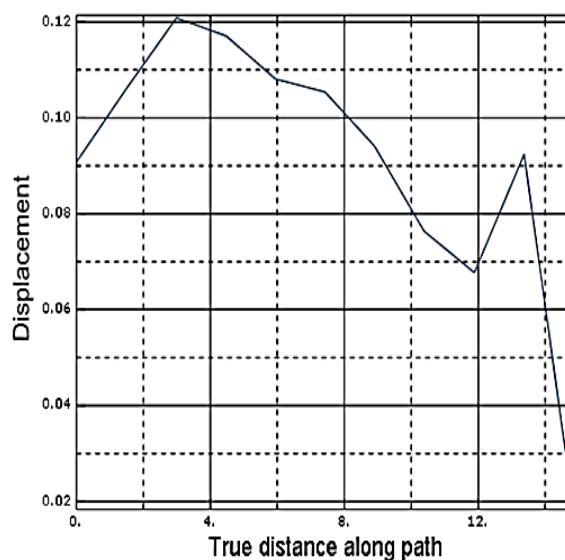
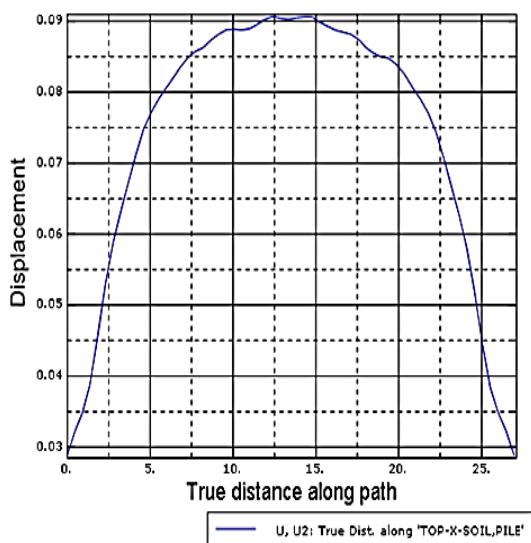
شکل ۴-۲۰. کانتور تغییر مکان افقی شمع‌های نگهبان

رفتار خاک در شکل ۴-۱۹ همانند شکل ۴-۹ است و تفاوت در میزان جابجایی خاک دیواره بلوک است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود خاک در دیواره گود به سمت داخل حرکت کرده و میزان حداکثر جابجایی افقی دیواره در پایان تحلیل نسبت به حالت اولیه ۱۳ سانتی‌متر می‌باشد. حداکثر تغییر شکل شمع‌ها نیز بعد از پایان تحلیل نسبت به حالت اولیه، در ناحیه بالایی شمع رخ داده و بحرانی‌ترین حالت در شمع میانی ضلع بزرگ‌تر گود رخ می‌دهد که تغییر مکان آن برابر ۱۳ سانتی‌متر می‌باشد.



شکل ۴-۲۱. کانتور تغییر مکان قائم گود (مدل گود با شمع)

در شکل ۴-۲۱ می‌توان تغییر مکان‌های قائم مدل در جهت قائم مثبت و منفی را مشاهده کرد. آن‌طور که مسلم است مقادیر منفی تغییر شکل‌های قائم به دلیل افت در سطح و مقادیر مثبت تغییر شکل‌های قائم در کف گود به دلیل تورم وجود دارد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود زمین اطراف گود به میزان حداکثر ۱۱/۸ سانتی‌متر نشست قائم پیدا می‌کند و در کف گود نیز خاک دچار تورم شده و به سمت بالا حرکت کرده و حداکثر جابجایی قائم در کف گود برابر ۱۱ سانتی‌متر است. نرخ کاهش نشست زمین در اطراف گود نسبت به نرخ کاهش جابجایی افقی دیوار گود مقدار بیشتری دارد. این امر به دلیل آن است که نیروی مقاوم ناشی از اصطکاک جداره گود با طول شمع رابطه مستقیم دارد. خروجی‌ها در این مدل نیز به دو دسته جهت بررسی جابجایی عمود بر صفحه گود تقسیم‌بندی شده است. دسته اول در راستای ضلع بزرگ‌تر (محور X مدل‌سازی) در عمق میانی گود برای بررسی خمیدگی (شکم دیواره گود) و دسته دوم راستای عمق (محور Z مدل‌سازی) در وسط ضلع بزرگ‌تر برای بررسی تاثیر عمق مورد بررسی قرار گرفته است.

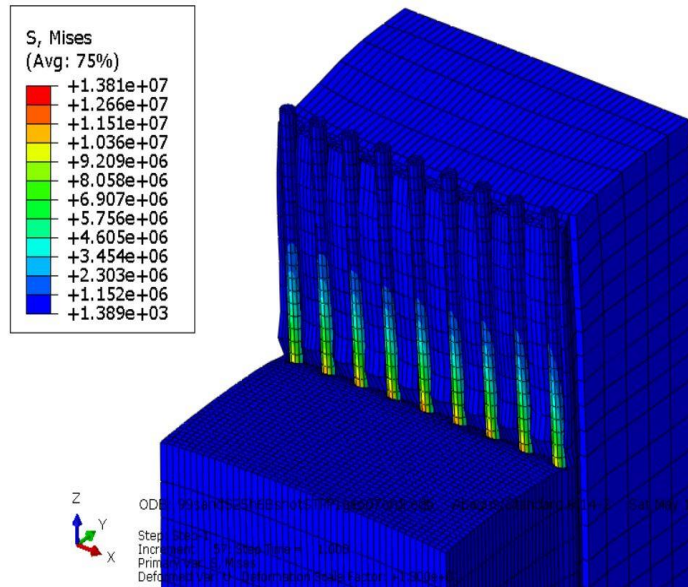


شکل ۴-۲۲. نمودار جابجایی در طول ضلع (سمت راست) و در ارتفاع گود (سمت چپ) در راستای y

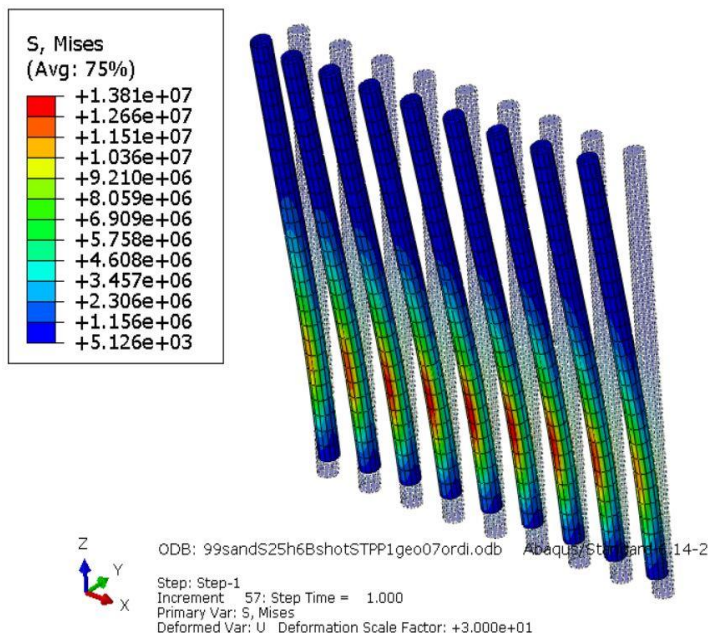
همان طور که در نمودار شکل ۴-۲۲ مشخص است، در حالت خاک برداری با سازه نگهبان شمع، بیشترین جابجایی در وسط دیواره گود رخ داده و مقدار آن برابر ۱۱ سانتی متر می باشد. اما در رابطه به شکم دادگی دیواره گود، بیشترین بیرون زدگی در عمق ۳ متری از لبه گود اتفاق افتاده است که تاثیر وجود شمع را در مقایسه با مدل بدون شمع نشان می دهد و این که می توان گفت در روش استفاده از شمع نگهبان با نزدیک شدن به تراز بالایی دیواره گود مقادیر تغییر مکان ها افزایش می یابد که این مسئله هم در میانه دهانه و هم در لبه ی دیواره ی گود صدق می کند.

۴-۳-۲. بررسی تنش و کرنش دیواره گود و شمع ها

شکل های ۴-۲۳ و ۴-۲۴ کانتورهای تنش و کرنش در دیواره گود و شمع های نگهبان در مدل گود با شمع نگهبان را نشان می دهد.

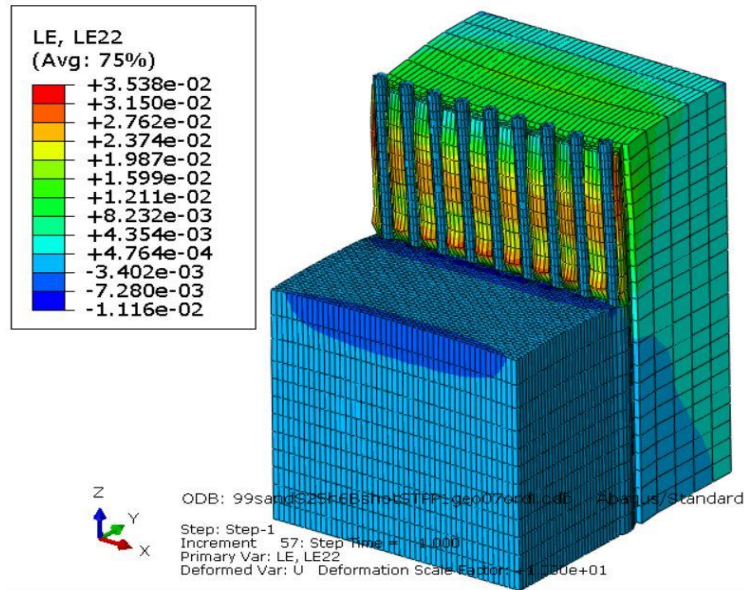


شکل ۴-۲۳. نمایش توزیع تنش فون مایسز دیواره گود در راستای محور y

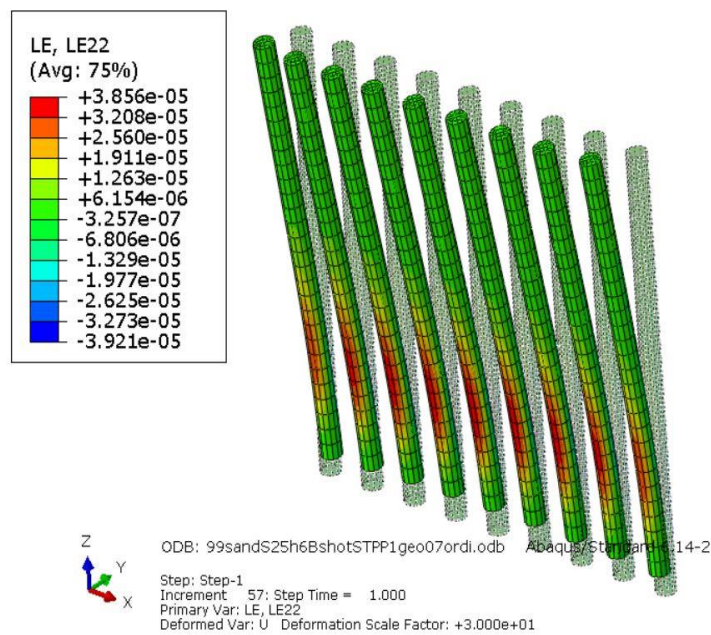


شکل ۴-۲۴. نمایش توزیع تنش فون مایسز شمعی‌های نگهبان در راستای محور y

با توجه به شکل کانتور تنش فون مایسز در دیواره گود و شمعی‌ها نشان داده شده است. تمرکز تنش در عمقی پایین‌تر از کف گود اتفاق افتاده است که در بیشترین حالت به $13/8 \text{ Mpa}$ رسیده است. با افزایش جابجایی شمعی، تمرکز تنش در عمق پایین‌تر از کف بیشتر شده و باعث گسیختگی شمعی در این نقطه می‌شود. در ادامه به بررسی کرنش اصلی در دیواره گود و شمعی پرداخته خواهد شد.



