

مدلسازی سازه نگهبان براساس مشخصات خاک و ملاحظات اقتصادی بهینه در نرم افزار پلکسیس

عرفان رشیدپور^{۱*}، مرتضی باباگلی^۲

۱- کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قائمشهر، Erfan.rashidpour@gmail.com

۲- کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، morteza_babagoli@stumail.nit.ac.ir

خلاصه

پروژه‌های عمرانی به‌طور روزافزون در مواجهه با مسائل ژئوتکنیکی، نظیر احداث شیب‌های مصنوعی و پایدارسازی شیروانی‌های طبیعی، گودبرداری‌ها، حفاری و ترانشه زنی بوده و نیازمند حائل‌سازی مناسب و افزایش ایمنی برای گودبرداری جهت جلوگیری از صدمات جانبی و مالی و باقی ماندن سازه‌های مجاور در شرایط مطلوب می‌باشد. انتخاب روش مناسب پایدارسازی که بتواند پاسخگوی نیازهای موارد اجرایی و الزامات مقررات قانونی باشد یک نیاز اولیه برای اکثر پروژه‌ها (خصوصاً در مناطق شهری) می‌باشد. این انتخاب اولیه و اجرایی و تأثیر غیرقابل‌انکاری در ایمنی، کیفیت اجرا، هزینه تمام‌شده و برنامه زمان‌بندی کل پروژه را داشته و از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این پژوهش طرح نوع سازه نگهبانی که با توجه به مشخصات خاک و ملاحظات اقتصادی بهینه بود با استفاده از نرم‌افزار پلکسیس انتخاب شد. بدیهی است که انتخاب روش مناسب با توجه به نوع خاک و اهمیت کار، مسئولیت مهندس طراح می‌باشد که بهترین روش اجرایی که رضایتمندتر و اقتصادی‌تر باشد انتخاب نماید.

کلمات کلیدی: گودبرداری، سازه نگهبان، ضریب اطمینان، تنش-کرنش، نرم افزار پلکسیس

۱. مقدمه

یکی از مسائل مهم و مطرح در مهندسی ژئوتکنیک، مسئله پایداری جداره‌های محل گودبرداری شده می‌باشد. این پایدارسازی در برخی پروژه‌های عمرانی به‌قدری مهم و حیاتی می‌شوند که حتی ممکن است موجب کند شدن روند اجرای پروژه گردد. گودبرداری زمانی انجام می‌شود که باید تمام یا قسمتی از ساختمان پایین‌تر از سطح طبیعی زمین احداث شود که گاهی ممکن است عمق گودبرداری بنا بر جنس زمین به چندین متر برسد. گودبرداری به دو روش انجام می‌شود [1]. برای احداث بسیاری از پروژه‌های عمرانی نیاز به ایجاد شیب‌های مصنوعی و اقداماتی از این قبیل گودبرداری، حفاری، ترانشه زنی، خاک‌ریزی می‌باشد. برای جلوگیری از بروز هر نوع حادثه و ایجاد صدمه در سازه‌های احداث یا تأسیسات مجاور و باقی ماندن آن‌ها در شرایط مطلوب خدمت در کوتاه‌مدت و درازمدت؛ می‌بایست از پایداری و ایمنی شیب‌ها، گودها، ترانشه‌ها و خاکریزها اطمینان حاصل نمود تا از بروز لغزش، رانش و سقوط توده‌های خاک و سنگ، فرسایش، خزش و تغییر شکل‌هایی که منجر به لطمات فوق می‌شود ممانعت به عمل آید [2].



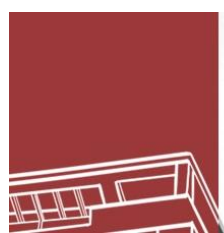
در بسیاری از پروژه‌های ساختمانی لازم است که زمین به‌صورتی خاک‌برداری شود که جداره‌های آن قائم یا نزدیک به قائم باشد. این کار ممکن است به منظور احداث زیرزمین، کانال، منبع آب و غیره صورت گیرد. فشار جانبی وارد بر این جداره‌ها ناشی از رانش خاک بر اثر وزن خود آن و نیز سربارهای احتمالی روی خاک کنار گود می‌باشد. این سربارها می‌توانند شامل خاک بالاتر از تراز افقی در لبه‌ی گود، ساختمان مجاور، بارهای ناشی از بهره‌برداری از معابر مجاور و غیره باشند. به‌منظور جلوگیری از ریزش ترانشه و تبعات منفی احتمالی ناشی از این خاک‌برداری، سازه‌های موقتی را برای مهار ترانشه اجرا می‌کنند که به آن سازه‌های نگهدارنده می‌گویند [3].

به‌طور معمول اجرای شیب ملایم‌تر (با زاویه کمتر نسبت به افق) پایداری بیشتری را به لحاظ لغزش، رانش و سقوط مصالح به دنبال دارد اما لزوماً راه‌حل بهینه و اقتصادی نمی‌باشد؛ افزون بر آن در اغلب ساخت‌وسازها (خصوصاً در مناطق شهری) کمبود و محدودیت زمین، ایجاد شیروانی و گودبرداری با شیب ملایم را تقریباً ناممکن می‌سازد. استفاده از سازه نگهدارنده بیرونی نظیر دیوارهای حائل، سپرکوبی و غیره به‌طور کلی شامل به‌کارگیری مصالح مقاوم‌تر در مقابل جبهه خاک مورد نگهداری می‌باشد.

روش مناسب گودبرداری با توجه به نوع خاک، سطح آب زیرزمینی، عمق گود و موقعیت و شرایط مجاورین و الزامات قانونی ساختگاه و بخصوص اصل تأمین کاملی ایمنی مجاورین و بخصوص انسان‌ها، هزینه‌های پایدارسازی (هزینه‌های اولیه، هزینه‌های اجرایی، هزینه‌های جمع‌آوری سازه موقت)، هزینه‌های ناشی از خرابی (گسیختگی و یا تغییر شکل) و محدودیت‌های اجرایی انتخاب می‌گردد. در گودبرداری‌هایی که به دلایل فنی و یا حقوقی امکان ایجاد یک دیواره در جناحین ساختگاه بدون تأمین تکیه‌گاه مناسب برای آن وجود ندارد و نمی‌توان انتظار داشت که دیواره خود ایستا باشد، پایدارسازی جداره گودبرداری از داخل ساختگاه اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. روش‌های مهار روبرو، خرپا، دیافراگم و اجرای شمع درجا از روش‌های تأمین پایداری از داخل گود می‌باشند. در مواردی که محدود کردن تغییرشکل‌های افقی در جداره گودبرداری ضروری است، مناسب‌ترین روش برای گودبرداری‌های کم‌عرض، روش مهار روبرو و در سایر موارد روش خرپا و یا روش‌های تلفیقی می‌باشد [3].

