

اهمیت مدل رفتاری بر دقت و تخمین تغییر شکل گودهای عمیق شهری

سعید غفارپور جهرمی^{۱*} و حسام‌الدین عطاییان دهکردی^۲

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

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

دریافت: ۱۳۹۹/۱۰؛ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶

چکیده

امروزه گودبرداری یکی از مراحل حساس و مهم در ساخت و سازهای شهری محسوب می‌شود که مهندسان همواره تلاش می‌کنند با انتخاب روش‌های مختلف آن را تحلیل، طراحی و اجرا نمایند. اهمیت این موضوع زمانی مشخص می‌شود که در محیط‌های شهری، تحلیل تغییر مکان و تغییر شکل‌های اطراف گود بر اساس ضوابط و مقررات ملی ساختمان الزامی است چرا که بناها و ابنیه اطراف محل گودبرداری نسبت به نشست نامتقارن حساسیت زیادی دارند. لذا مهندسان علاوه بر تحلیل پایداری گود، با استفاده از اطلاعات ژئوتکنیکی ساختگاه، هندسه گود، سربارهای اطراف گود و شبیه‌سازی مراحل گودبرداری، به ارزیابی و پیش‌بینی تغییر شکل‌ها و تغییر مکان‌های اطراف گود می‌پردازند. تحلیل تغییر مکان و تغییر شکل به شدت به مدل رفتاری ساختگاه (خاک و سنگ) وابسته است و برای شبیه‌سازی رفتار خاک در نرم افزارهای عددی، استفاده از مدل مناسب رفتاری از اهمیت زیادی برخوردار است. در این تحقیق با مطالعه موردی یک گودبرداری عمیق ۱۶/۵ متری در شهر تهران به روش عددی با تحلیل المان محدود، به مقایسه نتایج حاصل از مدل رفتاری سخت شونده و مدل رفتاری موهر کولمب پرداخته می‌شود و با نتایج حاصل از پایش و ابزارگذاری موجود در گود مقایسه می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که رفتار گود و تغییر شکل‌های متاثر از عملیات حفاری و گودبرداری، با انتخاب مدل رفتاری سخت شونده در مقایسه با مدل رفتاری موهر کولمب، شباهت بیشتری با واقعیت و نتایج پایش گود دارد.

واژگان کلیدی

گودبرداری، مدل رفتاری خاک و سنگ، پایش گود، تحلیل پایداری، تحلیل تغییر شکل

۱- مقدمه

امروزه با گسترش شهرسازی و توسعه روز افزون ساخت سازه‌های بلند مرتبه، نیاز به گودبرداری‌های عمیق وجود دارد. موضوع مهمی که در طراحی گودبرداری باید مورد توجه قرار گیرد، تحلیل پایداری و تحلیل تغییر شکل‌ها ناشی از اثر گود می‌باشد تا از هرگونه مخاطرات احتمالی در محیط‌های شهری اجتناب شود. گودبرداری به معنی پایین رفتن از سطح طبیعی زمین یا پایین رفتن از تراز پی و فونداسیون ساختمان‌های مجاور قابل تعریف است. در اثر گودبرداری، خاک بعنوان یک عنصر باربر حذف شده که در نتیجه، تعادل تنش‌های اولیه در توده خاک و همچنین تنش‌های بین دانه‌ای (تنش موثر) به هم می‌خورد. تغییرات در تنش اگر از آستانه تحمل خاک فراتر رود، خاک ناپایدار شده و ریزش گود حتمی خواهد بود. لذا یکی از اهداف مهندسی در ارزیابی گود، تحلیل پایداری می‌باشد بطوریکه

ضریب اطمینان همواره بایستی بالاتر از یک باشد. علاوه بر تحلیل پایداری، به دلیل اثر حفاری گود بر محیط اطراف، تحلیل تغییر شکل و نشست نیز در محیط‌های شهری الزامی می‌باشد که نمونه آن در شکل ۱ و ۲ نشان داده شده است. در این راستا لازم است شبیه‌سازی مناسبی از عملیات گودبرداری با هدف پیش‌بینی نشست و تغییر شکل انجام شود.

شرط لازم یک طراحی مطمئن در گودبرداری‌های شهری، انتخاب یک سیستم پایداری مناسب، تجزیه و تحلیل دقیق مراحل گودبرداری و پایش عملکرد دیواره گود و محیط پیرامون می‌باشد. نحوه و میزان تغییر شکل‌های محیط جانبی گود، وابستگی زیادی به مشخصات ژئوتکنیکی محل، عمق گود، سرعت و نحوه عملیات گودبرداری (برنامه گودبرداری)، سختی سازه نگهدارنده و روش اجرا دارد [۱]. تا کنون محققان بسیاری تلاش کرده‌اند با ارزیابی پارامترهای

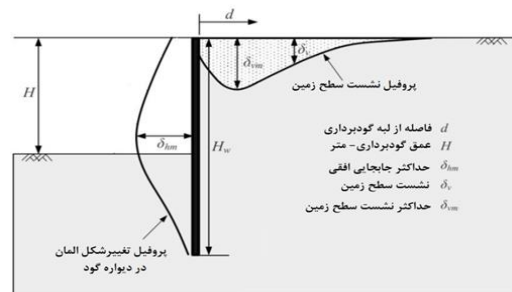
استفاده از روش المان محدود و همچنین دیگر روش‌های تجربی و نیمه تجربی از جمله روش‌های رایج در تخمین و تحلیل تغییر شکل نشست ناشی از گودبرداری می‌باشد. روش‌های تجربی اغلب بر مبنای هندسه گود و مشخصات کلی خاک به پیش‌بینی میزان نشست و جابجایی می‌پردازند که با حساسیت گودبرداری‌های شهری و مخاطرات آن تطابق ندارند. در تحقیق دیگری یک مدل ساده برای پیش‌بینی تغییر شکل دیواره دیافراگمی (بتن مسلح) مستقر در گودبرداری خاک رس پیشنهاد شده که یک مدل نیمه تجربی برای تخمین جابجایی حداکثر لبه گود است [۵]. این رابطه با هندسه گود، مشخصات خاک، سختی خمشی و عمق گیرداری دیوار بیان می‌شود. این مدل تجربی با نتایج نرم‌افزار عددی پلکسیس و همچنین نتایج پایش گود حاصل از ابزار دقیق (۲۱ مورد) هماهنگی دارد [۶]. امروزه محققان به صورت گسترده از روش المان محدود به بررسی و تحلیل اندرکنش خاک و سازه نگهبان و تاثیر آن بر کرنش‌های کوچک خاک و مشکلات رایج در گودبرداری‌های شهری می‌پردازند تا بتوانند پیش‌بینی صحیح رفتار تغییر شکل‌های ناشی از گودبرداری داشته باشند. مهمترین دستاورد تحقیقات حاضر نشان می‌دهند که نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی به شدت با مشخصات خاک، نحوه مدلسازی، شبیه‌سازی و همچنین مدل رفتاری خاک وابستگی دارند [۷-۸].

همچنین نتایج بررسی محققان مختلف نشان داد که مدل رفتاری موهرکولمب با وجود تخمین نسبتاً دقیق لنگر خمشی و تغییر شکل حداکثر دیوارهای حائل وزنی، قادر به پیش‌بینی صحیح الگوی تغییر شکل خاک در پشت دیوار نمی‌باشد. بررسی تاثیر مدل‌های رفتاری مختلف بر روی خاک رس و ماسه نشان می‌دهند که مدل رفتاری موهرکولمب برای شبیه‌سازی جابجایی قائم خاک مناسب نمی‌باشد و استفاده از آن در بسیاری از موارد منجر به پیش‌بینی تورم خاک پشت دیوار به جای نشست می‌گردد [۸]. همچنین تحقیقات زیادی برای مدلسازی اندرکنش سازه نگهبان و خاک با استفاده از روش‌های عددی اجزای محدود، اجزای مجزا و تفاضل محدود با نرم‌افزارهای مختلف انجام شده است [۹-۱۳].