شکل ۴-۲۵. نمایش کانتور کرنش افقی دیواره گود پس از گود برداری



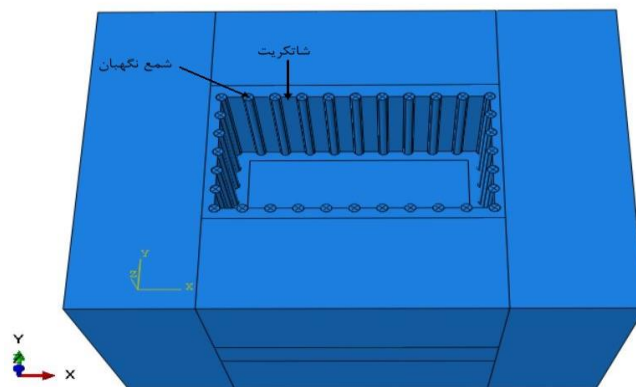
شکل ۴-۲۶. نمایش کانتور کرنش افقی شمعیهای نگهبان پس از گود برداری

در شکل‌های ۴-۲۵ و ۴-۲۶ کانتورهای کرنش افقی در راستای محور Y را در دیواره گود و شمعیهای نگهبان نشان داده شده است. وجود شمع باعث توزیع یکنواخت کرنش‌ها در طول دیواره گود شده است اما در فاصله بین دو شمع، کرنش‌ها افزایش پیدا کرده است. میزان کرنش در بحرانی‌ترین نقطه ۴ درصد است که محل تماس خاک با شمع واقع در گوشه گود است. همچنین محدوده کرنش‌ها مثبت است که

نشان می‌دهد در تمام دیواره گود، در راستای محور Y ، المان‌ها به صورت کششی درآمده‌اند. اما کرنش کف گود و در پای شمع به میزان ۳- درصد نمایش داده شده است که فشردگی خاک در پای شمع‌ها را نشان می‌دهد.

۴-۴. مدل گودبرداری با شمع و شاتکریت بین شمع‌ها

در این مدل، خاک بین شمع‌ها را با مش بندی و انجام شاتکریت به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر پایدار می‌کنیم تا اثر قوس زدگی که ماهیت اصلی آن انتقال بار به شمع‌های نگهبان می‌باشد، با انجام شاتکریت به وجود آید. مشخصات خاک در این مدل مطابق با جدول ۴-۴ و مشخصات بتن مطابق با جدول ۴-۵ و همچنین ابعاد بلوک خاک $35 \times 40 \times 50$ m که در آن یک گودبرداری به عمق ۱۵ متر ایجاد شده، مورد بررسی قرار گرفته است. این گود با استفاده از شمع‌های بتنی درجا به ارتفاع ۱۵ متر که ۶ متر آن در خاک مدفون است، پایدار شده است. فاصله شمع‌ها از یکدیگر $2/5$ متر و مقطع شمع‌ها دایره‌ای و به قطر ۱ متر در نظر گرفته شده است. شکل ۴-۲۷ هندسه این مدل را نشان می‌دهد.

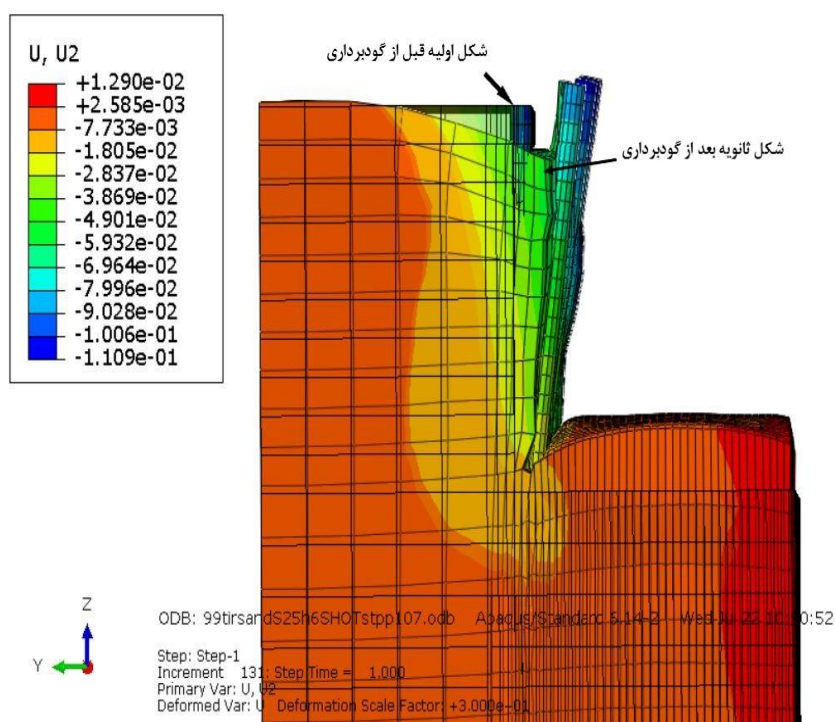


شکل ۴-۲۷. هندسه مدل گود با شمع نگهبان و شاتکریت بین شمع‌ها

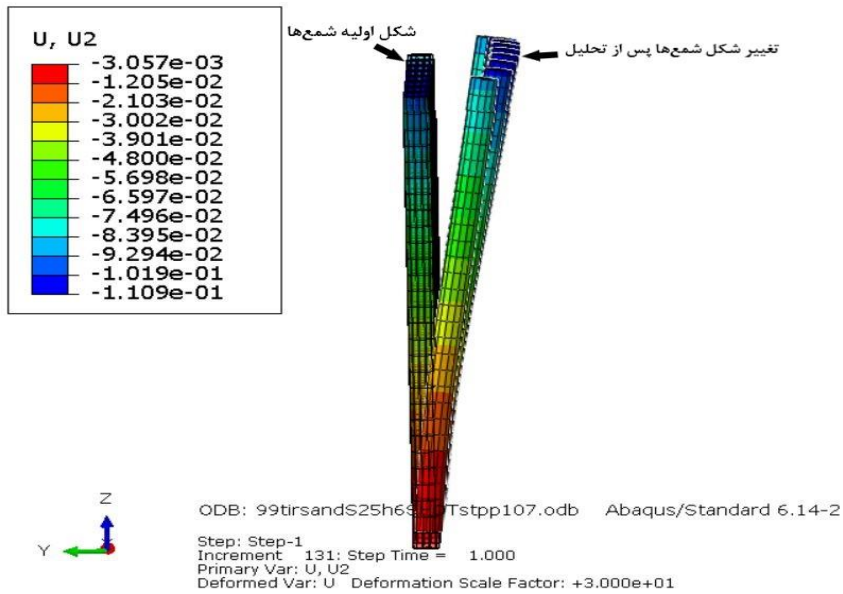
شرایط مرزی این مدل همانند بخش ۴-۱-۲-۳ و همچنین المان بندی بلوک خاک و شمع نیز همانند شکل ۴-۱۵ در بخش ۴-۳ می‌باشد.

۴-۴-۱. نمایش تغییر شکل و جابجایی

در این قسمت تغییر شکل‌های گود معرفی شده در قسمت ۴-۳ که با استفاده شم‌های نگهبان و شاتکریت بین شم‌ها پایدارسازی شده است نمایش داده شده است. تغییر شکل‌ها و جابجایی گود بعد از پایان تحلیل به صورت کانتور جابجایی در شکل ۴-۲۸ نشان داده شده است.

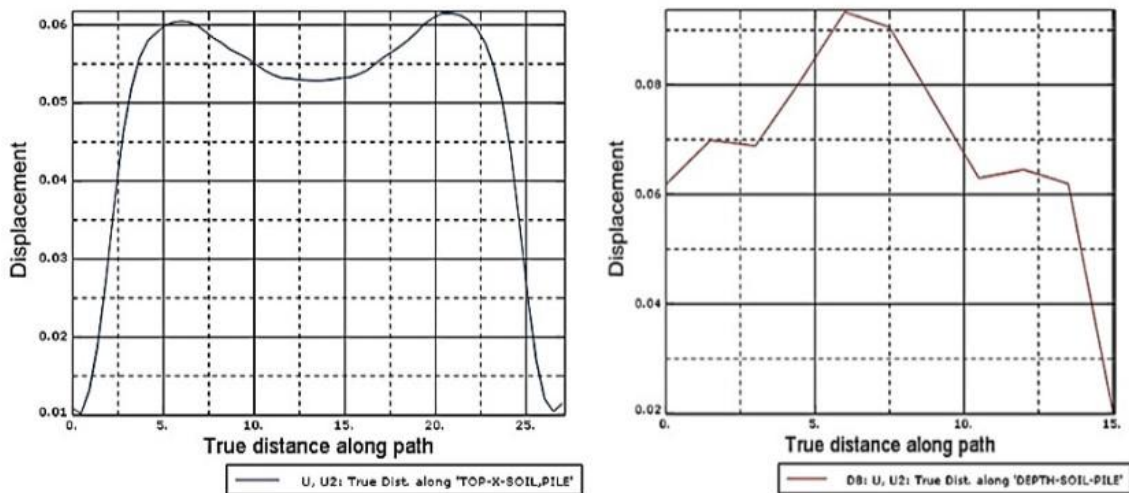


شکل ۴-۲۸. کانتور تغییر مکان افقی دیواره گود (مدل با شم و شاتکریت)



شکل ۴-۲۹. کانتور تغییر مکان افقی شمع‌های نگهبان

همان‌طور که در شکل‌های ۴-۲۸ و ۴-۲۹ نشان داده شده است، در دیواره شاتکریت شده بیشترین جابجایی به میزان ۱۱ سانتی‌متر در قسمت مرکزی و در بین دو شمع دیواره رخ داده و همچنین جابجایی در ارتفاع خاک پخش شده و متمرکز نمی‌باشد. در شمع‌های نگهبان نیز جابجایی در سر شمع بیشترین مقدار است که این جابه‌جایی در شمع میانی، به‌عنوان شمع بحرانی، برابر ۱۱/۸ سانتی‌متر است و با حرکت به سمت گوشه‌های گود این جابه‌جایی کاهش می‌یابد.