همچنین از جمله مسائل مهمی که در گودبرداری به آن برمی‌خوریم، حفاظت و نگهداری شیب‌ها و شیروانی‌های جانبی با دیواره‌های ترانشه‌های محیطی گودها، به ویژه گودهای عمیق و عریض است. در خاک‌برداری‌های وسیع، که لازم است حجم عظیمی از خاک برداشته شود، استفاده از مهاربندی عرضی در جهت عمود بر دیواره معمولاً غیراقتصادی و در بسیاری از موارد نیز عملاً غیر اجرایی است. در گودبرداری‌های کوچک‌تر، مقایسه بین استفاده از مهاربندی عرضی یا اجرای دیواره گود به‌صورت شیب‌دار و انتخاب یکی از این دو گزینه بستگی به میزان فضای قابل دسترسی و نیز ملاحظات اقتصادی دارد. گودبرداری‌های بازو عریض ممکن است برای استفاده دائم و یا به‌عنوان بخشی از کارهای اجرایی موقت لازم باشند. نکته قابل توجه آن است که گودبرداری و مسائل مربوط به آن، یکی از مسائل مهندسی عمران است و نباید از ضوابط ویژه سایر شاخه‌ها، نظیر استخراج معادن و نظایر آن، بدون در نظر گرفتن ملاحظات مهندسی عمران، در این خصوص استفاده شود [4]. طبق تحقیقات انجام‌شده، میانگین مقاومت رس‌ها در سطح گسیختگی آن‌ها، در حدود ۵۰ تا ۱۰۰ درصد مقاومت برشی زهکشی نشده نمونه‌های به قطر ۳۸ میلی‌متر خاک‌های مزبور است. پایداری کوتاه‌مدت شیروانی‌های خاک‌های رس پیش تحکیم یافته، عملاً به اقدامات احتیاطی‌ای بستگی دارد که به‌منظور جلوگیری از جریان یافتن آب زیرزمینی در شیب، ناشی از لایه‌های تراوای بالای خاک رس یا ناشی از بارش باران بر روی شیب، صورت می‌گیرد. تأثیرات مخرب تورم این‌گونه خاک‌های رس بر روی پایداری آن‌ها بر اثر آزاد شدن فشار ناشی از سربار خاک، دلایل کافی برای اتخاذ روش‌های حفاظتی خاک را به دست می‌دهند. روش‌های ساده‌ای نظیر پوشاندن خاک با ورق‌های پلی‌اتیلن یا پوشیدن بتن ضعیف بر روی سطح شیب‌دار خاک از جمله روش‌هایی هستند که هم سودمند و هم اقتصادی‌اند [5].

خاک معمولاً مقاومت فشاری نسبتاً بالا و مقاومت کششی و برشی پایینی دارد. می‌خکوبی، خاک را مسلح نموده و بنابراین مقاومت کششی و برشی آن را افزایش می‌دهد. مجموعه حاصل از این روش مانند یک دیوار حائل وزنی عمل کرده می‌تواند به‌عنوان یک سازه باربر عمل نماید. احداث خاک می‌خکوبی شده شامل مسلح کردن خاک در حین انجام عملیات



حفاری و گودبرداری، به وسیله یک سری میله می باشد که میخ نامیده می شوند. میخ ها ذاتاً در کشش کار کرده، غالباً به موازات یکدیگر بوده و شیب کمی به پائین دارند [6].

اجرای میخکوبی از لحاظ فنی مطلوب و از لحاظ اجرایی آسان بوده که به طبع صرفه اقتصادی را به همراه دارد. شایان ذکر است اگرچه در اجرای میخ برخورد با قلوه یا تخته سنگ حفاری را دچار اشکال می نماید و ناچار خواهیم بود محل اجرای میخ یا زاویه آن را تغییر دهیم اما به دلیل سهولت این تغییرات و عدم تأثیر آن در کل سیستم میخکوبی این وفق پذیری از مزایای میخکوبی نسبت به سایر حائل های نیازمند حفاری یا گوبیش می باشد. چراکه در سایر حائل ها چه در حفاری عمودی نظیر شمع درجا و چه حفاری افقی نظیر زمین مهار، حفظ امتداد محل های حفاری و مکان دقیق آن ها از الزامات طرح می باشد و به سادگی و بدون بررسی های طراح مقدور نخواهد بود. دیده شده میخکوبی در انواع ساختگاه با شیب های ۳۰-۹۰ درجه و ارتفاع ۶-۲۰ متر اجرا شده، توانایی مطابقت با انواع هندسه مورد نیاز نظیر دیوار پلکانی، دیوار قوسی و تغییر شیب در دامنه شیروانی را دارد [7].

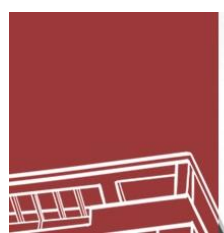
از سوی دیگر عموماً تحلیل سازه های نگهبان به دلیل وجود لایه های مختلف خاک نسبت به عمق خاک برداری و رفتار متفاوت آن ها در ایجاد تنش های اولیه کاری دشوار است. روش اجزاء محدود به دلیل توانایی های چشمگیری که در مدل سازی شرایط مختلف فیزیکی محیط را دارد از برتری بیشتری برخوردار است. از جمله این توانایی ها امکان بررسی اثر تنش های اولیه، بررسی واقع تر اصطکاک خاک و دیوار، بررسی اثر نوسان سطح آب و استفاده از منحنی تنش کرنش غیرخطی خاک در تجزیه و تحلیل دیوار می باشد [8].

فشار جانبی وارد بر جداره در پروفیل عمقی، ناشی از رانش خاک بر اثر وزن خود و همچنین سربارهای احتمالی می باشد. این فشار در سه حالت محرک، مقاوم و سکون مورد بررسی قرار می گیرد. با توجه به محدودیت های مناطق شهری در برخی موارد لازم است خاک برداری به صورت قائم و بدون شیب اجرا گردد که ناپایداری خاصی در شرایط محیط ایجاد خواهد نمود [9].

به طور کلی باید گفت احداث سازه های زیرزمینی و پی سازی ساختمان های بلند در بافت موجود شهرهای بزرگ مخصوصاً در مواردی که محدودیت زمین وجود دارد بعضاً نیاز به گودبرداری عمیق با دیوارهای قائم دارد. پایداری خاک پشت این دیوارها به عنوان یکی از مسائل مهم در مهندسی عمران مطرح می باشد. تحقیقات مختلفی در این زمینه انجام شده که منجر به ارائه روش های اجرایی متفاوتی از احداث سازه های نگهبان گردیده است. در حال حاضر نرم افزارهای تخصصی و رایانه ای پیشرفته با قدرت محاسباتی بالا برای بررسی پایداری جداره های گود وجود دارد و یکی از راه های آسان حل مسائل، استفاده از برنامه ای است که دارای امکان شبیه سازی و ارائه نتایج مناسب در زمینه ژئوتکنیک می باشد. بنابراین سعی می شود از نرم افزارهایی که امکان مدل سازی با درصد خطای قابل قبولی هستند استفاده شود.