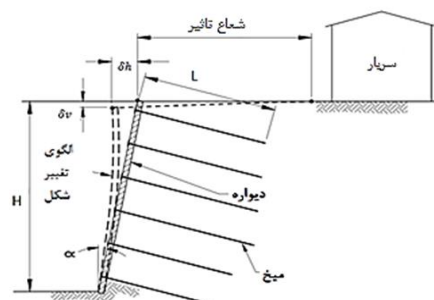
ذکر این نکته لازم است که دقت مدلسازی عددی تا حد زیادی به مدل رفتاری و انتخاب مناسب متغیرهای مدل بستگی دارد [۱۴]. برخی تحقیقات نشان داده‌اند که سختی خاک در کرنش‌های بسیار کوچک (کمتر از 10^{-5}) نقش مهمی بر رفتار و پاسخ تغییر شکل‌های خاک دارند. یکی از قابلیت‌های مدل خاک سخت‌شونده، امکان بیان رفتار خاک در کرنش‌های بسیار کوچک می‌باشد [۱۴]. در اغلب مدلسازی‌های عددی معمولاً از مدل رفتاری مرتبه اول موهرکولمب و به ندرت از مدل خاک سخت‌شونده استفاده می‌شود [۱۶]. در تحقیق حاضر به منظور ارزیابی قابلیت هر یک از دو مدل رفتاری

فوق به پیش‌بینی تغییر مکان دیواره گود و محیط اطراف گود بپردازند. در یکی از این تحقیقات، با استفاده از تحلیل به روش اجزای محدود با مدل الاستوپلاستیک، نشست سطح زمین در پشت یک دیوار حائل نگهدارنده خاک رس نرم مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق مشاهده شد که نتایج تحلیل عددی با مقادیر تغییر شکل اندازه‌گیری شده خاک در پشت دیوار حائل سازگار نیست [۲]. علت این ناسازگاری عواملی نظیر غیرخطی بودن رفتار خاک، تمرکز تنش و کرنش و همچنین بروز تحکیم در خاک است که مدل الاستوپلاستیک در تحلیل تنش‌ها قادر به لحاظ کردن آنها نمی‌باشد [۳]. همچنین در تحقیق دیگری با استفاده از تحلیل عددی، اثر عوامل مختلف بر تغییر مکان خاک در اطراف یک گود مهار شده در خاک رس نرم مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن نشان داد نشست سطح زمین در فاصله‌ای معادل ۳ برابر عمق به صفر میل می‌کند [۴].

در این بررسی‌ها تاثیر مدل رفتاری خاک کمتر مورد توجه قرار گرفته است. لذا یکی از اهداف این تحقیق، ارزیابی مدل رفتاری در پیش‌بینی صحیح تغییر شکل‌های ناشی از عملیات حفاری می‌باشد. پیش‌بینی صحیح از میزان تغییر شکل‌ها همواره یکی از دغدغه‌های مهندسین طراح در گودبرداری‌های شهری بوده است بطوریکه همواره این نگرانی وجود دارد که اگر تغییر شکل‌های واقعی از تغییر شکل‌های پیش‌بینی شده فراتر برود، احتمال بروز خسارتهای جانی و مالی وجود خواهد داشت.



شکل ۱: نحوه تغییر شکل‌های دیواره گود و محیط اطراف در گودبرداری [۱۸]



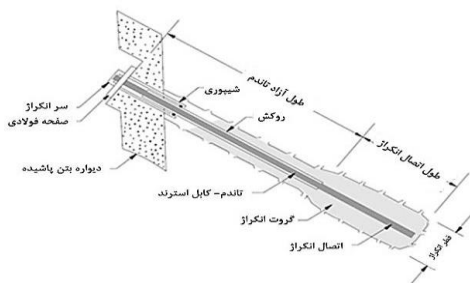
شکل ۲: شعاع تاثیر و نحوه تغییر شکل‌ها در گودبرداری به روش میخکوبی [۱۸]

پروفیل‌های فولادی قائم، مهار کششی پس‌کشیده جهت دوخت اعضای قائم به خاک پشت و دیواره بتن مسلح بین اعضای قائم (شاتکریت) می‌باشد. طول المانهای قائم یا شمع به منظور تأمین گیرداری، می‌تواند از عمق کل گود بیشتر باشد و محل انتهای آن از رقوم کف گود پایین‌تر باشد (شکل ۳).

از مهمترین ویژگی روش دیوار برلنی، امکان کنترل نشست و محدود کردن جابه‌جایی افقی و قائم دیواره گود و محیط اطراف با استفاده از اعضای فولادی قائم و نیز بهره‌گیری از مهارهای کششی پس‌کشیده (کابل‌های استرند) می‌باشد. لذا این روش در گودبرداری‌های شهری و در مجاور ساختمان‌ها حساس می‌تواند بسیار سودمند و کارگشا باشد.



شکل ۳-الف: جزئیات پایدارسازی به روش دیوار برلنی



شکل ۳-ب: جزئیات انکراژ

۳- پایدارسازی گود به روش میخکوبی

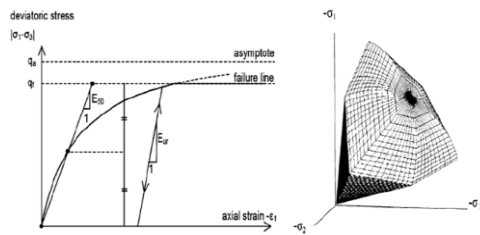
میخکوبی نوعی روش مسلح‌سازی خاک به صورت غیرفعال و بدون اعمال پیش‌تنیدگی است که با استفاده از میلگردهای فولادی (میخ یا نیل) صورت می‌پذیرد. معمولاً میخ‌ها با زاویه ۱۰ الی ۲۰ درجه نسبت به افق در خاک اجرا می‌شوند تا از حداکثر ظرفیت کششی آنها استفاده شود. به منظور ایجاد پیوستگی و درگیری بین خاک و المان فولادی از تزریق دوغاب سیمان استفاده می‌شود. همچنین از یک لایه بتن مسلح پاشیدنی (شاتکریت) بر سطح حفاری، از ریزش‌های موضعی جلوگیری می‌شود. به طور معمول از این تکنیک در گودبرداری‌های شهری بسیار استفاده می‌شود (شکل ۴).

موهر کولمب (MC) و خاک سخت شونده (HS) در برآورد میزان تغییرشکل‌های واقعی خاک، دیواره دو ضلع از یک گودبرداری عمیق در پروژه‌ای واقع در شمال تهران به عمق ۱۶/۵ متر مورد بررسی قرار گرفته است که پایدارسازی آنها در یک طرف با استفاده از سیستم دیوار برلنی و در طرف دیگر به روش میخکوبی اجرا شده است. در این پروژه یک وجه از دیواره گود که در مجاورت ساختمان قدیمی همسایه قرار دارد به روش دیوار برلنی و در وجه مقابل آن که یک قطعه زمین بدون ساختمان مسکونی همسایه قرار داشت به روش میخکوبی پایدارسازی شده است. نتایج پایش تغییرشکل‌های گود با استفاده از ابزار دقیق به روش میکروژئودزی در طول فرآیند گودبرداری و تا سه ماه بعد از اتمام گودبرداری در دسترس می‌باشد که در اعتبارسنجی تحلیل عددی مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه توضیح مختصری در مورد سیستم پایدارسازی دیوار برلنی و میخکوبی و همچنین مدل‌های رفتاری موهر کولمب (MC) و سخت شونده (HS) ارائه می‌شود.