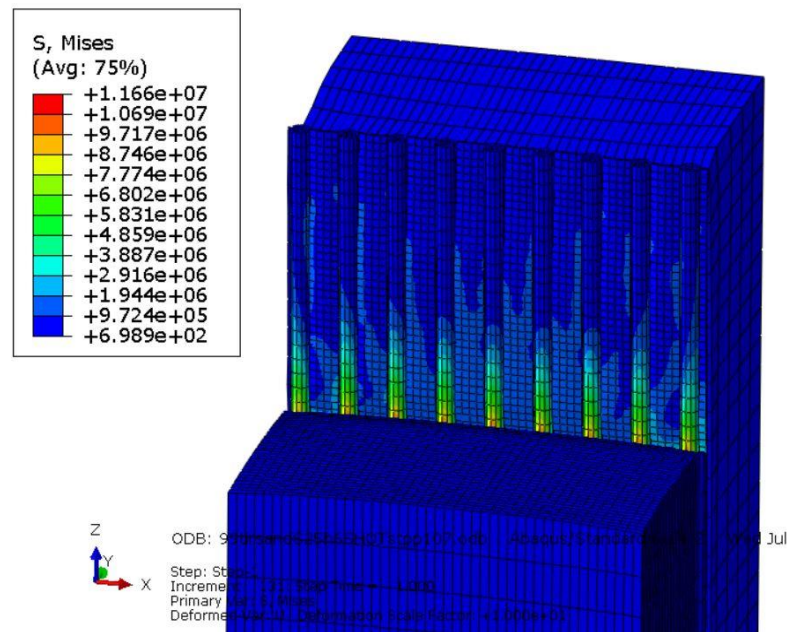


شکل ۴-۳۰. جابجایی در مسیر عمق (سمت چپ) و طول ضلع دیواره (سمت راست) در راستای Y

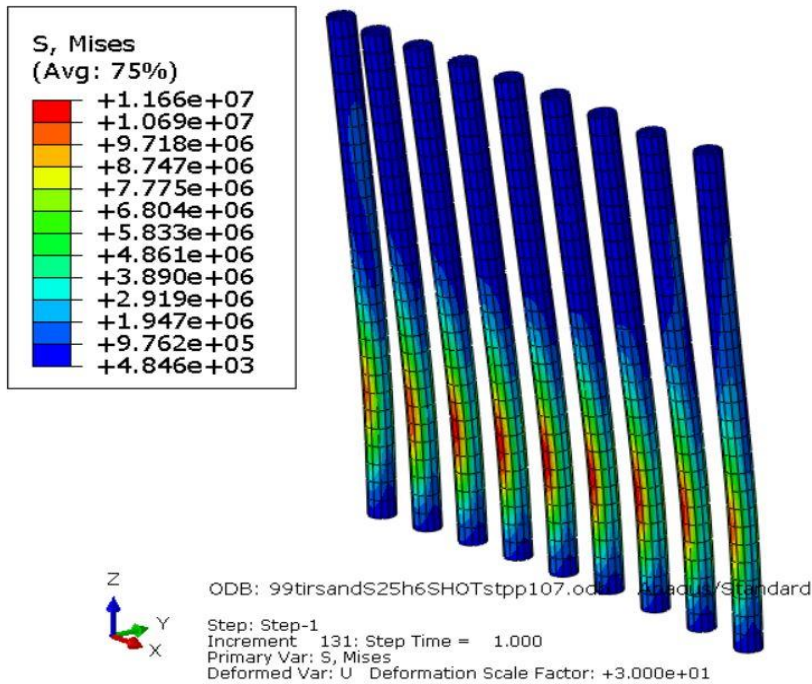
همان طور که در نمودارهای فوق مشخص است تا عمق ۶ متر روند جابجایی افزایشی است، اما پس از آن با افزایش عمق، جابجایی دیواره کاهش می یابد؛ اما در رابطه با جابجایی در مسیر ضلع گود، نتایج با مدل های قبلی متفاوت است به این صورت که بیشترین در فاصله ۵ متر و ۲۰ متر از لبه گود می باشد. این تغییر ممکن است به دلیل تفاوت در ابعاد گود در این مدل باشد.

۴-۴-۲. تنش و کرنش دیواره گود و شمع

شکل ۴-۳۱ کانتورهای توزیع تنش افقی دیواره گود در مدل گود با شمع و با وجود شاتکریت در خاک بین شمع ها را نشان می دهد.

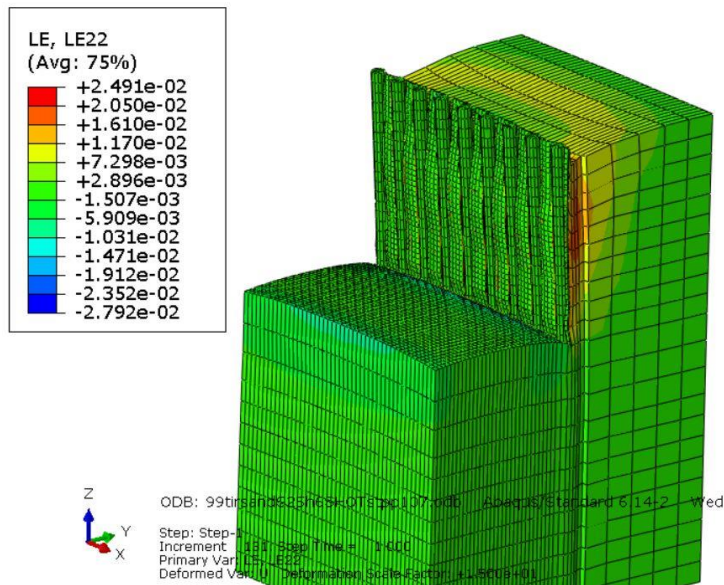


شکل ۴-۳۱. نمایش توزیع تنش فون مایسز دیواره گود

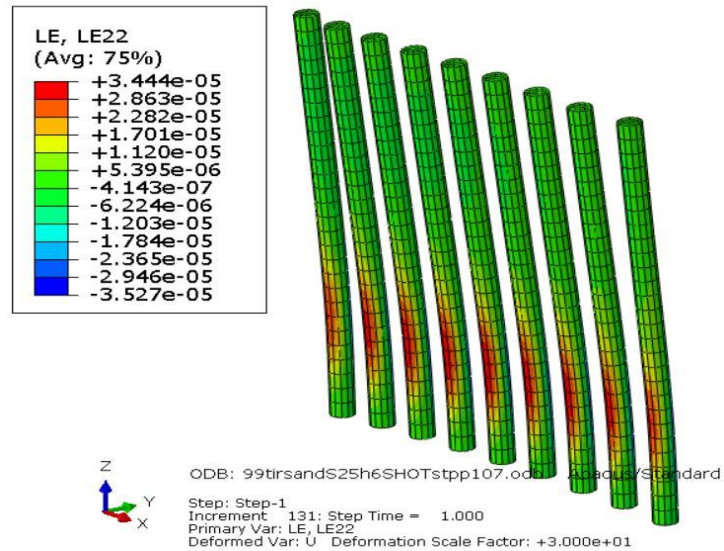


شکل ۴-۳۲. نمایش توزیع تنش فون مایسز در شمع‌ها (مدل با شمع و شاتکریت)

توزیع تنش مایسز نشان داده شده در شکل ۴-۳۲ در شمع‌ها کاملاً مشهود است. در این مدل هم مانند مدل قبلی بدون شاتکریت تمرکز تنش در عمقی پایین‌تر از کف گود اتفاق افتاده است که در بیشترین حالت به $11/6 \text{ Mpa}$ رسیده است. با افزایش جابجایی شمع، تمرکز تنش در عمق پایین‌تر از کف بیشتر شده و باعث گسیختگی شمع در این نقطه می‌شود. وجود شاتکریت باعث یکپارچگی در رفتار شمع شده بنابراین محل تمرکز تنش تقریباً در تمام شمع‌ها یکسان است. توزیع تنش یکنواخت در سطح دیواره باعث ایجاد کرنش یکنواخت در آن جهت می‌شود. در ادامه توزیع کرنش را در شکل‌های ۴-۳۳ و ۴-۳۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۳۳. کانتور کرنش دیواره گود در راستای محور Y



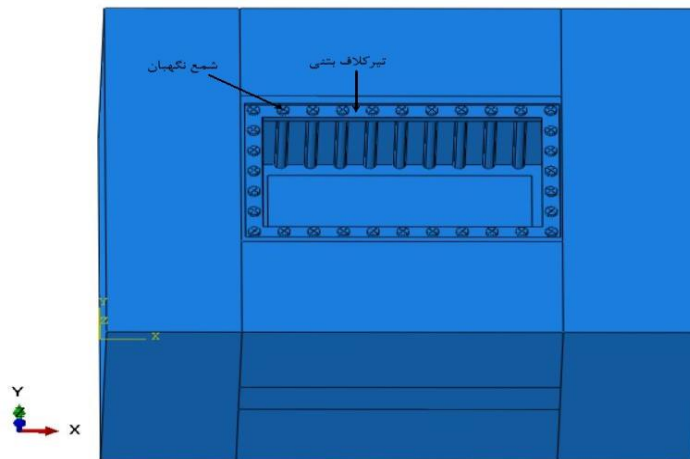
شکل ۴-۳۴. کانتور کرنش شمع‌های نگهبان در راستای محور Y

وجود شاتکریت باعث یکپارچه شدن رفتار دیواره گود شده است. به همین دلیل توزیع تنش در سطح دیواره به صورت یکنواخت است که باعث ایجاد کرنش یکنواخت در آن جهت می‌شود. این کرنش در شمع و در پایین‌تر از عمق گود اتفاق افتاده است که میزان آن $10^{-5} \times 3/5$ است. با توجه به اینکه شاتکریت از سطح تا کف گود انجام شده است، بیشترین نیرو به شمع‌ها در کف گود وارد شده است. در بالای گود به صورت یکپارچه عمل کرده و شمع در عمقی بیشتر از کف گود دچار تمرکز تنش شده است.

این نقاط مستعد گسیختگی شمع هستند. در این مدل وجود شاتکریت باعث شده است توزیع کرنش خاک بین دو شمع نیز کاملاً یکسان باشد.

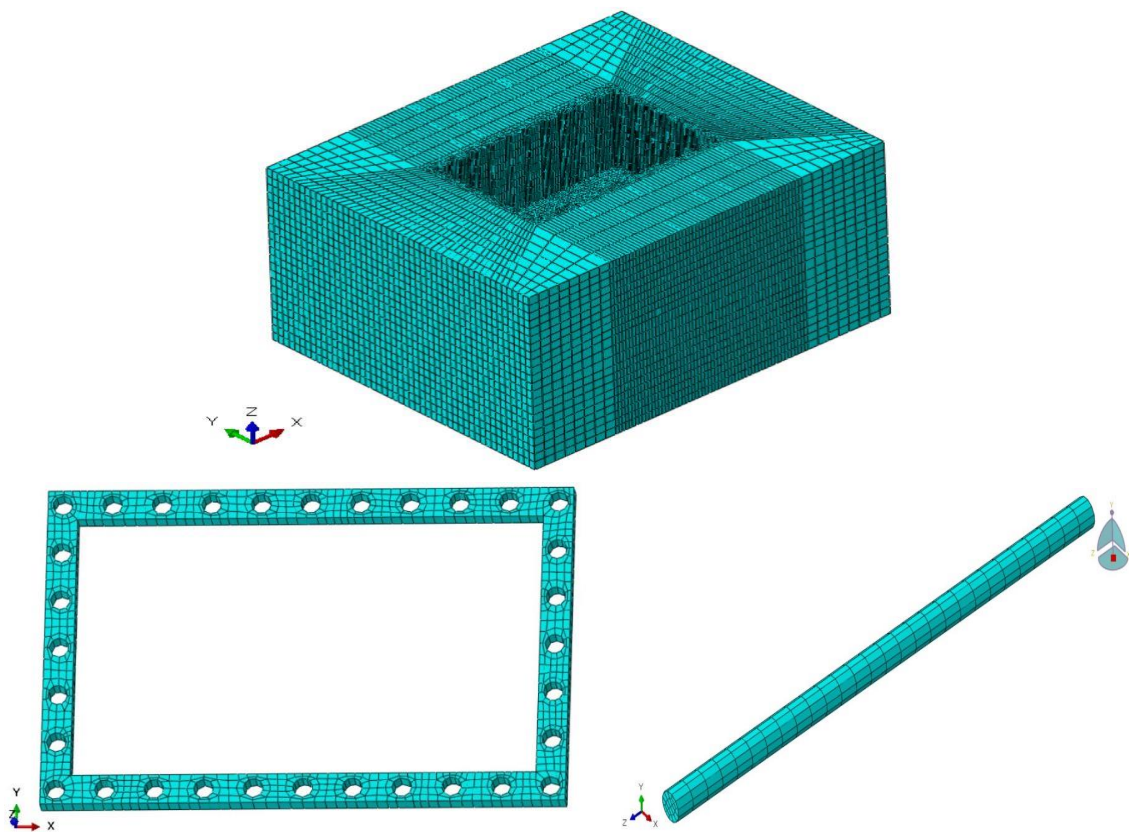
۴-۵. مدل گودبرداری با شمع نگهدارنده و تیر رابط در بالای شمع