۲. روش مدل سازی عددی

روش های عددی در دهه های گذشته توسعه زیادی پیدا کرده اند. این روش ها به واسطه پیشرفت سریع فن آوری کامپیوتری و قابلیت دسترسی به آن، در مهندسی عمومیت یافته اند. در این پژوهش از روش المان محدود استفاده شد. روش المان محدود یکی از پرکاربردترین روش های عددی در زمینه مهندسی است، که اولین بار به وسیله Terner و همکارانش (۱۹۵۶) برای استفاده در تحلیل ساختمان ارائه شد. در این روش، هندسه مسئله به یک سری المان تقسیم می شود که در نقاط گرهی با یکدیگر ارتباط دارند و روابط تنش-کرنش به وسیله معادلات مناسب مشخص می شوند. تنش، کرنش و تغییر شکل پذیری را می توان با تغییر در شرایط مسئله (برای مثال حفاری) تحلیل کرد. انعطاف پذیری زیاد این روش در



مدل‌سازی‌ها، اعمال شرایط مرزی متنوع و همچنین توسعه کدهای تجاری توانمند باعث شده است که این روش، یکی از پرکاربردترین روش‌های عددی باشد. از میان نرم‌افزارهایی که با این روش قادر به حل مسائل ژئوتکنیکی هستند می‌توان به PLAXIS اشاره کرد.

۳. نرم‌افزار پلکسیس

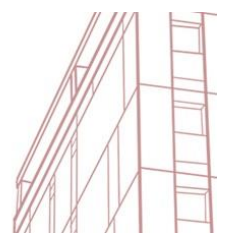
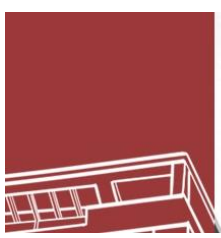
پلکسیس نرم‌افزاری المان محدود و پیشرفته برای تحلیل تغییر شکل‌ها و پایداری می‌باشد و در پروژه‌های مهندسی ژئوتکنیک کاربرد دارد. معمولاً در مسائل مهم ژئوتکنیک، یک مدل رفتاری پیشرفته برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی و وابسته به زمان خاک‌ها بسته به هدف مورد نظر، لازم است. با این نرم‌افزار می‌توان خاک‌برداری و خاکریزی مرحله‌ای با شرایط بارگذاری و شرایط مرزی مختلف را مدل‌سازی نمود. در این نرم‌افزار مدل‌های رفتاری موهرکولمب، مدل سخت‌شوندگی هذلولی، مدل نرم‌شوندگی (مدل Cam-Clay) و مدل نرم‌شوندگی خزشی قابل به‌کارگیری است. همچنین با این نرم‌افزار می‌توان فرایند ساخت و حفاری را توسط فعال کردن و غیرفعال کردن المان‌ها در مرحله محاسبات مدل کرد. نمونه‌ای از کاربرد این قابلیت، انجام آنالیز لایه به لایه در پایداری شیب‌ها، سدها و تونل‌ها می‌باشد. پلکسیس از جمله بسته‌های نرم‌افزاری است که به‌منظور آنالیز تغییر شکل‌ها و نیز پایداری سازه‌های خاکی با استفاده از روش المان‌های محدود تهیه و به بازار ارائه شده است. با این تفصیل که مسائل مربوط به ژئوتکنیک نیاز به مدل‌های پیشرفته‌تری برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی و تابع زمان خاک‌ها دارد، چراکه خاک‌ها تحت شرایط مختلفی نظیر بارگذاری و شرایط هیدرولیکی در محیط خاک، رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهند به همین منظور این نرم‌افزار برای تحلیل دقیق‌تر رفتار خاک از مدل‌های پیشرفته‌تری نظیر (S.S.C)، (H.S) و غیره استفاده می‌کند.

۴. معرفی پروژه

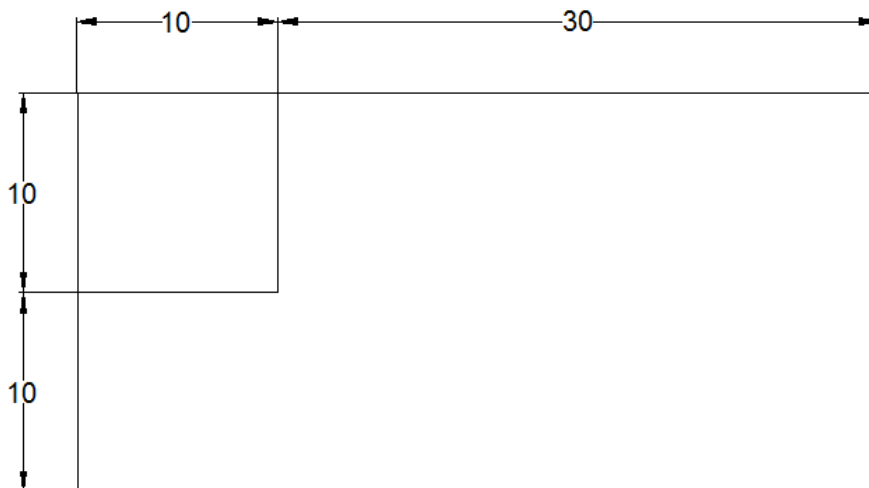
پروژه موردنظر، احداث مجتمع تجاری- مسکونی هشت طبقه (دوطبقه زیرزمین+همکف+پنج طبقه روی همکف) به مساحت زمین حدود ۲۰۰۰ مترمربع و به مساحت بنای ۱۳۵۰ مترمربع در هر طبقه (حدود ده هزار مترمربع بنای کل) و در اهواز می‌باشد. در ضلع شمالی ملک موردنظر دیوار ساختمان مجاور با حدود شش متر فاصله قرار گرفته و از ضلع شرقی نیز مجاور زمین خالی می‌باشد. با شناسایی و بررسی لایه‌های خاک در محل احداث پروژه موردنظر، مشخص شد که خاک پروژه از نوع ریزدانه رسی سیلتی CL-ML با مشخصات مطابق جدول ۱ است. مدل رفتاری در نظر گرفته شده برای مطالعه مدل خاک سخت‌شونده می‌باشد. هندسه گودی که پایداری آن بررسی شد به صورت شکل ۱ است که ارتفاع کل مدل ۲۰ متر و ارتفاع گودبرداری ۱۰ متر است. طول کل مدل ۴۰ متر و طول گودبرداری ۱۰ متر می‌باشد.