۲- پایدارسازی گود به روش المان قائم و مهار کششی (دیوار برلنی)

امروزه در ساخت و سازهای شهری الزام به اجرای گودهای عمیق اجتناب ناپذیر است و همواره از روش‌های مختلفی به منظور پایدارسازی گود استفاده می‌شود. در انتخاب روش پایدارسازی گود معیارها و دلایلی توجیهی متعدد وجود دارد بطوریکه باید گفت از هر روشی در هر گودی نمی‌توان استفاده کرد. عبارتی روش انتخاب شده باید متناسب با شرایط گود و الزامات مورد نظر پروژه باشد. میزان نشست و تغییرمکان اطراف گود و همچنین محدوده بروز نشست به سه عامل اصلی شامل هندسه و عمق گود، مشخصات خاک منطقه و سربار اطراف گود وابسته است لذا در انتخاب روش مناسب باید دقت زیادی داشت چرا که برخی از روشهای پایدارسازی گود، نمی‌توانند میزان تغییرمکان‌ها را کنترل و محدود نمایند.

در محیط‌های شهری ساختمانهای قدیمی همسایه در اطراف گود به دلیل عدم وجود اسکلت باربر و همچنین عدم وجود پی مناسب، حساسیت زیادی نسبت به نشست و تغییرشکل نامتقارن دارند لذا باید تلاش شود روش انتخاب شده در پایدارسازی گود، تغییرمکان و تغییرشکل کمی در حد توان سازه مجاور گود داشته باشند. یکی از روش‌های مناسب و متداول در محیط‌های شهری به منظور کاهش و کنترل میزان نشست و تغییرمکان حاصل از عملیات گودبرداری و همچنین کاهش اثرات گودبرداری بر محیط اطراف، استفاده از سیستم موسوم به دیوار برلنی با استفاده توام المانهای قائم فولادی (سولجر پیل) همراه با مهارهای پس‌کشیده کششی (انکراژ) می‌باشد. این روش پایدارسازی شامل سه بخش اصلی یعنی اعضا یا

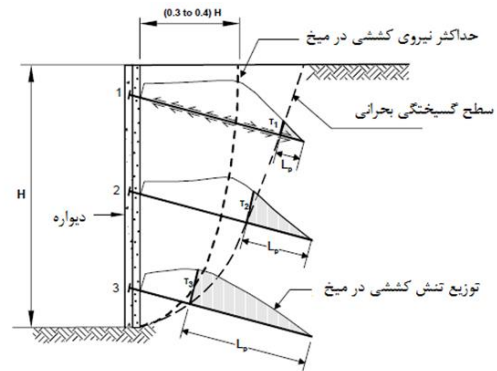


شکل ۶: رابطه تنش انحرافی و کرنش محوری و سطح تسلیم در مدل خاک سخت‌شونده

متغیرهای اصلی مدل همانگونه که در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است عبارتند از متغیرهای مقاومتی ϕ ، C و Ψ . متغیرهای کنترل کننده سستی خاک نیز شامل E_{oed}^{ref} (سستی تانژانت برای بارگذاری اولیه ادمومتر) و E_{50}^{ref} (سستی سکانت در آزمایش سه محوری زهکشی شده) هستند که رفتار حجمی خاک را کنترل می‌کنند. مدول مرجع باربرداری و بارگذاری مجدد نیز با E_{ur}^{ref} (سستی باربرداری - بارگذاری مجدد) بیان می‌شود. میزان وابستگی سستی به سطح تنش نیز از طریق فاکتور m تعیین می‌گردد. براساس مطالعات ونسون در سال ۱۹۸۰، مقدار m در بازه صفر تا یک قرار دارد.

۵- معرفی جزئیات مدلسازی و مشخصات مصالح

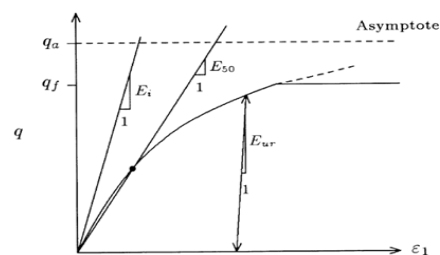
به منظور بررسی قابلیت هر یک از دو مدل موهر کولمب و خاک سخت شونده در بیان تغییر شکل‌های واقعی خاک، بعنوان مطالعه موردی اطلاعات یک گودبرداری در شهر تهران (منطقه یک-بلوار ارتش)، به ارتفاع ۱۶/۵ متر با سطح قائم دیواره و سطح افقی خاکریز پشت دیواره انتخاب شد. هر چند انتظار ناهمگن و لایه‌ای بودن برای خاک متصور است اما با استناد به گزارش ژئوتکنیک، خاک تک لایه و با مشخصات ارائه شده در گزارش ژئوتکنیکی مورد تحلیل و مدلسازی قرار می‌گیرد. این گود برای سیستم دیوار برلنی با استفاده از مهار کششی شامل کابل‌های استرند ۳ رشته‌ای همراه با اعضای فولادی (جفت IPE24) و شاتکریت بین آنها و برای سیستم میخکوبی از آرماتورهای فولادی با قطر ۳۲ و ۴۲ میلیمتر و شاتکریت بین آنها پایدارسازی شده است. ساختگاه خاک در محل پروژه بر اساس نتایج و گزارش مطالعات ژئوتکنیک، شامل خاک دستی به ضخامت ۱ متر و بقیه لایه‌بندی خاک به صورت همگن در نظر گرفته شد [۱۷]. سازه مجاور این گود یک ساختمان یک طبقه قدیمی می‌باشد که مطابق با آیین‌نامه آشتو (AASHTO1997)، سرباری معادل ۱۰ کیلونیوتن بر مترمربع برای آن منظور شد. طراحی دیوار در این مطالعه براساس روش تنش مجاز با استفاده از آیین‌نامه FHWA انجام گرفت [۱۸].



شکل ۴: جزئیات پایدارسازی به روش میخکوبی

۴- مدل رفتاری خاک و سنگ

کولمب در سال ۱۹۰۰ یک معیار ساده ولی پر کاربرد در بیان معیار شکست مواد و مصالح معرفی کرد که تابع تنش نرمال در صفحه شکست می‌باشد. این نظریه در مکانیک خاک و مکانیک سنگ بر مبنای مقاومت اصطکاکی و چسبندگی بین ذرات خاک بیان می‌شود. برای بیان رفتار الاستیک خطی و همچنین رفتار پلاستیک مصالح در مدل موهر کولمب از پنج متغیر اصلی استفاده می‌شود. این مدل از ترکیب قانون هوک و معیار گسیختگی کولمب استفاده می‌کند. متغیرهای مورد استفاده در این مدل به دو دسته متغیرهای الاستیک و پلاستیک تقسیم می‌شوند. متغیرهای الاستیک شامل مدول یانگ (E)، ضریب پواسون (ν) و متغیرهای پلاستیک شامل زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)، چسبندگی (C) و زاویه اتساع (Ψ) می‌باشند. این مدل در پیش‌بینی تغییر مکان‌ها قبل از گسیختگی دارای محدودیت بوده و دقت مناسب را ندارد. مدل خاک سخت شونده یک مدل رفتاری قدرتمند برای شبیه‌سازی رفتار انواع خاکهای سخت و نرم می‌باشد. از جمله ویژگی‌های مهم این مدل می‌توان به وجود دو نوع سخت‌شوندگی برشی و فشاری و نیز عدم ثابت بودن سطح تسلیم مدل و تغییر آن با افزایش کرنش‌های پلاستیک اشاره کرد. به عنوان یکی از تفاوت‌های اصلی مدل سخت شونده با مدل موهر کولمب، می‌توان به وجود سستی مرتبط به سطح تنش در این مدل اشاره کرد. ایده اصلی برای روابط این مدل، رابطه هیپربولیک بین کرنش محوری و تنش انحرافی در بارگذاری سه‌محوری می‌باشد.