در این مدل شمع و تیر بتنی کلاف در بالای شمع به عنوان سازه نگهدارنده برای بلوک خاک برداری لحاظ شده است. برای کنترل تغییر مکان سرشمع‌ها، تمامی آنها با سر شمعی از جنس خود شمع با یکدیگر کلاف شده‌اند. ابعاد تیر بتنی 150×100 cm می‌باشد. مشخصات بلوک خاک و شمع‌ها مطابق آنچه در بخش ۴-۳ ذکر شده است در نظر گرفته شده است. همچنین ابعاد بلوک خاک $50 \times 40 \times 35$ m که در آن یک گودبرداری به عمق ۱۵ متر که با استفاده از شمع‌های بتنی درجا به ارتفاع ۱۵ متر که ۶ متر آن در خاک مدفون است، پایدار شده است. فاصله شمع‌ها از یکدیگر $2/5$ متر و مقطع شمع‌ها دایره‌ای و به قطر ۱ متر در نظر گرفته شده است. شکل ۴-۳ هندسه این مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۳. هندسه مدل گود با اجرای تیر رابط در بالای شمع‌ها

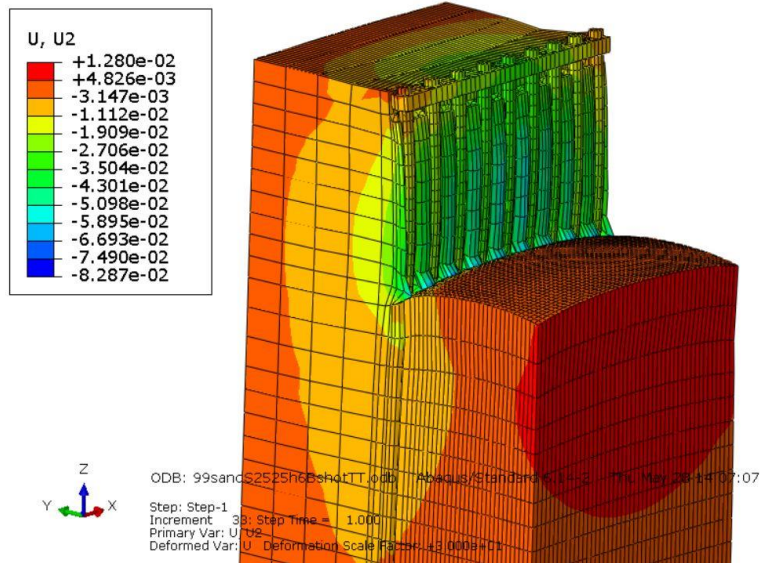
شرایط مرزی این مدل همانند بخش ۴-۱-۲-۳ و المان بندی بلوک خاک و شمع و تیر کلاف در شکل ۴-۳۶ نشان داده شده است.



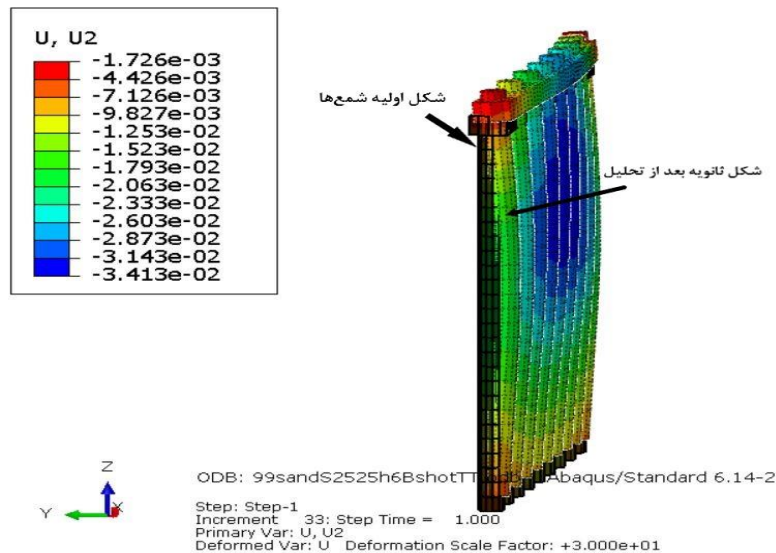
شکل ۴-۳۶. المان بندی بلوک خاک و شمع و تیر کلاف

۴-۵-۱. نمایش تغییر شکل و جابجایی

تغییر شکل‌ها و جابجایی گود با شمع و سرشمع بعد از پایان تحلیل به صورت کانتور تغییر مکان افقی و قائم در شکل ۴-۳۷ نشان داده شده است.

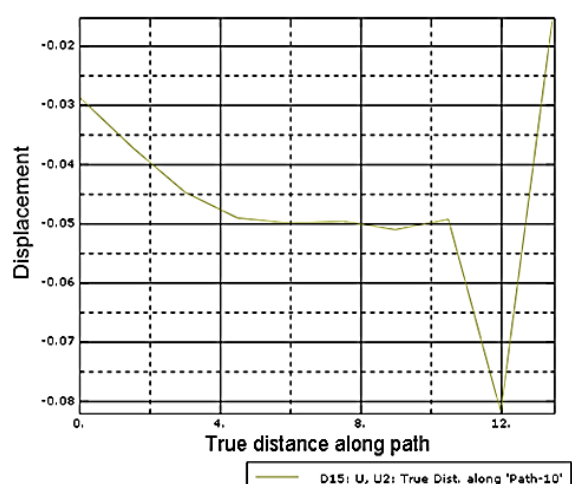
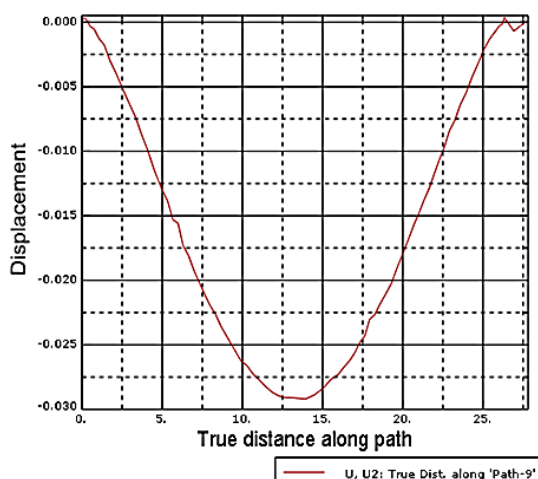


شکل ۴-۳۷. کانتور تغییر مکان افقی دیواره گود (مدل با سرشمع)



شکل ۴-۳۸. کانتور تغییر مکان افقی شمع‌های نگهبان

جابه‌جایی اندازه‌گیری شده در شکل‌های ۴-۳۷ و ۴-۳۸ در حالت وجود شمع و سر شمع است. بیشترین جابه‌جایی به میزان تقریباً ۹ سانتی‌متر و در نزدیکی کف گود اتفاق افتاده است؛ اما پراکندگی آن بسیار کم بوده و سریعاً در دیواره مستهلک شده است. وجود سرشمع از جابجایی‌های زیاد شمع‌ها جلوگیری کرده است. در شمع میانی بیشترین جابه‌جایی به اندازه ۵ سانتی‌متر محاسبه شده است. همچنین کف گود به میزان ۱۰/۵ سانتی‌متر دچار تورم شده است و این تورم در سطح خاک گسترده است.



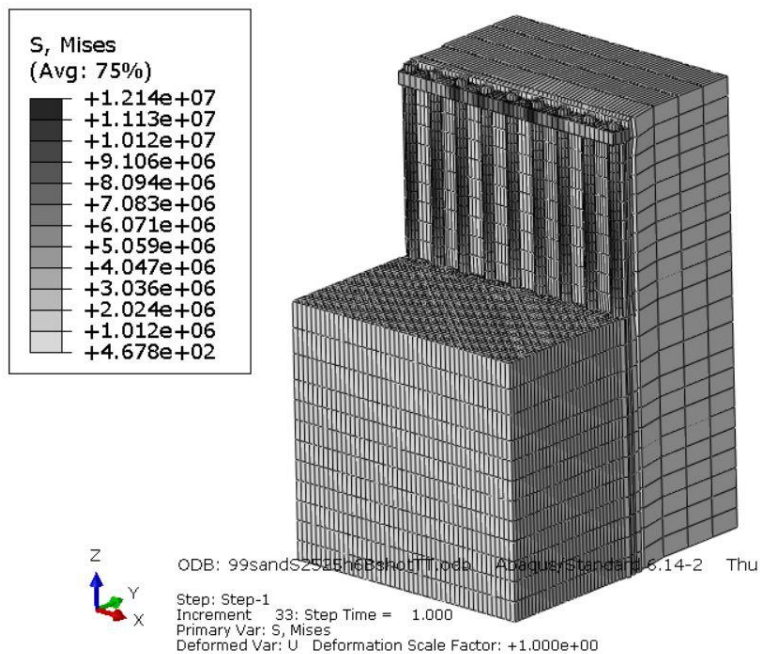
شکل ۴-۳۹. نمایش جابجایی در مسیر عمق گود (سمت راست) و لبه بالایی ضلع بزرگ تر گود (سمت چپ)

در راستای محور Y

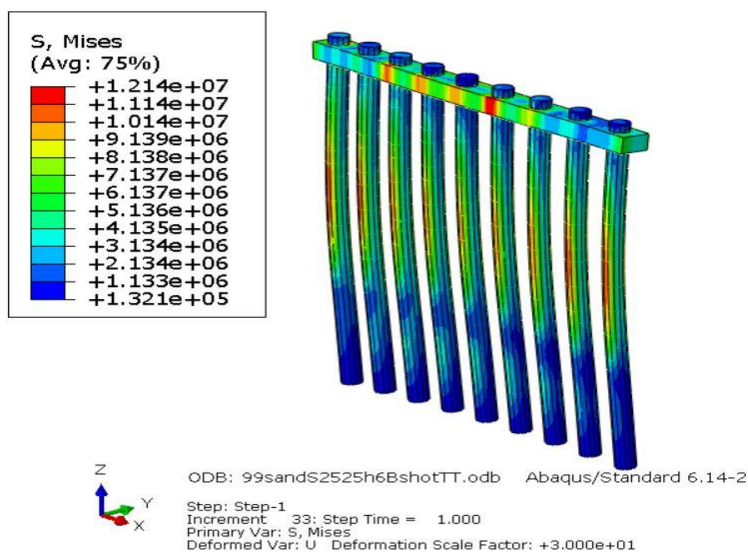
همان طور که در شکل ۴-۳۹ پیداست، جابجایی در نوک شمع‌ها بیشترین مقدار را دارد که برابر است با $\frac{3}{5}$ سانتی‌متر با فاصله گرفتن از گوشه گودها، جابه‌جایی سر شمع‌ها افزایش پیدا می‌کند تا در میانه ضلع گود به بیشترین مقدار خود برسد. در طول شمع اما بیشترین جابجایی در وسط طول شمع اتفاق افتاده است؛ اما در بلوک خاک جابجایی خاک در پایین عمق بلوک به میزان $\frac{8}{5}$ سانتی‌متر اتفاق افتاده است. نتیجه‌گیری‌های پیشین در رابطه با محل تغییر شکل بحرانی، چه در عمق و چه در طول ضلع همچنان صادق است.

۴-۵-۲. توزیع تنش و کرنش

شکل ۴-۴۰ کانتورهای تنش افقی دیواره گود در مدل گود با شمع و با وجود تیر کلاف در بالای شمع‌ها را نشان می‌دهد.