جدول ۱- خصوصیات مصالح خاکی

پارامتر	مقدار
---------	-------



17	$(kN / m^3) \gamma_{dry}$
19	$(kN / m^3) \gamma_{sat}$
45	چسبندگی $(kN / m^2) C$
20	زاویه اصطکاک ϕ (°)
0	زاویه اتساع ψ (°)
8	$(MPa) E_{50}$
8	$(MPa) E_{oed}$
24	$(MPa) E_{ur}$
0.35	ضریب پواسون U



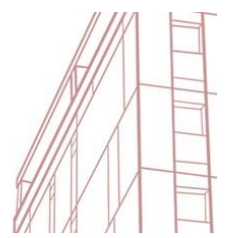
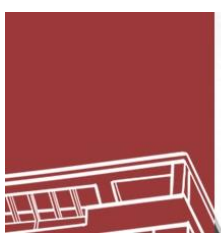
شکل ۱- هندسه گود مورد مطالعه

فرضیات تحقیق عبارت‌اند از:

- سطح زمین اطراف مسطح می‌باشد و تأثیر شیب بر رفتار سازه‌های نگهبان مورد بررسی قرار نمی‌گیرد.
- خاک به صورت همگن و هموزن فرض می‌شود.
- بارگذاری‌ها به صورت استاتیکی می‌باشد و تأثیر بارگذاری تکراری و دینامیکی بر رفتار سازه‌ها بررسی نمی‌شود.

۵. پایدارسازی گود با استفاده از میخکوبی

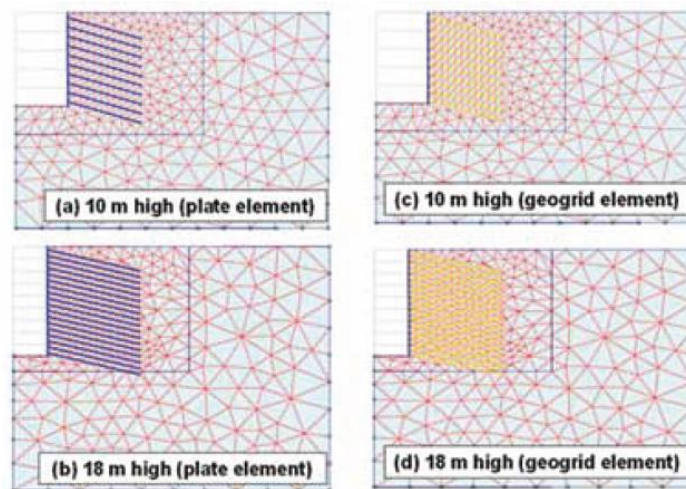
در مواردی که شرایط هندسه و خاک ساختگاه امکان اجرای شیروانی موقت تا زمان اجرای حائل‌های با روش ساخت از پایین به بالا را نمی‌دهد. خصوصاً در مناطق شهری که فضای لازم برای لحاظ شیروانی موقت وجود ندارد و پایداری شیروانی موقت دچار اشکال می‌شود، عملاً حائل‌های با روش ساخت از پایین به بالا به ناچار کنار گذاشته می‌شوند و گزینه‌های حائل



سازی محدود به روش ساخت از بالا به پایین می‌شود. همچنین میخکوبی عملیات خاکی اضافی برای اجرای شیروانی موقت (نظیر آنچه برای خاک مسلح لازم است) را حذف کرده و خود می‌تواند در احداث شیروانی موقت مورد نیاز روش‌های از پایین به بالا کمک نمایند. پایداری گود مورد مطالعه با استفاده از سیستم میخکوبی ارائه شده است [10].

۶. صحت‌سنجی مدل

در این تحقیق به منظور صحت‌سنجی از نتایج کار بابو و سینگ (۲۰۰۹) استفاده شده است. آن‌ها در این مطالعه به بررسی و مقایسه رفتار المان تیر و ژئوگرید موجود در برنامه پلکسیس به‌عنوان میخکوبی برای مهار یک گود ۱۰ متری و ۱۸ متری پرداخته‌اند. هندسه مدل آن‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. برای صحت‌سنجی مدل گود ۱۰ متری میخکوبی شده با المان ژئوگرید انتخاب شده است. برای گود ۱۰ متری عرض مدل ۳۵ متر و ارتفاع آن ۳۰ متر است. مدل به‌صورت دو بعدی و کرنش مسطح ساخته شده است [11].

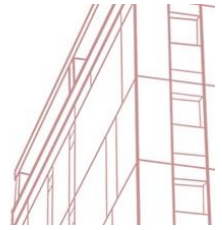
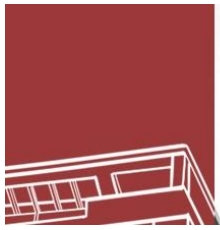


شکل ۲- هندسه مدل بابو و سینگ (۲۰۰۹) [11]

خصوصیات مصالح خاکی در جدول ۲ آورده شده است. مدل رفتاری خاک، موهر کولمب بوده و خاک ماسه‌ای است. در جدول ۳ خصوصیات مصالح میخکوبی شده آورده شده است. فاصله میخکوبی‌ها از هم به‌صورت افقی و قائم 1×1 متر است که نسبت به افق زاویه ۱۰ درجه دارند. ضخامت شاتکریت نیز برابر ۲۰۰ میلی‌متر داده شده است.

جدول ۲- خصوصیات مصالح خاکی بابو و سینگ (۲۰۰۹)

پارامتر	مقدار



17	$(kN/m^3) \gamma_{dry}$
4	چسبندگی $(kN/m^2) C$
31.5	زاویه اصطکاک $(^\circ) \varphi$
0	زاویه اتساع $(^\circ) \psi$
20	مدول الاستیسیته $(MPa) E$
0.3	ضریب پواسون ν

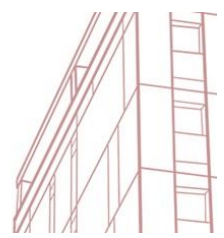
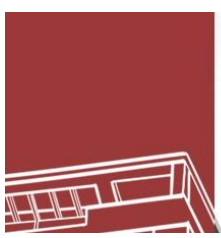
جدول ۳- خصوصیات سیستم نیلینگ

مقدار	پارامتر
الاستیک	مدل رفتاری
415	مقاومت تسلیم مسلح‌کننده، $(MPa) f_y$
200	مدول الاستیسیته مسلح‌کننده، $(GPa) E_n$
22	مدول الاستیسیته دوغاب، $(GPa) E_g$
20	قطر مسلح‌کننده $(mm) d$
100	قطر سوراخ، $(mm) D_{DH}$
7	طول میخکوبی (m)

۷. نتایج

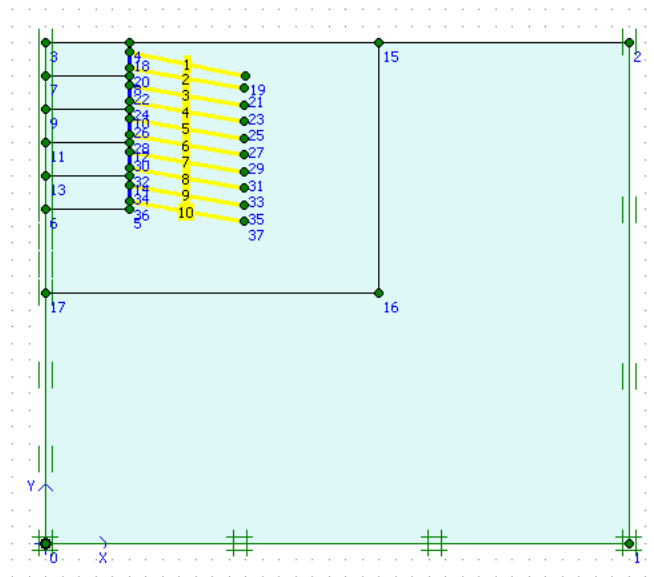
روند مدل‌سازی

به‌منظور مدل‌سازی ابتدا باید تنظیمات مربوط به واحدها و ابعاد مدل انجام گردد. که از طریق پنجره General settings انجام می‌شود. پس از انجام تنظیمات اولیه هندسه مدل ترسیم می‌گردد، که در شکل ۳ نشان داده شده است.