شکل ۵: رابطه هیپربولیک بین تنش انحرافی و کرنش محوری در آزمایش سه محوری زهکشی شده

و مدل رفتاری سخت شونده (HS) برای شبیه‌سازی رفتار خاک استفاده گردید. دیگر مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک محل پروژه حاصل از گزارش ژئوتکنیک این دو مدل در جدول ۱ نشان داده شده است [۱۷]. مشخصات هندسی و سایر مشخصات سیستم پایدارسازی در جدول ۲، ۳ و ۴ آمده است.

طراحی مقدماتی با استفاده از نرم‌افزار تعادل حدی *Geoslope* 2012 به منظور تحلیل پایداری و تعیین ضریب اطمینان انجام گرفت. همچنین از نرم‌افزار المان محدود *Plaxis 8.6* برای مدلسازی عددی و تحلیل تغییرشکل در شرایط کرنش صفحه‌ای استفاده شده است. همچنین از دو مدل رفتاری موهرکولمب (MC)

جدول ۱: پارامترهای ژئوتکنیکی برای مدل‌های رفتاری با استناد به گزارش ژئوتکنیک [۱۷]

مشخصه خاک محل	علامت	واحد	مدل رفتاری	سخت شونده
چسبندگی	C	کیلوپاسکال	موهرکولمب	۱۸
زاویه اصطکاک داخلی	ϕ	درجه	موهرکولمب	۳۳
زاویه‌ی اتساع	Ψ	درجه	موهرکولمب	۵
وزن مخصوص	γ	کیلونیوتن بر مترمکعب	موهرکولمب	۲۰
مدول الاستیسیته	E	کیلوپاسکال	موهرکولمب	۵۰۰۰۰
سختی سکانت در آزمایش سه محوری زهکشی شده	E_{50}^{ref}	کیلوپاسکال	موهرکولمب	-
سختی تانژانت برای بارگذاری اولیه ادومتر	E_{oed}^{ref}	کیلوپاسکال	موهرکولمب	-
سختی باربرداری - بارگذاری مجدد	E_{ur}^{ref}	کیلوپاسکال	موهرکولمب	-
فاکتور وابستگی سختی به سطح تنش	m	بدون بعد	موهرکولمب	۰/۵
تنش مرجع	p^{ref}	کیلوپاسکال	موهرکولمب	۱۰۰
نسب پواسون	ν	بدون بعد	موهرکولمب	۰/۳
نسبت پواسون باربرداری و بارگذاری مجدد	ν'	بدون بعد	موهرکولمب	۰/۲

جدول ۲: مشخصات کابل استرند مهار کششی ۳ رشته‌ای به کار رفته در مدلسازی روش دیوار برلنی

تراز اجرا از سطح (متر)	طول کل (متر)	زاویه (درجه)	L_{bond} (متر)	L_{unbond} (متر)
۱	۷/۵	۱۵	۵	۲/۵
۳	۸/۵	۱۵	۵	۳/۵
۵/۵	۱۰	۱۵	۵	۵
۸	۱۱	۱۵	۵	۶
۱۰/۵	۱۲/۵	۱۵	۵	۷/۵
۱۳	۱۴	۱۵	۵	۹
۱۵/۵	۱۵/۵	۱۵	۵	۱۰/۵

جدول ۳: مشخصات مدلسازی و طراحی در روش دیوار برلنی

قطر چال حفاری	۰/۱۵ m
قدرت پیوند گروت و خاک (با استناد به دستورالعمل [۱۸])	۴۵ Mpa
فاصله افقی مهارهای کششی	۲ m
مشخصات اعضای قائم فولادی	یک جفت IPE 24 به طول ۲۰/۵ متر (دارای ۴ متر ریشه)
ضخامت رویه بتن پاشی (شاتکریت)	۰/۱۵ m

جدول ۴: مشخصات هندسی و چیدمان مدلسازی در روش میخکوبی

تراز اجرای میخ از سطح (متر)	فاصله افقی و قائم (متر)	قطر (میلیمتر)	زاویه اجرا (درجه)	طول (متر)
۱/۵	۱/۵	۴۲	۱۵	۸
۳/۵	۱/۵	۴۲	۱۵	۸
۵/۵	۱/۵	۴۲	۱۵	۱۰
۷/۵	۱/۵	۴۲	۱۵	۱۰
۹/۵	۱/۵	۳۲	۱۵	۱۲
۱۱/۵	۱/۵	۳۲	۱۵	۱۲
۱۳/۵	۲	۳۲	۱۵	۱۳
۱۵/۵	۲	۳۲	۱۵	۱۳

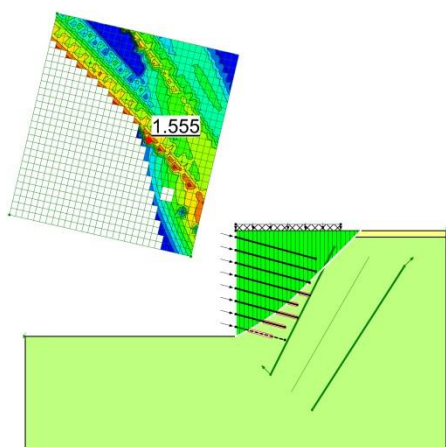
میخکوبی مقدار ۱/۵۵۵ دارد که بالاتر از حد قابل قبول آیین‌نامه‌های رایج (مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان) یعنی ۱/۵ می‌باشند.

۷- مدل المان محدود

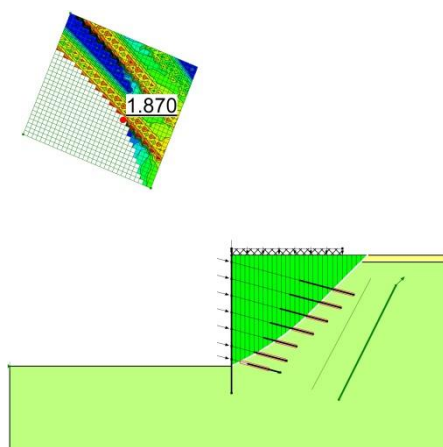
برای ساخت مدل المان محدود از شرایط کرنش صفحه‌ای استفاده شده است. شبکه‌بندی با استفاده از المان مثلثی ۱۵ گرهی انجام گرفته است. شکل ۹ و ۱۰ دیواره مدلسازی شده را بر اساس مشخصات هندسی و شرایط مرزی نشان می‌دهند. همچنین تاثیر ابعاد مش بر دقت روش نیز در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفت بطوریکه قسمتهایی از مدل و همچنین المان‌های مسلح کننده در شبکه‌بندی برای افزایش دقت، ریزتر شده است. در این روش نیز پس از تعریف المانهای مختلف، فازهای مختلف خاکبرداری ۳ متر تعریف می‌شود.