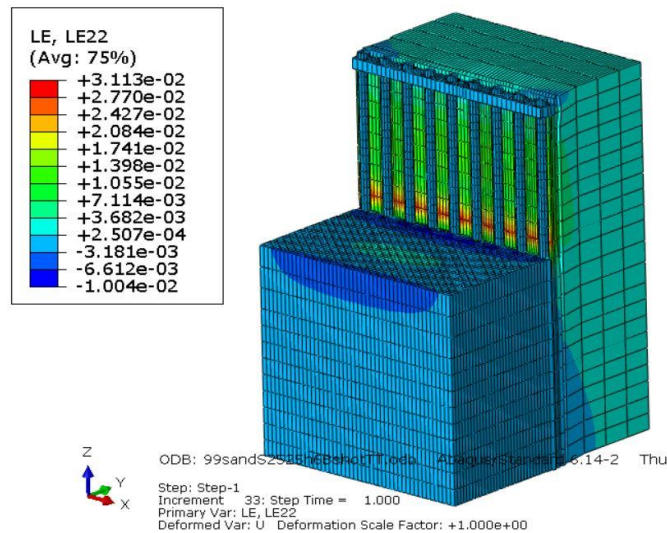
شکل ۴-۴۰. نمایش کانتور تنش افقی دیواره در راستای محور y



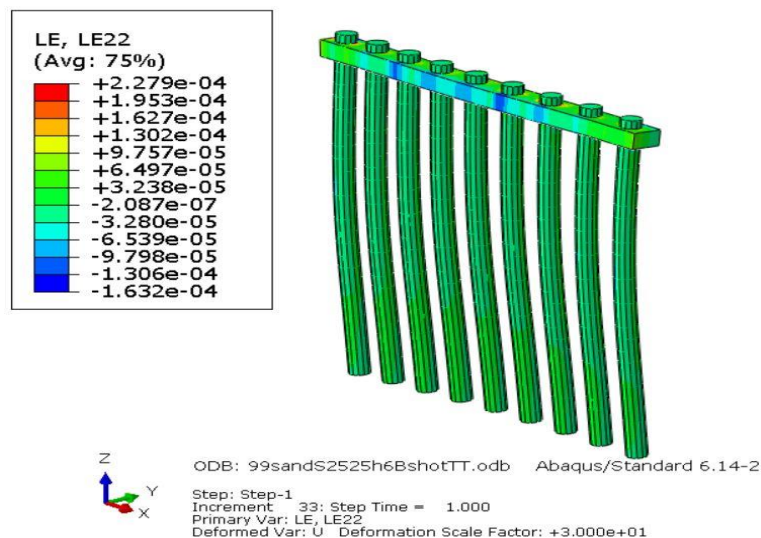
شکل ۴-۴۱. نمایش کانتور تنش افقی دیواره گود در راستای محور y

همان‌طور که در شکل ۴-۴۱ مشخص است توزیع تنش در سطح شمع‌ها بسیار یکنواخت‌تر از حالت قبل است. در این حالت برخلاف مدل‌های قبل تنش‌ها در شمع‌های طرفین بیشتر بوده و شمع‌های بحرانی، شمع‌های در فاصله ۴ تا ۶ متری از گوشه گود است. همچنین نقطه تمرکز تنش در شمع‌ها، نسبت به مدل‌های قبل، از تراز کف گود به میانه دیواره جابه‌جاشده است. تنش در این حالت در نقطه

بحرانی به $12/1 \text{ Mpa}$ رسیده است. نکته دیگر در رابطه با مقاومت سرشمع است. با توجه به اینکه جنس سر شمع از جنس شمع است، در نقاط اتصال شمع و سر شمع، به واسطه کم بودن عرض سر شمع، تمرکز تنش اتفاق می افتد و مستعد گسیختگی است. در شمع میانی، در قسمت سر شمع، میزان تنش بحرانی با تنش بحرانی شمع برابر است.



شکل ۴-۴۲. کانتور کرنش دیواره گود در راستای محور Y (مدل با سرشمع)



شکل ۴-۴۳. کانتور کرنش شمع‌های نگهبان در راستای محور Y (مدل با سرشمع)

در شکل‌های ۴-۴۲ و ۴-۴۳ میزان توزیع کرنش نمایش داده شده است که مشاهده می شود در نقاط پایینی دیواره گود در خاک برابر با $3/11$ درصد بوده و بسیار متمرکزتر از حالات قبل است. کرنش

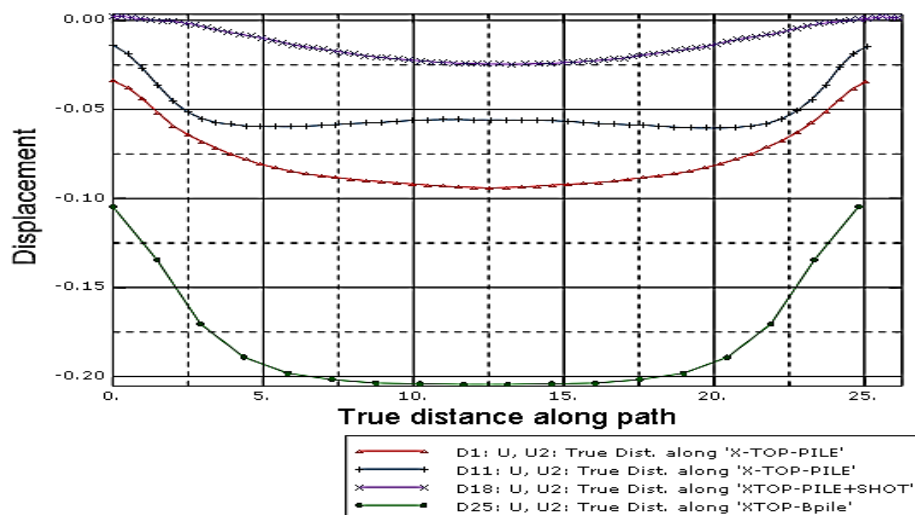
به صورت کششی بوده که نشان دهنده تورم دیواره گود بیرون زدگی دیواره است. در کف گود نیز المان‌ها نزدیک شمع به صورت فشاری عمل کرده است. در سر شمع نشان داده شده نیز کرنش در شمع میانی به 0.0163 - درصد رسیده که بیشترین میزان کرنش فشاری در سر شمع است.

۴-۶. مقایسه نتایج مدل‌ها

پس از آنکه مدل‌سازی و ارائه نتایج گودبرداری‌های بدون شمع نگهبان، مسلح شده با شمع نگهبان، مسلح شده با شمع نگهبان با شاتکریت بین شمع‌ها و همچنین گودبرداری مسلح شده با شمع نگهبان و ایجاد تیر رابط در بالای شمع به پایان رسید حال در ادامه به مقایسه نتایج این چهار مدل پرداخته می‌شود.

۴-۶-۱. بررسی مدل‌های بیان شده در جابجایی دیواره گود در مسیر طول ضلع گود

با توجه به نمودار شکل ۴-۴۴، علامت $D25$ بیانگر حالت گود بدون شمع، $D1$ بیانگر حالت گود با شمع نگهبان، $D11$ بیانگر حالت با شمع نگهبان و شاتکریت، و $D18$ بیانگر حالت شمع و سر شمع است.

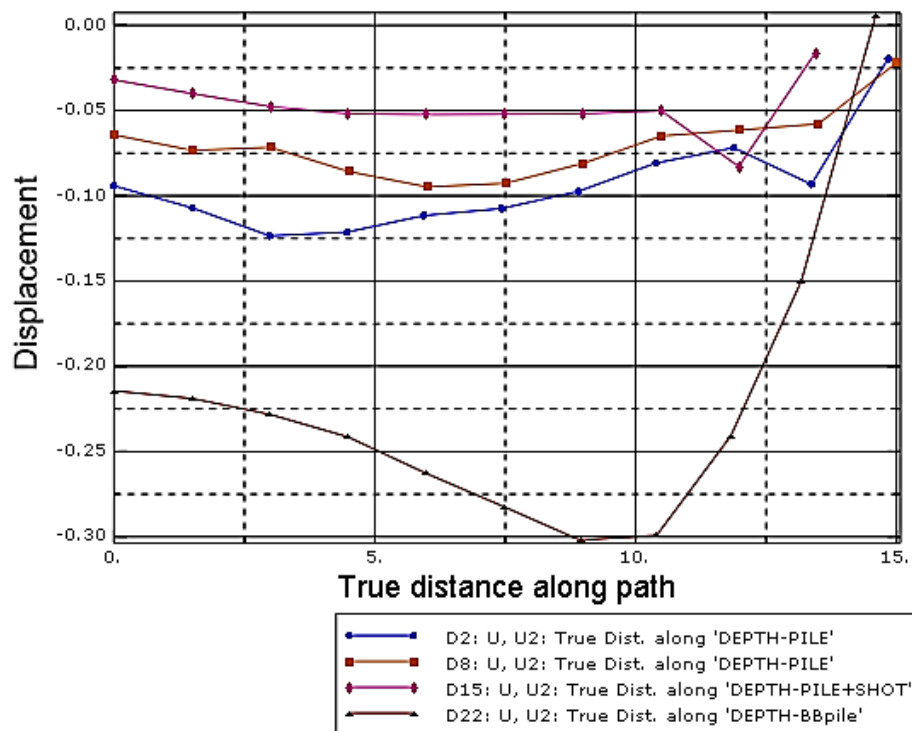


شکل ۴-۴۴. جابجایی در راستای عمود بر ضلع گود در مسیر طول ضلع دیواره برای مدل‌های بیان شده

همان طور که در نمودار ۴-۴۴ مشاهده می‌شود وجود سازه نگهبان در کنترل تنش‌ها کاملاً مشهود است به طوری که وجود شمع باعث شده حداکثر جابجایی‌ها، از ۲۲ سانتی‌متر به ۱۰ سانتی‌متر کاهش پیدا کند. همچنین در شرایطی که شمع و شاتکریت اجرا شده است، رفتار دیواره گود و جابجایی دیواره کاملاً یکنواخت مانده است. نکته دیگر در این نمودار کاهش نسبی جابجایی در هنگام اجرای شمع و سر شمع نسبت به حالت اجرای شمع و شاتکریت است. در این مدل‌ها نیز جابجایی بحرانی در میانه ضلع گود اتفاق افتاده است.

۴-۶-۲. بررسی جابجایی دیواره گود در مسیر عمق گود

با توجه به نمودار شکل ۴-۴۵، علامت D۲۲ بیانگر حالت گود بدون شمع، D۲ بیانگر حالت گود با شمع نگهبان، D۸ بیانگر حالت با شمع نگهبان و شاتکریت، و D۱۵ بیانگر حالت شمع و سر شمع است.

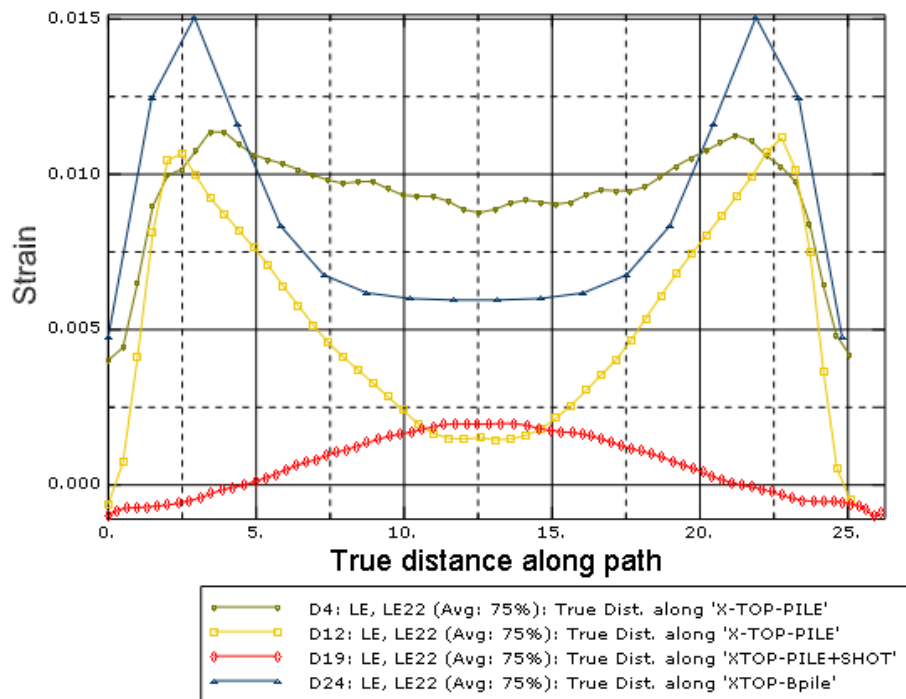


شکل ۴-۴۵. جابجایی در راستای عمود بر ضلع گود در مسیر عمق دیواره برای مدل‌های بیان شده

با توجه به نمودار ۴-۴۵ تأثیر سازه نگهبان در کنترل تنش‌ها کاملاً مشهود است. به‌طوری‌که پس از ایجاد سازه نگهبان، تا ۱۰ درصد از میزان کرنش‌ها کاسته شده است. طبق نمودار در حالتی که دیواره گود هیچ‌گونه محافظی ندارد، عمق بحرانی ۹ تا ۱۱ متر است؛ اما در صورت وجود سازه نگهبان عمق بحرانی بین ۱۱ تا ۱۳ متر در نوسان است.