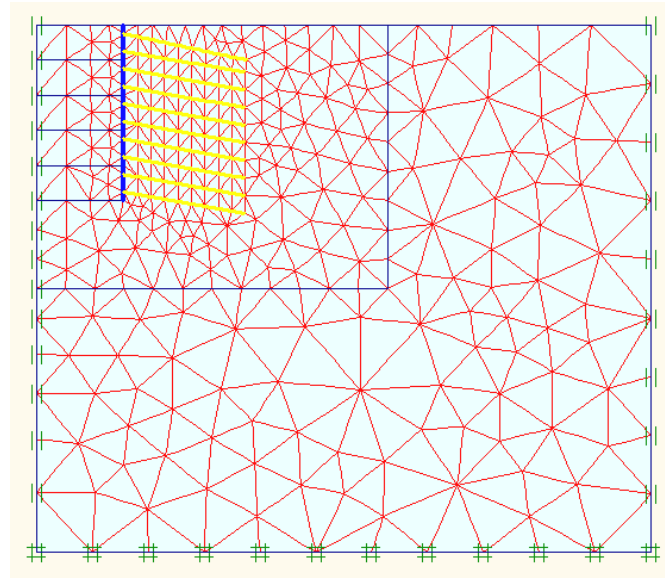
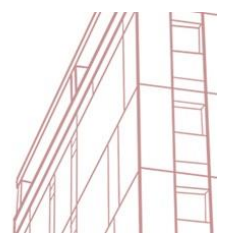
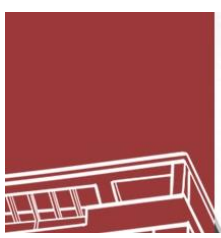
خطوط ترسیم‌شده در محل گودبرداری، مراحل خاک‌برداری را نشان می‌دهد که در ۵ مرحله و در هر مرحله یک لایه ۲ متری خاک‌برداری شده و دو ردیف نیلینگ اجرا خواهد شد. خطوط مربوط به نقاط ۱۵، ۱۶ و ۱۷ نیز برای جدا کردن مش‌بندی ترسیم شده است. برای ناحیه نزدیک به گودبرداری به دلیل حساسیت نتایج و دقت در آن از مش‌های ریزتر استفاده خواهد شد. شرایط مرزی مدل نیز شرایط استاندارد تعریف شده است که در آن کف مدل در دو جهت افقی و قائم بسته‌شده و مرزهای کناری فقط در جهت افقی بسته می‌شود و امکان جابجایی در جهت قائم وجود دارد که متناسب با نوع مسئله است.

خصوصیات مصالح نیز مطابق جدول ۱ و ۳ و همچنین توضیحات ارائه شده در نرم‌افزار وارد شده است. برای مدل‌سازی میخکوبی از المان ژئوگرید و برای مدل‌سازی شاتکریت از المان تیر استفاده شده است. مشخصات بتن در مقاله بابو و سینگ (۲۰۰۹) ارائه نشده بود که وزن مخصوص آن 24 kN/m^3 و مقدار ضریب پواسون آن 0.15 فرض شد [11].



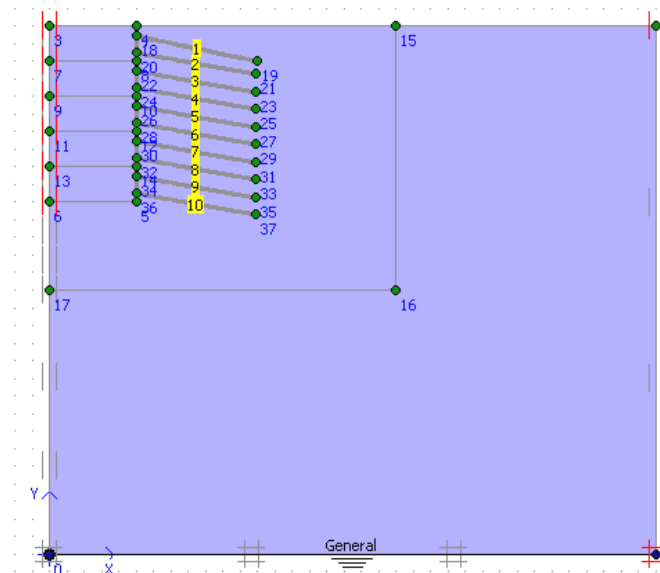
شکل ۳- هندسه مدل در نرم‌افزار پلکسیس

در شکل ۴ مش‌بندی مدل نشان داده شده است. برای مقایسه نتایج با بابو و سینگ (۲۰۰۹) مش‌بندی مدل مطابق گفته آن‌ها انجام شد. در پلکسیس مش‌بندی به صورت مثلثی و اندازه آن‌ها به صورت کیفی، خیلی درشت، درشت، متوسط، ریز و خیلی ریز، تعیین می‌گردد که در این مسئله مش‌بندی کل هندسه متوسط انتخاب شده و ناحیه نزدیک به گودبرداری با یک درجه کاهش ریز اعمال می‌گردد که چنانچه قبلاً نیز بیان شد به دلیل تغییرات زیاد تنش و کرنش در این ناحیه و حصول نتایج دقیق‌تر است [11].