۶- مدل تعادل حدی

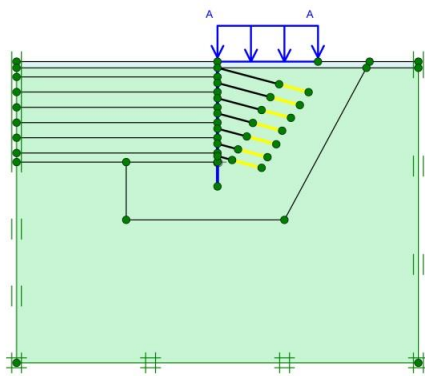
به منظور طراحی سیستم پایدارسازی گود لازم است تحلیل پایداری و تحلیل تغییر شکل انجام شود. در این تحقیق به منظور تحلیل پایداری، مدلسازی در نرم افزار *Geoslope* در حالت تعادل حدی انجام شده است تا ضریب اطمینان پایداری تعیین شود. مطابق شکل ۷ و ۸ ابعاد مدلسازی دو برابر عمق گود در نظر گرفته شد تا جهت بررسی تغییرات و عملکرد سیستم کافی باشد. این ابعاد بر اساس تجربه و بررسی مدلسازی‌های مشابه و همچنین توجه به محدوده تاثیر گود (حدود ۱/۵ برابر عمق گود) انتخاب شده است. بصورت ابعادی پس از تعریف شرایط مرزی و مشخصات خاک، المان‌های میخ، شمع فولادی و انکراژ ترسیم و مشخصات آنها تخصیص می‌یابد. نتایج بررسی نشان می‌دهد که ضریب اطمینان پایداری برای پایدارسازی به روش دیوار برلنی مقدار ۱/۸۷۰ و در روش پایدارسازی



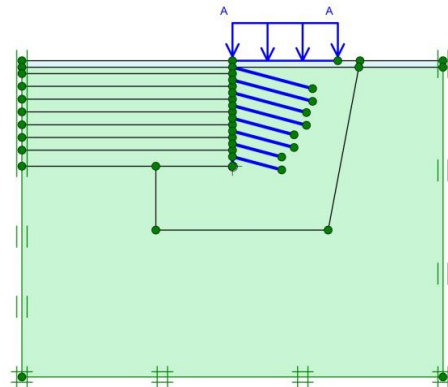
شکل ۸: مدلسازی تعادل حدی در روش میخکوبی



شکل ۷: مدلسازی تعادل حدی در روش دیوار برلنی



شکل ۱۰: مدل المان محدود در روش دیوار برلنی



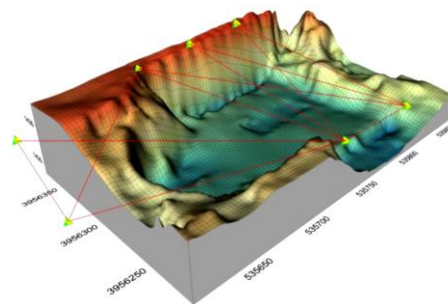
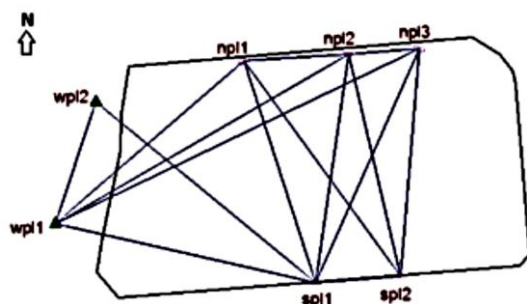
شکل ۹: مدل المان محدود در روش میخکوبی

ثابت در اطراف گود و خارج از محدوده تاثیر گود انتخاب و مشاهدات طول و زوایای افقی و قائم به سوی نقاط برداشت در ۹ مرحله متوالی یک ماهه (در یک بازه ۳ ماهه) انجام شده است. پس از سرشکنی هر مرحله، میزان جابجایی‌ها در هر نقطه به دست می‌آید.

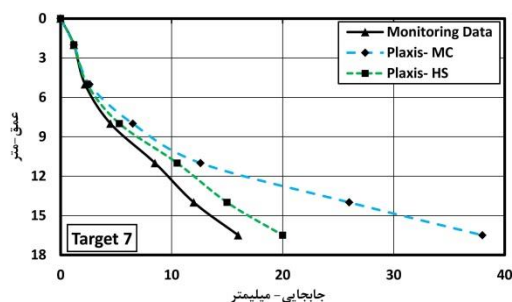
نتایج حاصل از پایش ژئودتیک در گودبرداری‌های شهری نشان می‌دهند میزان جابجایی‌ها، یک تابع غیرخطی از عمق گودبرداری، روش پایدارسازی و مشخصات خاک می‌باشد [۲۱]. مقایسه نتایج حاصل از تحلیل عددی با مقادیر پایش گود برای دو نقطه در جبهه‌ای گود به روش میخکوبی (نقطه شماره ۴ و ۷) و همچنین دو نقطه برداشت در جبهه مقابل به روش دیوار برلنی (نقطه شماره ۱۲ و ۱۶) در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. تراز موقعیت این نقاط در تراز صفر پروژه و در راس گود می‌باشد. این مقایسه نشان می‌دهد در تمامی نقاط برداشت، همواره نتایج تحلیل عددی با رفتار سخت شونده برای خاک به واقعیت نزدیک‌تر است و تطابق بهتری با نتایج پایش گود دارند.

۸- اعتبار سنجی و دقت سنجی مدل عددی

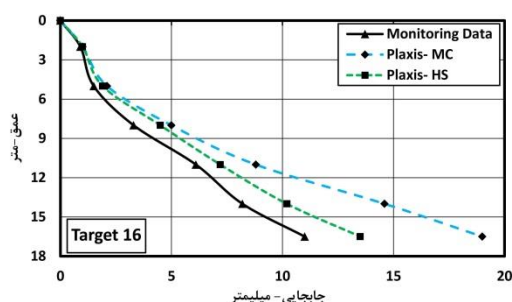
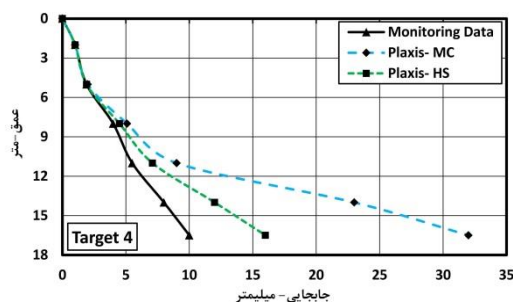
در تحقیق حاضر نتایج پایش تغییرشکل‌های گود با استفاده از ابزار دقیق به روش میکروژئودزی در طول فرآیند گودبرداری و تا سه ماه بعد از اتمام گودبرداری در دسترس می‌باشد که در اعتبارسنجی این تحلیلی عددی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش ژئودتیک برای پایش یک سازه در دو یا چند دوره زمانی، ابتدا یک شبکه‌ای از نقاط ثابت در اطراف آن سازه طراحی و ایجاد می‌گردد. سپس مشاهدات طول و زاویه برای تعیین مختصات دقیق نقاط انجام می‌شود. در مرحله بعد نقاطی را به عنوان نقطه برداشت (*Target*) بر روی بدنه دیواره مورد پایش، در نظر گرفته و سعی می‌شود کلیه مشاهدات ممکن از اکثر نقاط این شبکه به سوی نقاط برداشت به دست آیند (شکل ۱۱). اگر این مشاهدات در دو مرحله انجام شود، می‌توان میزان جابجایی نقاط را از مقایسه تفاوت مختصات تعیین کرد. با توجه به اینکه نقاط شبکه نیز ممکن است حرکت مستقل داشته باشند، لازم است مشاهدات خارج از منطقه مورد مطالعه نیز به سوی ایستگاه‌های شبکه انجام و پایداری شبکه در یک دوره زمانی بررسی شود [۲۰]. برای این منظور یک شبکه هفت نقطه‌ای شامل دو نقطه