۴-۶-۳. بررسی کرنش در طول ضلع دیواره گود

با توجه به نمودار شکل ۴-۴۶، علامت D۲۴ بیانگر حالت گود بدون شمع، D۱۲ بیانگر حالت گود با شمع نگهبان، D۸ بیانگر حالت با شمع نگهبان و شاتکریت، و D۱۹ بیانگر حالت شمع و سر شمع است.



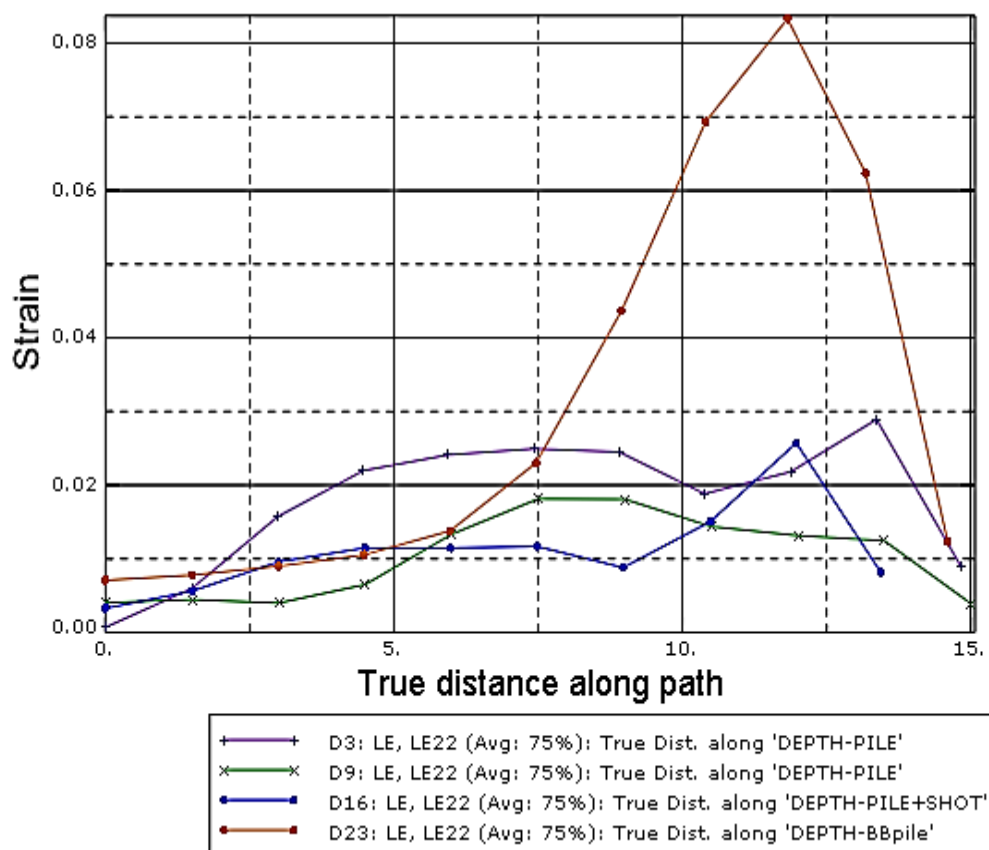
شکل ۴-۴۶. کرنش در راستای عمود بر ضلع گود در مسیر طول ضلع دیواره

نمودار ۴-۴۶ در مسیر عمق گود گرفته شده است. طبق نمودار در تمام حالات به جز حالت شمع و سر شمع، کرنش بحرانی در فاصله ۲ تا ۳ متری از گوشه‌های دیواره گود اتفاق افتاده است و پس از آن کاهش پیدا کرده و تا فاصله ۱۲ متری (میانه ضلع دیواره) به کمترین مقدار رسیده است. این روند کاهش در

مدل دیواره با شمع و شاتکریت دارای بیشترین شیب و در مدل گود با شمع تکی دارای کمترین شیب است؛ اما در حالت گود با شمع و سرشمع روند برعکس دیگر مدل‌هاست به صورتی که تنها نقطه میانی ضلع در فاصله ۱۲ متری از گوشه‌ها دارای بیشترین میزان کرنش است و قبل از آن روند افزایشی کرنش و پس از نقطه میانی کرنش‌ها به صورت کاهشی است.

۴-۶-۴. بررسی کرنش‌ها در مسیر عمق دیواره گود

با توجه به نمودار شکل ۴-۴۷، علامت D۲۳ بیانگر حالت گود بدون شمع، D۳ بیانگر حالت گود با شمع نگهبان، D۹ بیانگر حالت با شمع نگهبان و شاتکریت و D۱۶ بیانگر حالت شمع و سرشمع است.



شکل ۴-۴۷. کرنش در راستای عمود بر ضلع گود در مسیر عمق دیواره

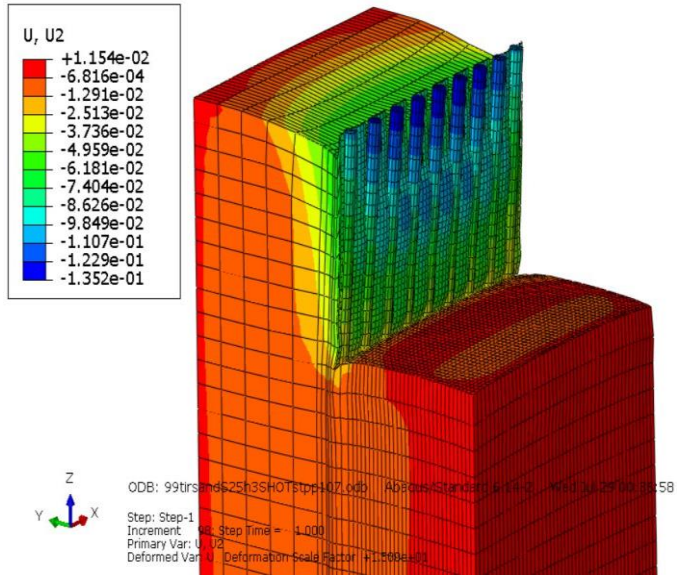
نمودار ۴-۴۷ در مسیر عمق گود گرفته شده است. بیشترین کرنش‌ها مربوط به گودبرداری بدون هیچ

سازه نگهبان است. در این حالت در عمق ۱۱ متری خاک بیشترین کرنش‌ها را دارا می‌باشد. همچنین روند صعودی کرنش‌ها از عمق ۷ متری با شیب تند افزایشی شده و پس از عمق ۱۲ متری با همان شیب قبلی کاهش یافته است؛ اما در مدل‌های دیگر بهینه‌ترین حالت برای پراکندگی (عدم تمرکز) و مقدار کرنش به مدل شمع با شاتکریت مربوط می‌شود. در این حالت بیشترین کرنش در عمق ۸ متری اتفاق می‌افتد و پس از آن کرنش‌ها کاهش یافته است. در این بین دو مدل شمع تکی و شمع با سر شمع، رفتاری مشابه با مدل بدون شمع داشته ولی مقدار کرنش‌ها بسیار کمتر از حالت بدون شمع است.

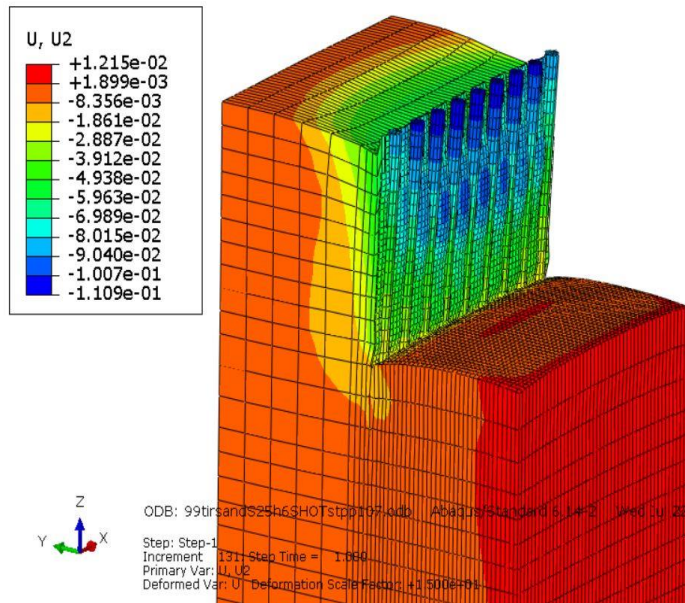
۷-۴. تاثیر مشخصات شمع نگهبان

۱-۷-۴. تاثیر عمق مدفون شمع

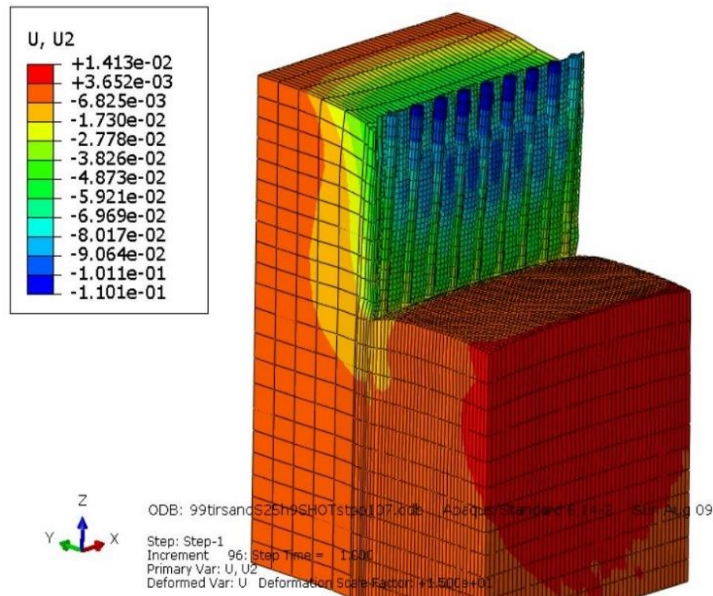
برای بررسی تاثیر تغییرات پارامتر طول گیرداری شمع، از مدل گود مسلح شده با شمع نگهبان و شاتکریت استفاده شده است. فاصله شمع‌ها از یکدیگر $2/5$ متر و مقطع شمع‌ها دایره‌ای و به قطر ۱ متر در نظر گرفته شده است. فاصله محوری $2,5$ متر از یکدیگر و طول‌های مختلف به ترتیب ۱۸، ۲۱، ۲۴ متر استفاده می‌شود. با توجه به عمق ثابت گودبرداری در این مدل‌ها طول گیرداری به ترتیب ۳، ۶، ۹ متر می‌باشند. خاک از نوع ماسه‌ای و با مشخصات قیدشده در جدول ۴-۱ است. شکل ۴-۴۴ کانتورهای جابجایی افقی U1 را برای این سه مدل نشان می‌دهد. مسیر خروجی گرفته‌شده در راستای لبه ضلع گود بوده و جابجایی در جهت عمود بر ضلع گود مشخص شده است.