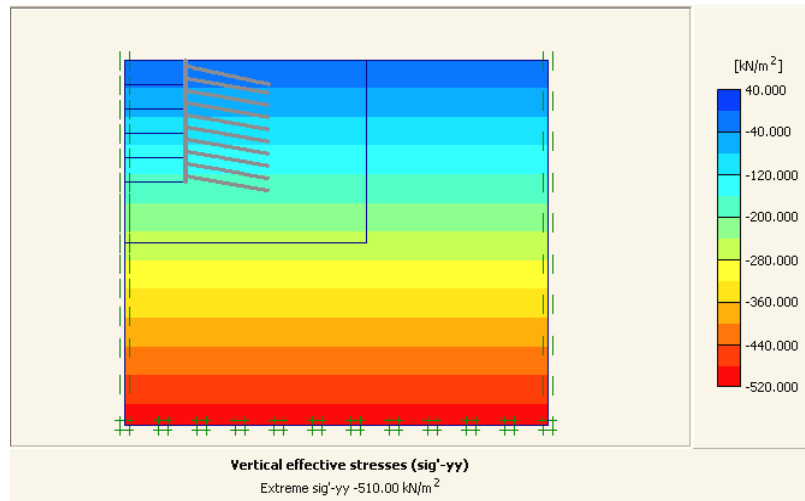
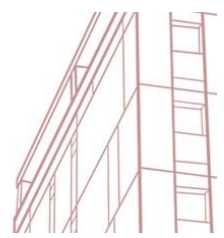
شکل ۴- مش بندی مدل

پس از رسم هندسه و اختصاص مصالح، شرایط اولیه به مدل اعمال می‌گردد، شرایط اولیه شامل شرایط هیدرولیکی اولیه و شرایط تنش اولیه است. به دلیل خشک بودن مدل شرایط هیدرولیکی در آن وجود نخواهد داشت و مطابق شکل ۵ سطح آب زیرزمینی در کف مدل اعمال خواهد شد.

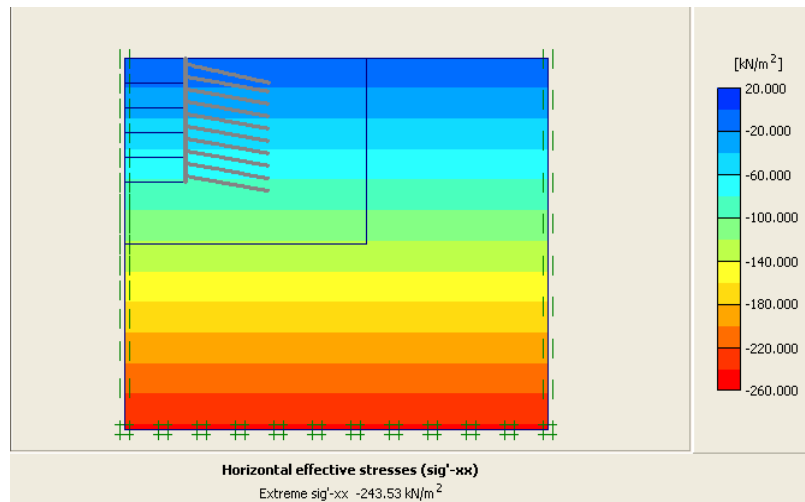


شکل ۵- اعمال شرایط اولیه هیدرولیکی

شرایط اولیه تنش قائم براساس وزن توده خاک بالای هر نقطه محاسبه شده و تنش افقی نیز از ضرب ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون به تنش قائم به دست می‌آید. ضریب فشار جانبی خاک نیز براساس فرمول جکی، $K_0 = 1 - \sin \varphi$ محاسبه می‌شود. در شکل ۶ (الف) کانتور تنش قائم و در شکل ۶ (ب) کانتور تنش افقی اولیه نشان داده شده است.



الف

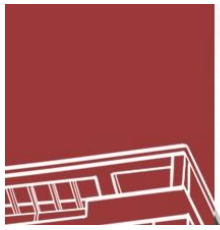


ب

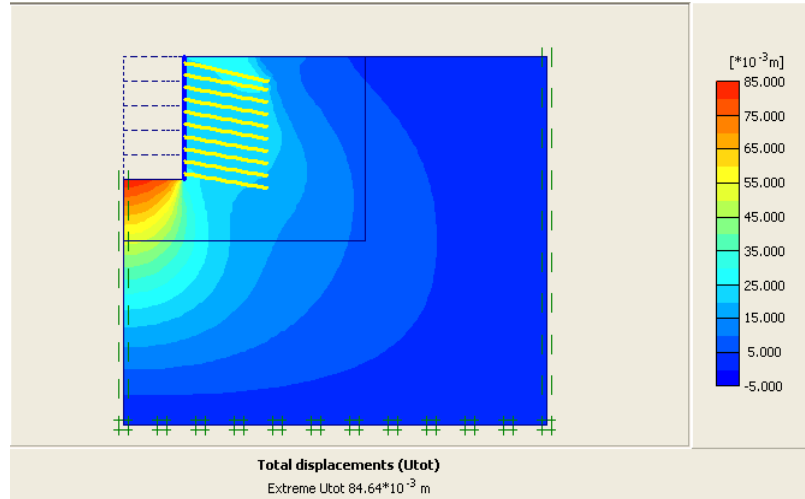
شکل ۶- الف) کانتور تنش قائم اولیه، ب) کانتور تنش افقی اولیه

پس از اعمال شرایط اولیه، مراحل تحلیل بایستی مشخص شود. در این مسئله ۵ مرحله خاک‌برداری وجود خواهد داشت که در هر مرحله دو متر از خاک محل گودبرداری غیرفعال شده و شاکریت مربوط به همان زون همراه با دو ردیف نیلینگ فعال خواهد شد. یک مرحله نیز برای محاسبه ضریب اطمینان پایداری گود وجود خواهد داشت که در مجموع مدل در ۶ مرحله مورد تحلیل قرار خواهد گرفت. پس از تحلیل نتایج به صورت کانتورهای تنش، کرنش، نمودار، جدول و غیره قابل حصول است.

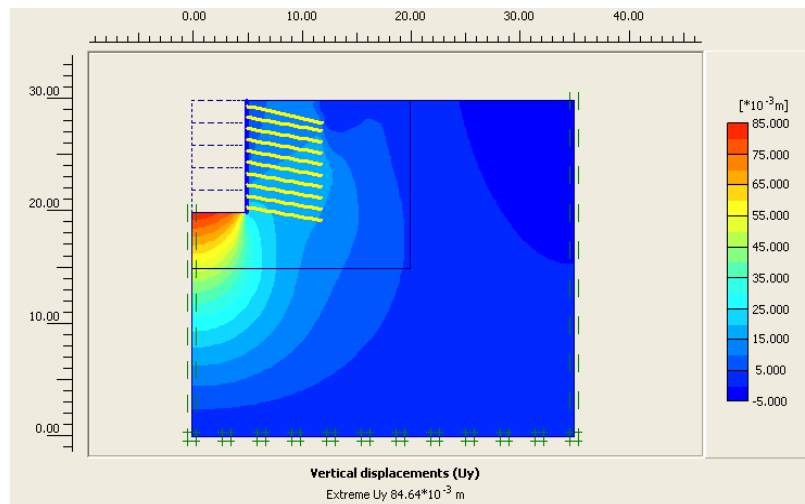
در شکل ۷ الف) کانتور جابجایی کل، در پایان مرحله گودبرداری نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بیشترین جابجایی مربوط به کف گود است و دلیل آن نیز مربوط به مدل رفتاری خاک است. در مدل رفتاری موهركولمب شیب بارگذاری و باربرداری در نمودار تنش-کرنش یکسان می‌باشد که در عمل برای یک خاک چنین رفتاری درست نیست و در نتیجه در مسائلی که در آن باربرداری وجود دارد یک بالازدگی کاذب بوجود می‌آید که در شکل ۷ ب) به صورت واضح دیده می‌شود که عملاً صحیح نمی‌باشد. طبق توصیه افراد متخصص در زمینه مدل‌سازی عددی، در چنین مواردی بایستی از مدل‌های رفتاری پیشرفته‌تر، همچون مدل سخت‌شونده استفاده کرد. در اینجا چون هدف صحت‌سنجی و مقایسه نتایج



بود از مدل رفتاری موجود در مقاله استفاده شده است. بیشترین جابجایی کل ۸۵ میلی‌متر و بیشترین جابجایی قائم نیز ۸۵ میلی‌متر است که هر دو اعداد مربوط به بالازدگی هستند.