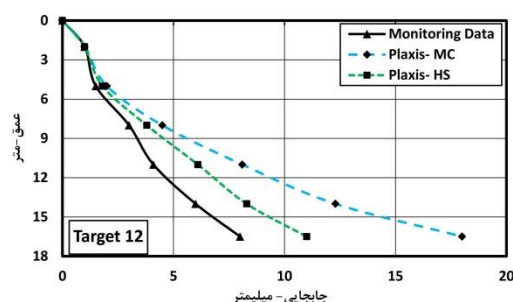
شکل ۱۱: نقاط شبکه پایش در اطراف گودبرداری و نقاط و مشاهدات شبکه پایش [۲۱]



شکل ۱۲: مقایسه نتایج پایش گود با نتایج تحلیل عددی در روش میخکوبی



شکل ۱۳: مقایسه نتایج پایش گود با نتایج تحلیل عددی در روش دیوار برلنی



ارزیابی، پیش بینی و کنترل جابه‌جایی و نشست ناشی از عملیات گودبرداری در محیط‌های شهری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است چراکه به دلیل عدم حفاظت از کف گودبرداری در حین ساخت، نیروهای نامتوازن ایجاد خواهد شد که می‌تواند باعث تغییر شکل کف گود به شکل تورم شود و می‌تواند به عنوان یکی از عوامل ناپایداری تحت عنوان گسیختگی ناشی از ظرفیت باربری باشد [۱۵].

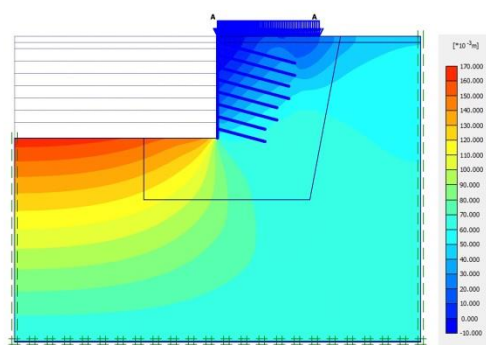
شکل ۱۶ و ۱۷ بیانگر میزان و نحوه تغییر شکل دیواره گود بر اساس دو مدل رفتاری تفاوت خاک می‌باشد. ارزیابی نتایج حاصل از این تحلیل با نتایج حاصل از پایش گود به روش ابزارگذاری دقیق نشان می‌دهند که تغییر شکل‌های پیش‌بینی‌شده در مدل رفتاری سخت‌شونده به واقعیت بسیار نزدیکتر است یعنی تغییر شکل‌های با روش تحلیل مدل رفتاری موهركولمب در عمل اتفاق نخواهد افتاد. همچنین این شکل‌ها که بیانگر جابجایی افقی در امتداد دیواره می‌باشد به وضوح نشان می‌دهند که در مدل رفتاری سخت‌شونده، میزان جابه‌جایی افقی بالای گود بیش از مقدار متناظر در مدل رفتاری موهركولمب می‌باشد. عبارتی در روش موهركولمب به دلیل بروز تورم زیاد در کف گود، تغییر شکل‌های افقی کمتری در مقایسه با مدل سخت‌شونده رخ خواهد شد. در روش نیلینگ این مقدار در مدل رفتاری سخت‌شونده ۳۷ میلیمتر در راس بالای گود و برای مدل رفتار موهركولمب ۲۲ میلیمتر در اعماق پایین کف گود است در حالیکه نتایج پایش مقدار جابجایی افقی را ۳۳ میلیمتر در نزدیکی بالای راس گود نشان می‌دهد. همچنین شکل ۱۷ نشان می‌دهد در روش دیوار برلنی مقدار جابجایی افقی حداکثر در مدل رفتاری

۹- تحلیل و ارزیابی نتایج برای دو مدل رفتاری موهركولمب و مدل رفتاری سخت‌شونده

با استفاده از توصیحات ارائه شده، مدلسازی گود به منظور تحلیل و ارزیابی رفتار گود در شرایط کاملاً مشابه از نظر هندسه و مشخصات خاک اما متفاوت از نظر مدل رفتاری به روش عددی انجام شد. در این راستا تحلیل با استفاده از دو مدل رفتاری موهركولمب و مدل رفتاری سخت‌شونده، مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به دست آمده به شرح زیر قابل بیان می‌باشد. در شکل ۱۴ و ۱۵ مقدار تورم بستر یا حداکثر میزان جابه‌جایی قائم و رو به بالای کف گود بر اساس مدل رفتاری نشان داده شده است. این نتایج به وضوح نشان می‌دهند که در مدل رفتاری موهركولمب، مقدار تورم بستر تا حد قابل توجهی بیشتر از مدل رفتاری سخت‌شونده محاسبه شده است در حالیکه در عمل این نوع تغییر شکل اتفاق نخواهد افتاد. دلیل این امر این است که در مدل رفتاری موهركولمب تفاوتی میان مدول الاستیسیته اولیه با حالت بارگذاری و باربرداری قائل نیست در صورتی که در حین خاکبرداری لایه‌های خاک تنش‌های متفاوتی تجربه خواهند کرد و باید این تفاوت در نظر گرفته شود. این تفاوت در مدل خاک سخت‌شونده لحاظ شده است. از آنجا که تورم کف گود مورد پایش قرار نگرفته لذا نمی‌توان این نتایج را با داده‌های پایش ژئودتیکی مقایسه نمود اما این نتایج با نتایج دیگر محققان مورد مقایسه قرار گرفته است که بیانگر همخوانی و همسویی خوب با تحقیقات قبلی آقای فان و همکارانش دارد [۱۱].

مشاهده نمی‌باشد. همچنین این نتایج نشان می‌دهد که جابه‌جایی افقی حداکثر، در هر دو مدل در یک محل و موقعیت اتفاق نمی‌افتد. همانطور که مشخص است، بیشترین جابجایی در مدل موهرکولمب در زیر کف گودبرداری شده است در صورتی که در مدل خاک سخت‌شونده در نواحی دیواره گود رخ می‌دهد بطوریکه نتایج پایش نیز این موضوع را تایید می‌کند که جابجایی افقی حداکثر در عمق میانی گود رخ می‌دهد نه در کف گود.

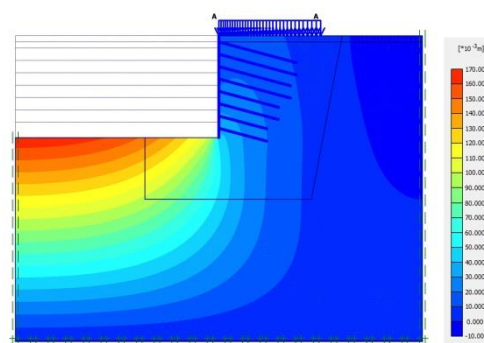
سخت‌شونده ۴۳ میلیمتر در عمق میانی گود و برای مدل رفتار موهرکولمب ۱۶۸ میلیمتر است در حالیکه نتایج پایش گود مقدار جابجایی افقی را ۳۱ میلیمتر نشان می‌دهد. در بررسی تاثیر دیگری از مدل رفتاری، شکل ۱۸ و ۱۹ بیانگر نحوه شدت، مقدار و توزیع تغییرشکل افقی اطراف گودبرداری در دو مدل رفتاری می‌باشد. همانگونه که قابل مشاهده است در مدل رفتاری سخت شونده، کانتورهای تغییرمکان پیزی شکل به دلیل قابل نظرگرفتن مدول الاستیسیته بارگذاری و باربرداری مجزا، قابل



Vertical displacements (U_y)