الف



ب



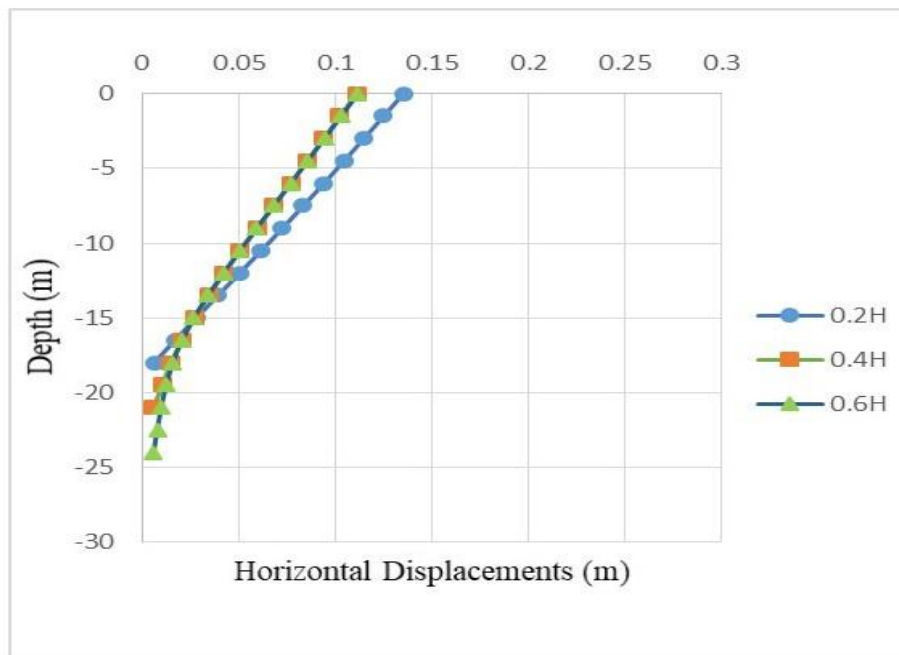
ج

شکل ۴-۴۸. کانتورهای جابجایی افقی دیواره گود و شمع‌ها در سه حالت عمق مدفون

الف- $0/2H$ و ب- $0/4H$ و ج- $0/6H$

همان‌طور که در شکل ۴-۴۷ نمایش داده شده است نواحی آبی‌رنگ جابجایی بیشتر و با نزدیک شدن به نواحی نارنجی‌رنگ مقدار جابجایی به سمت گود کمتر می‌شود. مشاهده می‌شود که با افزایش عمق نفوذ، جابجایی کاهش می‌یابد. ولی نرخ این کاهش جابجایی برای مقادیر عمق نفوذ بیشتر از ۴۰ درصد عمق گود، تقریباً ثابت است همچنین در شکل می‌توان مشاهده کرد که جابه‌جایی در نوک شمع‌ها در شمع‌های میانی بیشتر از سایر شمع‌های دیواره است که این عدد در بیشترین جابجایی نوک شمع‌های میانی، برای شمع‌ها با عمق دفن $0/2H$ ، $0/4H$ و $0/6H$ به ترتیب $13/5$ ، $11/1$ و 11 سانتی‌متر است؛ بنابراین در مدل الف با دو برابر شدن عمق مدفون شمع، جابجایی نوک شمع کاهش چشمگیری داشته است اما با تغییر سه برابری عمق مدفون، تغییر جابجایی نوک شمع بسیار کمتر بوده است.

در شکل ۴-۴۹ مقدار جابجایی شمع میانه ضلع بزرگ‌تر گود در سه حالت مختلف طول گیرداری شمع مقایسه شده است.



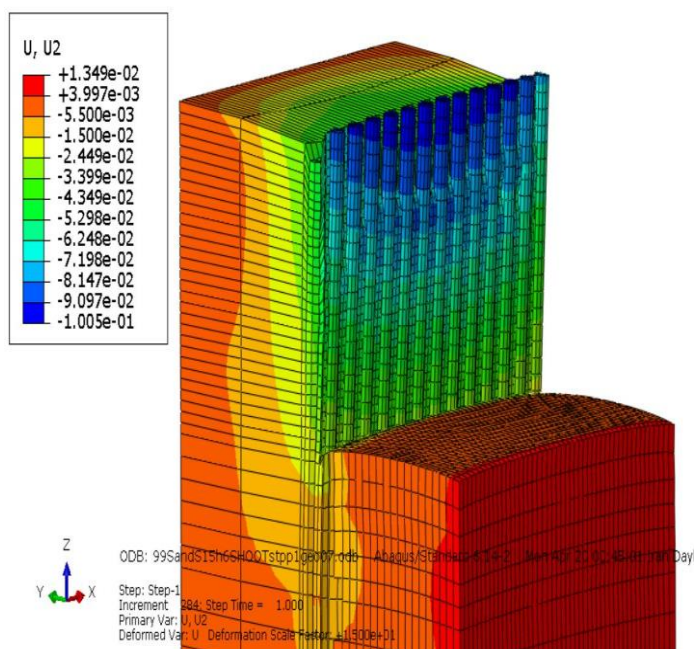
شکل ۴-۴۹. تغییر شکل افقی شمع با تغییر عمق مدفون شمع

در نمودار شکل ۴-۴۹ مشاهده می‌شود در حالتی که عمق مدفون شمع برابر با $0/2$ ارتفاع شمع است، جابجایی شمع به صورت خطی افزایش پیدا کرده است اما با افزایش عمق مدفون از $0/2$ به $0/4$ ارتفاع شمع، جابجایی شمع در عمق ۲۲ متر از حالت خطی خارج شده است. همچنین جابه‌جایی سر شمع نیز از $13/5$ میلی‌متر به 11 میلی‌متر کاهش پیدا کرده است. با افزایش عمق مدفون به $0/6$ ارتفاع شمع، رفتار انتهای گیردار شمع تغییر کرده اما با 2 متر فاصله گرفتن از انتهای شمع، مجدداً میزان جابه‌جایی و شیب تغییرات جابه‌جایی مطابق با شمع با عمق مدفون $0/4$ ارتفاع است. در حالت کلی می‌توان گفت عمق مدفون شمع تابع عمق گود است و همان‌طور که در شکل بالا میزان تغییر شکل افقی شمع‌های نگهدارنده را نشان می‌دهد میزان این تغییر شکل در حالتی که عمق مدفون شمع $0/2 H$ می‌باشد به نسبت حالتی که عمق مدفون $0/4 H$ است به میزان 19 درصد افزایش می‌یابد و کاهش گیرداری شمع در خاک باعث افزایش تغییر شکل افقی شمع می‌شود.

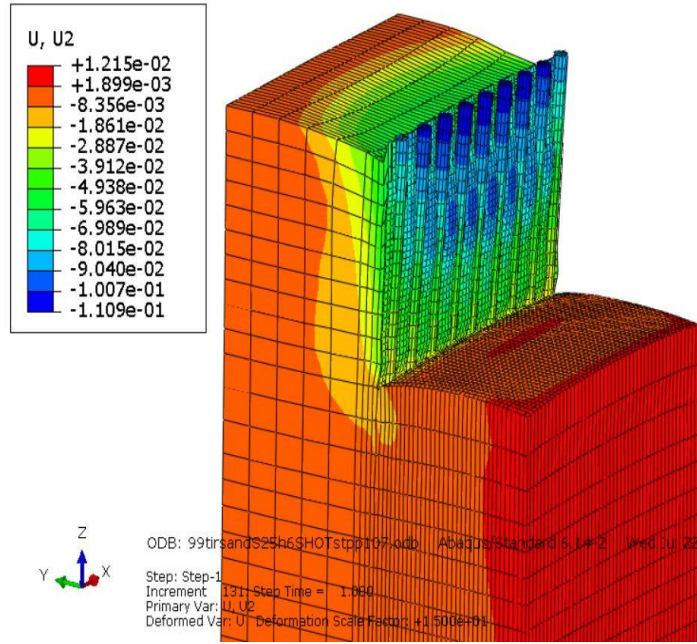
۴-۷-۲. بررسی تاثیر فاصله محوری بین شمع‌ها

برای بررسی تأثیر تغییرات پارامتر فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها از یکدیگر نیز، از مدل گود مسلح شده با شمع نگهبان و شاتکریت استفاده شده است. فاصله شمع‌ها از یکدیگر ۲/۵ متر و مقطع شمع‌ها دایره‌ای و به قطر ۱ متر در نظر گرفته شده است. ارتفاع گود ۱۵ متر با طول گیرداری ۶ متر و فاصله محوری مختلف به ترتیب ۱/۵، ۲/۵ و ۴ متر از یکدیگر که بیانگر فواصل محوری $1/5d$ ، $2/5d$ ، $4d$ می‌باشد (d قطر شمع) استفاده می‌شود.

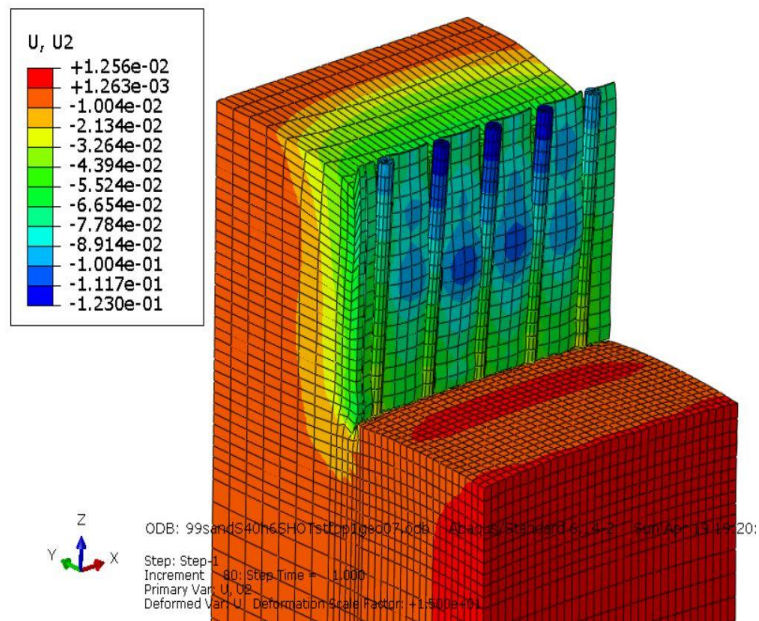
شکل ۴-۵۰ کانتورهای جابجایی افقی U_1 را برای این سه مدل نشان می‌دهد.



الف



ب



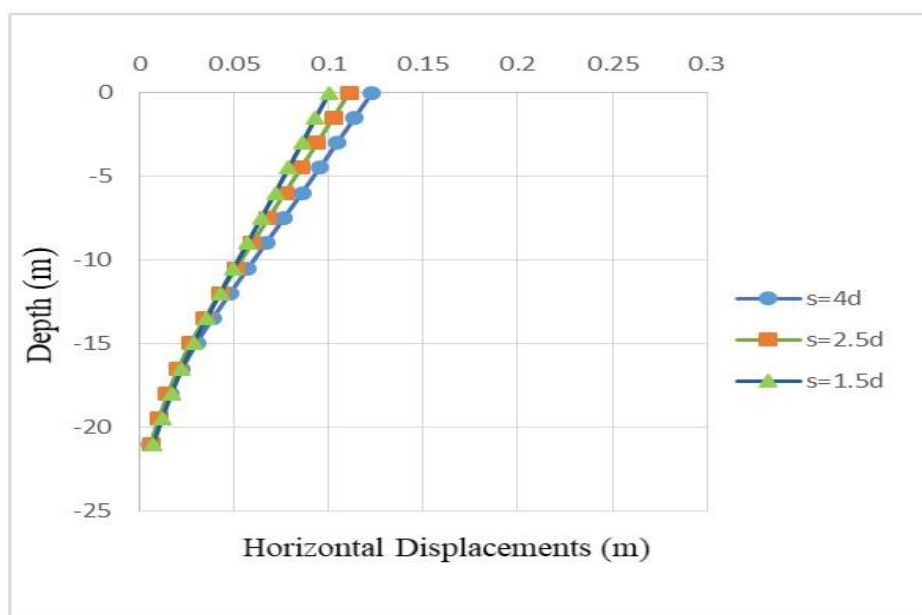
ج

شکل ۴-۵۰. کانتورهای جابجایی افقی دیواره گود و شمع‌ها در سه حالت فاصله محوری

الف - $s = 1/5 d$ و ب - $s = 2/5 d$ و ج - $s = 4 d$

با توجه به شکل ۴-۵۰، در نمایش تغییر شکل‌های سه حالت مختلف فاصله محوری شمع، مشاهده