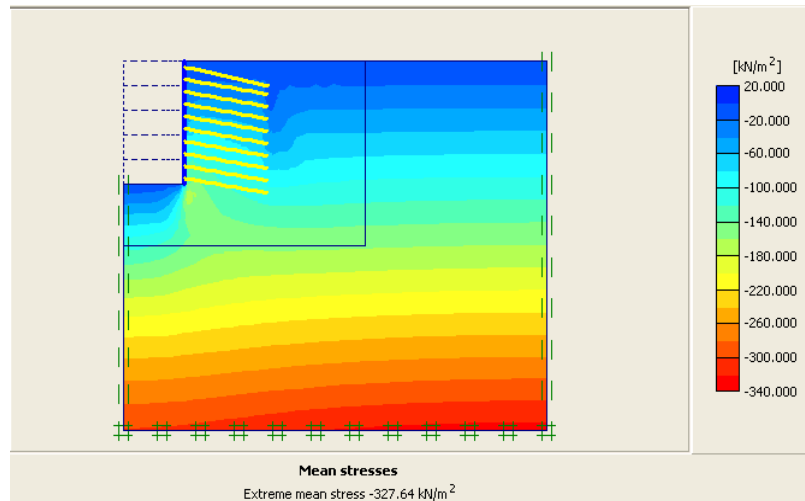
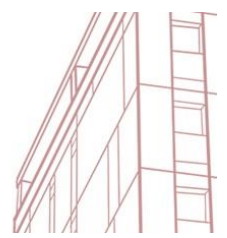
الف



ب

شکل ۷- الف) کانتور جابجایی کل، ب) کانتور جابجایی قائم

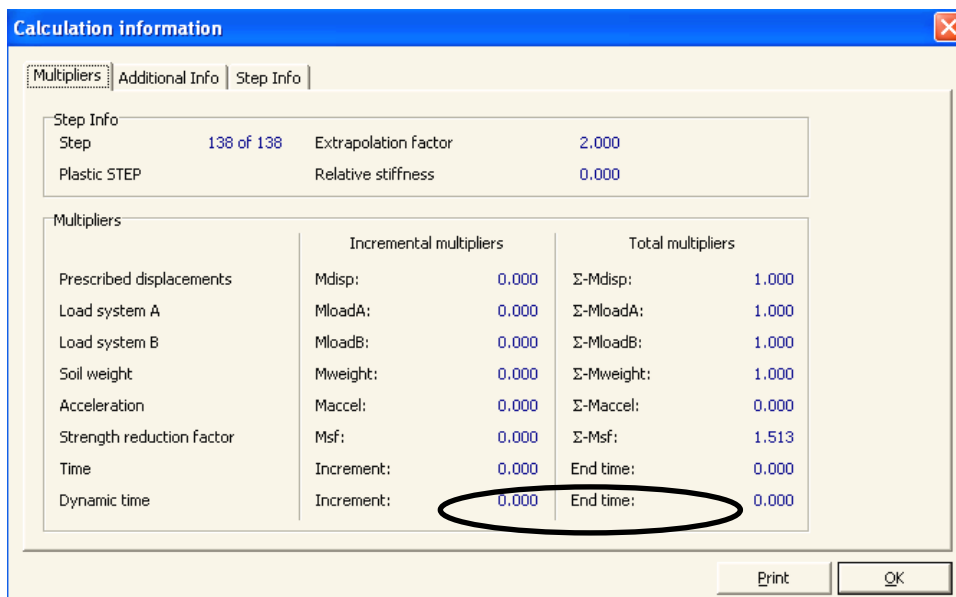
در شکل ۸ کانتور تنش کل متوسط نشان داده شده است. مطابق شکل تنش در محل گودبرداری به دلیل آزاد شدن تنش کاهش یافته و میدان تنش اولیه بهم‌خورده است که با دور شدن از ناحیه گودبرداری و فاصله گرفتن از آن تنش‌ها به مقدار اولیه خود نزدیک می‌شوند.