Extreme U_y $43.16 \cdot 10^{-3}$ m

ب: مدل رفتاری سخت شونده

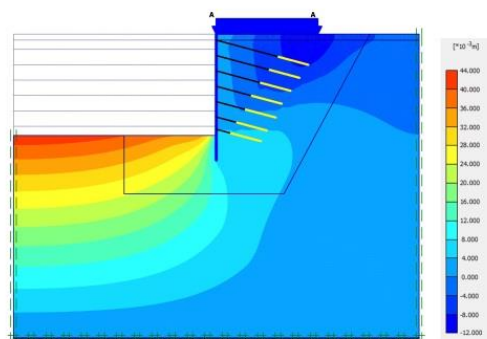


Vertical displacements (U_y)

Extreme U_y $168.48 \cdot 10^{-3}$ m

الف: مدل رفتاری موهر کولمب

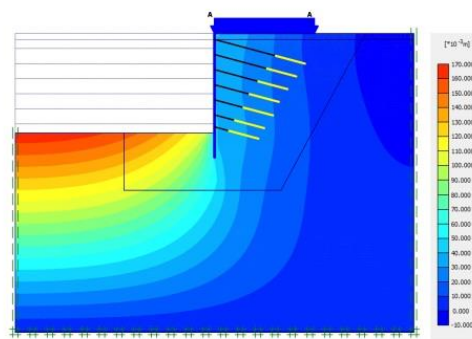
شکل ۱۴: تاثیر مدل رفتاری در تغییرشکل قائم و برآمدگی کف گود در روش میخکوبی



Vertical displacements (U_y)

Extreme U_y $43.36 \cdot 10^{-3}$ m

ب: مدل رفتاری سخت شونده

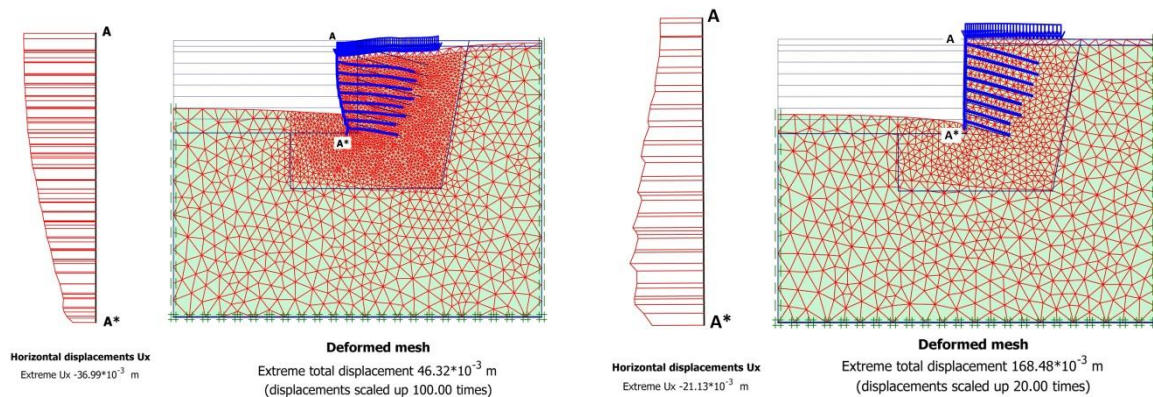


Vertical displacements (U_y)

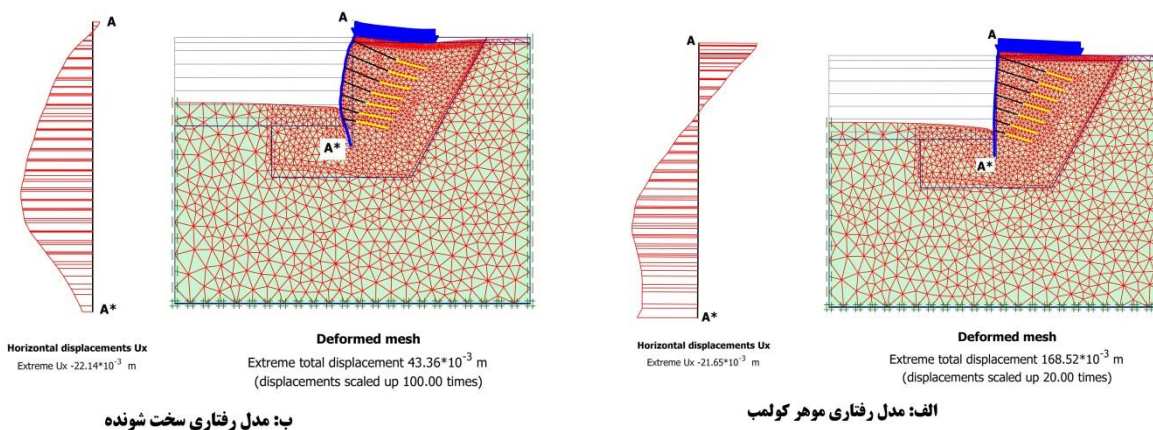
Extreme U_y $168.52 \cdot 10^{-3}$ m

الف: مدل رفتاری موهر کولمب

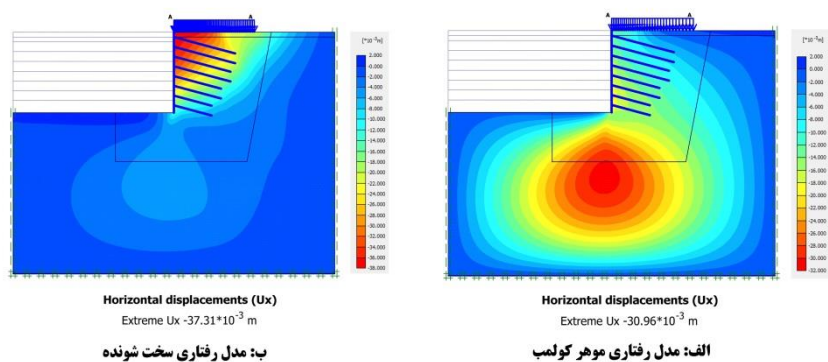
شکل ۱۵: تاثیر مدل رفتاری در تغییرشکل قائم و برآمدگی کف گود در روش دیوار برلنی



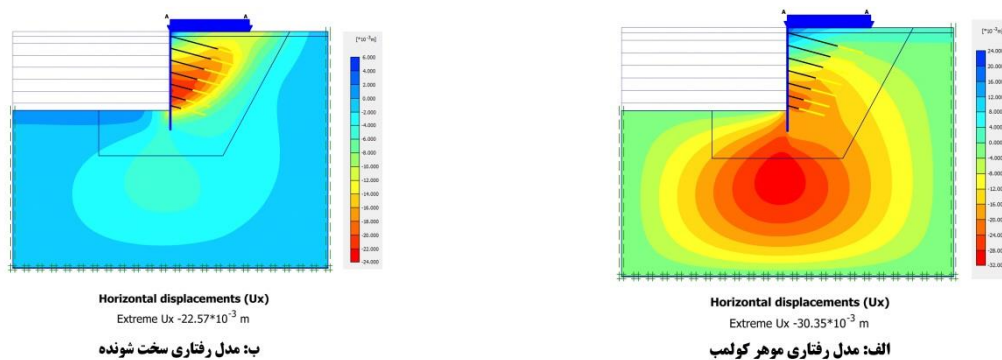
شکل ۱۶: تاثیر مدل رفتاری در تغییر شکل افقی دیواره گود در روش میخکوبی



شکل ۱۷: تاثیر مدل رفتاری در تغییر شکل افقی دیواره گود در روش دیوار برلنی



شکل ۱۸: تاثیر مدل رفتاری در مقدار و توزیع تغییر شکل افقی اطراف گود در روش میخکوبی



شکل ۱۹: تاثیر مدل رفتاری در مقدار و توزیع تغییر شکل افقی اطراف گود در روش دیوار برلنی

کولمب در گودبرداری‌های عمیق، الگوی مناسبی از روند کلی تغییر شکل دیواره ارائه نمی‌دهد و مقدار تورم بستر کف گود به دلیل عدم تفاوت در مدول الاستیسیته باربرداری و بارگذاری، بیشتر از حالت مدل رفتاری سخت شونده ارائه می‌دهد. همچنین در مدل رفتاری سخت شونده، مقدار جابه‌جایی افقی حداکثر بیش از مدل رفتاری موهر کولمب نشان داده می‌شود در حالیکه مقایسه نتایج تحلیل عددی با نتایج پایش گود این موضوع را تایید نمی‌کند. نتایج ارزیابی در این تحقیق نشان داد که محل و مقدار تغییر مکان افقی دیواره گود در حالت مدل رفتاری سخت شونده، با رفتار واقعی و نتایج پایش گود تطابق بهتری دارد.