می‌شود که با حرکت از شمع به طرف وسط دهانه‌ی بین دو شمع، از اثر نگهدارنده شمع کاسته می‌شود و جابجایی خاک نسبت به خاک پشت شمع بیشتر می‌گردد حال اگر S بزرگ‌تر باشد، فاصله وسط دهانه از خاک پشت شمع بیشتر می‌گردد و این امر سبب افزایش جابجایی نسبی خاک می‌شود. همچنین بیشترین جابجایی نوک شمع‌های میانی، برای شمع‌ها با فاصله محوری $1/5d$ ، $2/5d$ و $4d$ به ترتیب 10 ، $11/1$ و 12 سانتی‌متر است. شکل ۴-۵۱ مقایسه تغییر شکل افقی شمع‌ها را در اثر افزایش فاصله محوری در سه حالت مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵۱. تغییر شکل افقی شمع با تغییر فاصله محوری بین شمع‌ها

همان‌طور که از نمودار شکل ۴-۳۳ بالا مشخص است مقادیر جابجایی افقی شمع نگهبان میانی در ضلع بزرگ‌تر گود درر حالتی که فاصله محوری 4 متر باشد نسبت به حالتی که فاصله محوری $2/5$ متر می‌باشد به میزان حدود 10 درصد افزایش می‌یابد. زمانی که فاصله محوری شمع‌ها $1/5$ متر باشد به نسبت فاصله محوری $2/5$ متر، میزان تغییر شکل افقی شمع حدود 9 درصد کاهش می‌یابد که می‌توان حالتی را که فاصله محوری 4 متر می‌باشد را حالت بهینه در این بررسی در نظر گرفت.

فصل ۵

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱. نتیجه‌گیری

با توجه به آنالیزهای انجام‌شده می‌توان نتیجه‌گیری‌های زیر را بیان کرد. قابل‌ذکر است نتایج زیر برای شرایط مذکور و گود معرفی شده هست و در گودهای دیگر ممکن است با وجود پارامترهای متفاوت، مقادیر ذکر شده در نتایج متفاوت باشند.

۱- اجرای شمع به‌عنوان سازه نگهبان تاثیر بسزایی در کاهش جابجایی خاک ماسه‌ای بدون چسبندگی دارد.

۲- به‌طور کلی روند تغییر شکل‌های جانبی شمع‌های نگهبان طره‌ای می‌باشد و ماکزیمم تغییر شکل افقی آن در قسمت بالایی طول شمع رخ می‌دهد که با افزایش فاصله از گوشه گود این میزان تغییر شکل افزایش می‌یابد و این مقدار در عمق کاهش می‌یابد.

۳- شاکریت فضای بین شمع‌های نگهبان، می‌تواند تغییر شکل‌ها را تا ۱۵٪ کاهش دهد و همچنین شاکریت، بیشترین نقش را بر روی کاهش فرسایش سطوح خاکی و تنش خاک و انتقال تنش‌ها به شمع‌های نگهبان دارد.

۴- اجرای تیر کلاف در بالای شمع‌ها می‌تواند جابجایی افقی گودبرداری انجام‌شده در خاک را تا حدود ۳۶ درصد کاهش دهد.

۵- با افزایش عمق مدفون شمع در خاک، جابجایی کاهش می‌یابد. ولی نرخ این کاهش جابجایی برای عمق نفوذ بیشتر از ۴۰٪ عمق گود، تقریباً ثابت است. این امر نشانه گیرداری کامل برای عمق نفوذ بالاتر از ۴۰٪ عمق گود است. لذا عمق مدفون $0.4H$ (طول شمع ۲۱ متر) از لحاظ صرفه اقتصادی انتخاب می‌گردد.

۶- با بررسی نتایج حاصل از تغییر فاصله محوری، مشخص شد میزان تغییر شکل افقی شمع از فاصله محوری $1/5d$ تا $2/5d$ به میزان ۹ درصد و این میزان تغییرات از فاصله محوری $2/5d$

تا ۴d برابر با ۱۰/۵ درصد افزایش می‌یابد.

۵-۲. ارائه پیشنهادات

پیشنهادهای زیر را می‌توان به‌عنوان زمینه‌هایی برای تحقیقات آتی مطرح کرد.

- ۱- بررسی اثرات سطح آب زیرزمینی بر پایداری گود با استفاده از شمع‌های نگهبان
- ۲- اضافه نمودن تحلیل‌های دینامیکی و بررسی اثر زلزله بر پایداری گود با شمع‌های نگهبان
- ۳- بررسی تاثیر استفاده از سایر مدل‌های رفتاری برای خاک نظیر تئوری دراگر-پراگر و نظریه چندصفحه‌ای در دقت نتایج
- ۴- بررسی مدل‌سازی انواع روش‌های گودبرداری در یک گود خاص
- ۵- مقایسه نتایج ابزار دقیق در گودبرداری با مدل‌سازی عددی

مراجع

منابع

- [۱] صادقی ا، (۱۳۹۱)، پایان نامه ارشد: "تحلیل عددی پایدارسازی دیوارهای گودبرداری با استفاده از سیستم ترکیبی شمع های بتنی درجاریز و میخکوبی" دانشگاه سمنان
- [۲] رضایی ا، (۱۳۹۳)، پایان نامه ارشد: "مطالعه عددی پایدارسازی گودبرداری با استفاده از شمع های نگهبان" دانشکده فنی یزد
- [۳] حسنی م. محمودی ن. (۱۳۹۵) "بررسی تاثیر تغییرات نسبت لاغری شمع بر پایداری گودبرداری توسط گروه شمع تحت بارهای لرزه ای" کنفرانس ملی یافته های نوین پژوهشی و آموزشی
- [۴] سروری ف، پایان نامه ارشد: (۱۳۹۶) "مطالعه عددی تاثیر عملکرد قوسی در پایداری گودبرداری عمیق با سیستم شمع نگهبان"، دانشگاه رازی "
- [۵] احسانی م، (۱۳۹۳)، پایان نامه ارشد: "ارزیابی عددی رفتار پارامترهای مؤثر در طراحی گودهای پایدار شده به روش اجرای شمع درجا" دانشگاه حکیم سبزواری
- [6] D. Twine, H. Roscoe (۱۹۹۹) "Temporary propping of deep excavations-guidance on design" Construction Industry Research and Information Association
- [7] Sabatini, Pass, and R. Bachus (۱۹۹۹) "Ground Anchors and Anchored Systems" Geotechnical engineering circular No. ۴: FHWA-IF-۰۱۵-۹۹: Capítulo IV, pp. ۵۷-۶۶.
- [۸] اجرایی م. ح. (۱۳۹۲)، "اصول گودبرداری و ایمنی"
- [9] The German Society for Geotechnics, (2003) "Recommendations on Excavations"
- [10] A. Weissenbach, (2003) "Recommendations on Excavations," EAB. Nord. Alem. Ernst Sohn a Wiley Co.

- [11] W. G. Kutschke, F. S. Tarquinio, و W. K. Petersen,(2007) “Practical soil nail wall design and constructability issues,” DFI’s 32nd annual conference on deep foundations, Nicholson Construction Company, USA
- [۱۲] اشرفی ح ر، (۱۳۸۵)، "مقررات ملی ساختمان، اصول و مبانی گودبرداری و سازه‌های نگهدارنده"
- [13] Godavarathi V. R., Mallavalli D.(۲۰۱۱)"Conitiguous pile wall as a deep excavation supporting system" Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies.pp ۱۶۰-۱۴۴
- [14] C-Y. Ou,(2014)" Deep excavation: theory and practice". Crc Press
- [۱۵] طاحونی ش،(۱۳۹۰) ساختمان‌های بتن مسلح، انتشارات دانشگاه تهران
- [16] M. Braja, Das."(2010) Principles of foundation engineering 6th Ed" Thomson Learn.
- [17] S. Y. Lam,(2010) “Ground movements due to excavation in clay: physical and analytical models.” University of Cambridge.
- [۱۸] صدرنژاد س،(۱۳۷۹)، مبانی نظریه خمیری در خاک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
- [19] R. B. Peck,(۱۹۶۹) “Deep excavations and tunneling in soft ground,” Proc. 7th ICSMFE,pp. ۲۹۰-۲۲۵
- [20] G. W. Clough, E. M. Smith و B. P. Sweeney,(1989) “Movement control of excavation support systems by iterative design,” Foundation engineering: Current principles and practices, pp۸۶۹-۸۸۴.
- [21] G. W. Clough,(۱۹۹۰) “Construction induced movements of in situ walls,” Des. Perform. earth retaining Struct.pp,۴۳۹-۴۷۰.
- [22] P-G. Hsieh و C-Y. Ou,(۱۹۹۸) “Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation” Can. Geotech. J.pp ,۱۰۰۴-۱۰۱۷.
- [23] C-Y. Ou و P-G. Hsieh, (۲۰۱۱) “A simplified method for predicting ground

- settlement profiles induced by excavation in soft clay," *Comput. Geotech.* pp,997-987.
- [24] H. G. Poulos و L. T. Chen,(1997) "Pile response due to excavation-induced lateral soil movement," *geoenvironmental Eng* pp,99-94.
- [25] M.R. Kahyaoglu, G. Imancli, A.U. Ozturk, A.S. Kayalar,(2009) "Computational 3D finite element analyses of model passive piles," *Comput. Mater. Sci.*pp. 202-193
- [26] C-Y. Ou, F-C. Teng,I-W. Wang,(2008)"Analysis and design of partial ground improvement in deep excavations". *Computers and Geotechnics* 35.pp, 576-584.
- [27] Q-Chang L, J-Wei Z,(2010). "Numerical Analysis of Soil Arching Effects of Anti-Sliding Pile".*IEEE*
- [28] M. A. El-Naiem, A. R. Towfeek, W. H. A. El-Samea,(2016) "Numerical analysis of concrete solid pile with steel sheet pile lagging supporting system in sandy soil" *Int J Sci Eng Res*,1643-1660.
- [29] S. Prakash, M. K. Khan, I. Alam, R. Banerjee,(2016) "Study of Modulus of Elasticity of RC Beam under Flexural Loading using ANSYS,"pp. 1335-1344.

ABSTRACT

Today, due to the increasing growth of urban areas and in order to provide underground spaces for transportation and parking, it is necessary to perform deep excavations in the vicinity of neighboring structures or in the vicinity of transportation routes. Therefore, new and common methods are needed to increase safety during excavation. The subject of this research is focused on stabilization by using piles. It is essential to implement method with high efficiency to result maximum stability in excavation using a method that has a high speed and maximum stability. Utilization of piles can be beneficial for other uses in civil engineering as columns in case of placing the roof of underpasses.

The present study is based on software calculations using numerical solution of finite element method (FEM) in Abaqus environment. After controlling the accuracy of modeling and software performance, numerical modeling and parametric evaluation of excavation performance with in-situ pile guardian structure against incoming loads as well as deformation of the ground surface, excavation floor and wall are discussed. The parameters studied in this study are the effect of shotcrete between the piles, the execution of the concrete beam on top of the piles, the depth of penetration of the pile and the axial distance between the piles in the sandy soil. According to the analysis, Soldier piles with axial distance of 2.5 times the diameter of the pile and buried depth of 0.4 times the height of the pile, Besides that the implementation of concrete beams at the top and shotcrete between the piles are economically viable.

Keywords: Excavation, Soldier pile, pile Group, Stabilization, Numerical modeling



Shahrood University of technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Geotechnical Engineering

**Numerical Modeling of stabilization of excavations
stabilized by Pile Group**

By: Abdolrahman Torabahmadi

Supervisor:

Dr. Reza Naderi

October 2020