۱۰- جمع بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق تاثیر مدل رفتاری بر رفتار گودبرداری‌های عمیق شهری و میزان نشست و تغییر مکان جداره و محیط اطراف مورد ارزیابی و قیاس قرار گرفته است. در این راستا مدل رفتاری موهر کولمب و مدل رفتاری سخت شونده در برآورد میزان تغییر شکل‌ها و قیاس آن با مقادیر اندازه‌گیری شده با ابزار دقیق، در یک گودبرداری عمیق به ارتفاع ۱۶/۵ متر در شهر تهران مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همچنین روش پایداری‌سازی مورد استفاده در این تحقیق، شامل روش "دیوار برلنی" و روش "میخکوبی" می‌باشند که در گودهای عمیق شهری جهت کاهش و کنترل تغییر شکل‌ها مورد استفاده زیادی می‌باشند. تحلیل المان محدود با استفاده از نرم افزار *Plaxis* نسخه ۸/۶ با هریک از این دو مدل خاک نشان داد که مدل رفتاری موهر

۱۱- منابع و مراجع

- [1] Simple prediction model for wall deflection caused by braced excavation in clays, *Computers and Geotechnics*, 63(1); 67-72.
- [8] Linlong Mu, Maosong Huang (2016). Small strain-based method for predicting three-dimensional soil displacements induced by braced excavation, *Tunneling and Underground Space Technology*, 52 (2); 12-22.
- [9] Schweiger, H. F. (2009) Influence of constitutive model and EC7 design approach in FE analysis of deep excavations, *ISSMGE International Seminar on Deep Excavations and Retaining Structures*, Budapest.
- [10] Smith, IM. And Su N. (1997), Three dimensional finite element analysis of nailed soil wall curved in plan, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 21(9); 583-595.
- [11] Zhang, M. and Song, E. and Chen, Z. (1999), Ground movement analysis of soil nailing construction by three-dimensional (3-D) finite element modeling (FEM), *Comput Geotech* 25(4):191-204
- [12] Fan, CC. and Luo, JH. (2008), Numerical study on the optimum layout of soil nailed slopes" *Journal of*
- [2] Hashash, Y. M. A. and Whittle, A. J. (1996), Ground movement prediction for deep excavations in soft clay, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 122(6); 474-486.
- [3] Mana, A. I. and Clough, G. W. (1981) Prediction of movements for braced cut in clay, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 107(8); 759-777.
- [4] Rampello, S., Tamagnini, C. and Calabresi, G. (1992), Observed and predicted response of a braced excavation in soft to medium clay, *Proceedings, Wroth Memorial Symposium ST Catherine; College, Oxford*, pp. 544-561.
- [5] Bose, S. K. and Som, N. N. (1998), Parametric study of a braced cut by finite element method, *Computers and Geotechnics*, 22 (2); 91-107.
- [6] Clough, G. W. and O'Rourke, T. D. (1990), Construction induced movements of in situ walls, *Proceedings, ASCE Specialty Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structures*, Cornell University, New York, pp. 439-470.
- [7] Wengang Z., Anthony T.C., Feng X. (2015). A

[17]Calvello, M. and Finno, RJ. (2004), Selecting parameters to optimize in model calibration by inverse analysis, *Journal of Computer Geotechniq*, 31(5); 411–425

[18]Geotechnical report and the supporting structure design, commercial building project, Dezh Ista Khak Co., Artesh Blvd., Tehran, Iran.

[19]Federal Highway Administration Report (FHWA-IF-99-015), GEOTECHNICAL ENGINEERING CIRCULAR NO.4, Ground Anchor and Anchored Systems.

[20]Schanz T, Vermeer. and PA, Bonnier PG. (1999), The hardening soil model, formulation and verification, *Proceedings of Plaxis Symposium on Beyond 2000 in Computational Geotechnics*, Amsterdam, Rotterdam, Balkema, pp. 281-296.

[21]Korff M (2009): “Deformations and damage to buildings adjacent to deep excavations in soft soils”. 1001307-004-GEO-0002, Version 02.

[۲۲] عشورزاده ی. و رستمی ق. "استفاده از روش ژئودتیک برای پایش و بررسی جابجایی افقی و قائم دیواره گودبرداری، نشریه علمی- ترویجی مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، صفحه ۹ الی ۱۸، دیماه ۹۴.

Computer Geotechniq 35(4); 585–599.

[13]Kim, JS. And Kim, JY. And Lee, SR. (1997), Analysis of soil nailed earth slope by discrete element method” *Journal of Computer Geotechniq*, 20(1); 1–14

[14]Sivakumar, Babu GL. And Murthy, BRS. And Srinivas, A. (2002), Analysis of construction factors influencing the behavior of soil nailed earth retaining walls, *journal of Ground Improvement* 6(3):137–143

[15]Brinkgreve, RBJ. And Bakker, KJ. And Bonnier, PG. (2006), The relevance of small-strain soil stiffness in numerical simulation of excavation and tunneling projects, *Proceedings of 6th European Conference in Geotechnical Engineering*, Graz, Austria, pp. 133–139

[16]Benz, T. (2007), small-strain stiffness of soils and its numerical consequences, PhD Thesis, University of Stuttgart, Germany.

The Effect of Soil Constitutive Model on the Stability Analysis and the Behavior of Deep Urban Excavations

1st. Saeed Ghaffarpour Jahromi¹; 2nd. Hesamoddin Ataeeian Dehkordi²

1- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University

2- M.Sc. Graduated Student, Shahid Rajaee Teacher Training University

Received: 01Jun 2012; Accepted: 01Aug 2012

Keywords

Excavation
Hardening Soil Model
Mohr-Coulomb Model
Monitoring, Stability Analysis
Deformation Analysis

Final English Extended Abstract

Nowadays, excavation is considered as one of the sensitive and important steps of urban construction that engineers are always attempting to analyze, design, and construct it by selecting various methods. The importance of this subject is conspicuous when the analysis of displacement and deformations around the excavation is necessary according to the national building regulation due to the presence of buildings in this area, which are of high sensitivity to asymmetric settlement. Therefore, in addition to the stability analysis of excavation, engineers are also dealing with the assessment and prediction of deformations and displacements of its surrounding by using geotechnical site specifications, excavation

geometry, surrounding overloads, and simulating the excavations stages. The analysis of displacement and deformation is highly dependent to the soil constitutive model and the use of an appropriate model that imitates the actual behavior of the soil, is of a significant importance in the simulation of soil behavior in numerical software. In the present study, a comparison is conducted between the results obtained from hardening-soil and Mohr-Coulomb constitutive models for a case study of 16.5-m-deep excavation in Tehran city with the numerical method of finite element analysis. The results show that the soil behavior and the excavation operations induced displacements are more similar to the reality if the hardening-soil constitutive model is selected compared to the Mohr-Coulomb constitutive model.

Summary

Introduction

Methodology and Approaches

Results and Conclusions