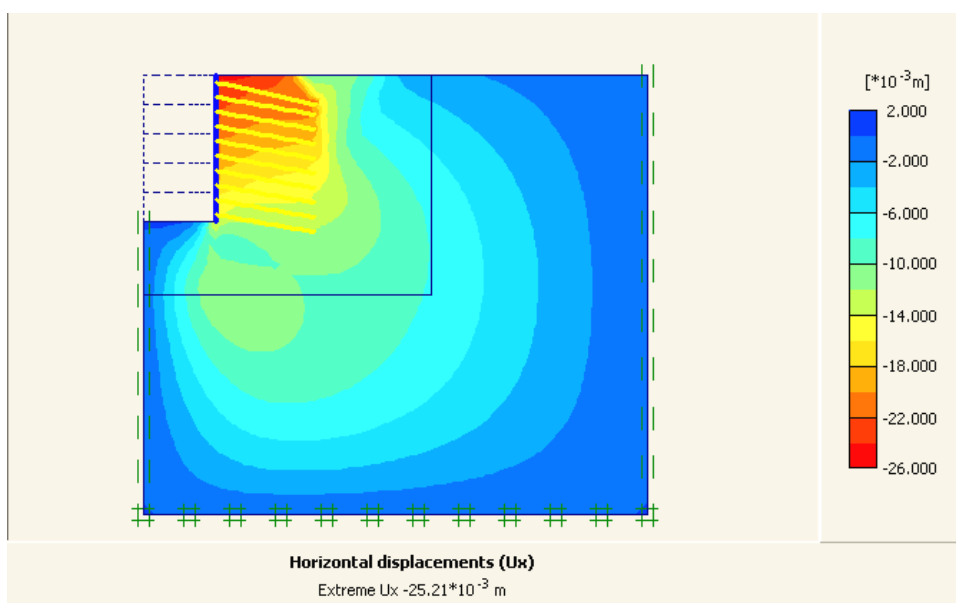
شکل ۸- کانتور تنش کل میانگین

مقایسه نتایج

بابو و سینگ (۲۰۰۹) در مقاله خود به بررسی رفتار المان‌های تیر و ژئوگرید موجود در نرم‌افزار پلکسیس برای مدل کردن نیلینگ پرداخته بودند. آن‌ها همچنین تأثیر اندازه مش بندی در نتایج را مورد مطالعه قرار داده بودند. در این پژوهش به منظور مقایسه یک گود ۱۰ متری پایدار شده با المان ژئوگرید انتخاب شد که اندازه کلی مش آن متوسط بود. میزان ضریب اطمینان حاصل توسط آنها برای این مدل ۱/۵۹ بود که نتیجه مدل‌سازی با پلکسیس مطابق شکل ۹ برابر ۱/۵۱ است که در مجموع در حدود ۵ درصد با یکدیگر خطا. همچنین حداکثر جابجایی افقی دیواره محاسبه شده توسط بابو و سینگ (۲۰۰۹) برابر ۲۲/۸۶ میلی‌متر بود که نتیجه حاصل از مدل‌سازی مطابق شکل ۱۰ برابر ۲۵/۲۱ میلی‌متر به دست می‌آید که میزان خطا در حدود ۹ درصد است. خطاهای موجود می‌تواند به دلیل تفاوت در خصوصیات مصالحی که داده نشده بود و در مدل‌سازی فرض گردیده بود باشد. همچنین در رسم ژئوگریدها با طول ۷ متر و زاویه ۱۰ درجه نسبت به افق ساده‌سازی‌هایی می‌شود که باز می‌تواند باعث ایجاد خطا شود. ورژن نرم‌افزار مورد استفاده نیز می‌تواند دلیل دیگر اختلاف بین نتایج باشد که در مقاله ورژن نرم‌افزار ذکر نشده بود. با این حال مقادیر خطا کمتر از ۱۰ درصد بوده و میزان قابل قبولی دارند [11].



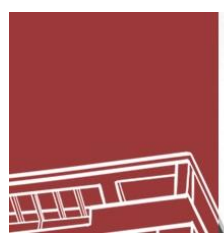
شکل ۹- نمایش ضریب اطمینان



شکل ۱۰- کانتور جابجایی افقی

نتایج حاصل از نرم افزار پلکسیس

در خاک‌های نرم سیستم میخکوبی برای پایداری گودها یکی از مؤثرترین روش‌ها است. به منظور مطالعه اثر عوامل مختلف میخکوبی بر پایداری گود ۷ مدل ساخته شده است. پارامترهای مورد مطالعه نیز، ضخامت شاتکریت، زاویه نیل‌ها و طول نیل‌ها می‌باشد. مدل در هشت مرحله آنالیز می‌شود که در هفت مرحله آن ۱/۵ متر از خاک غیرفعال شده و شاتکریت و نیل مربوط به آن لایه فعال می‌شود غیر از مرحله هفتم که لایه ۱ متری از خاک غیرفعال می‌شود. در مرحله هشتم ضریب اطمینان پایداری گود محاسبه می‌شود.



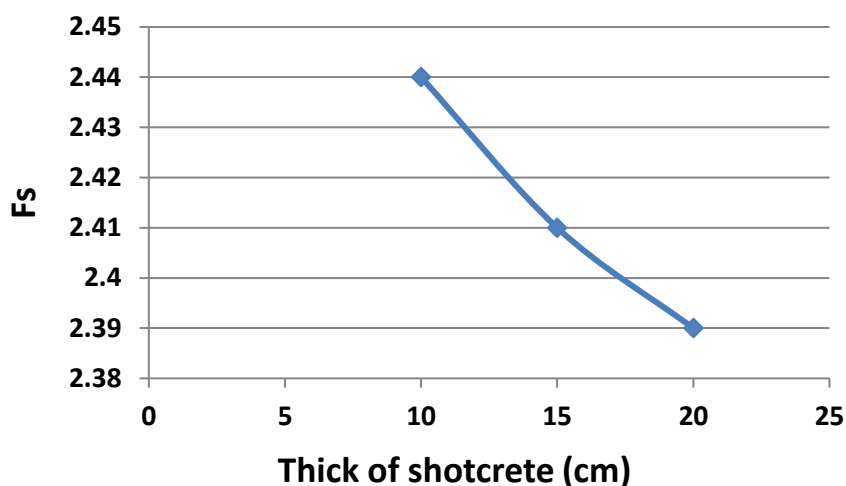
ضخامت شاتکریت:

در بررسی تأثیر ضخامت شاتکریت ۳ مدل مورد بررسی قرار گرفت که در آن‌ها طول نیل ۱۰ متر، زاویه نیل‌ها نسبت به افق ۱۵ درجه و ضخامت شاتکریت برابر ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتیمتر وارد شد. خلاصه نتایج در جدول ۴ آورده شده است.

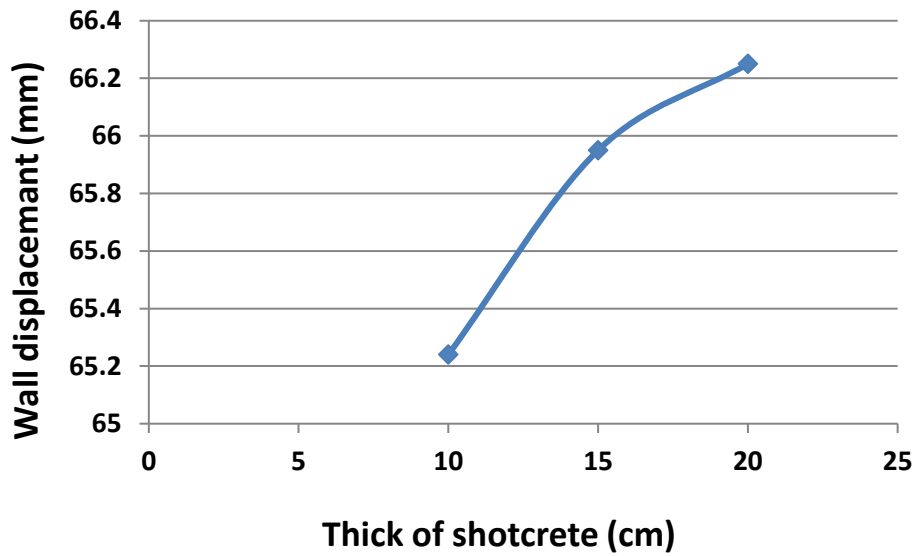
جدول ۴- مشخصات مدل‌های مربوط به ضخامت شاتکریت

مدل	ضخامت شاتکریت (cm)	طول میخ‌ها (m)	زاویه میخ‌ها (درجه)	ضریب اطمینان	حداکثر جابجایی دیواره (mm)
۱	۱۰	۱۰	۱۵	۲/۴۴	۶۵/۲۴
۲	۱۵	۱۰	۱۵	۲/۴۱	۶۵/۹۵
۳	۲۰	۱۰	۱۵	۲/۳۹	۶۶/۲۵

در شکل ۱۱ (الف) نمودار مربوط به تغییرات ضریب اطمینان برحسب ضخامت شاتکریت نشان داده شده است. چنانچه از داده‌های جدول و نمودار مشخص است با افزایش ضخامت شاتکریت میزان ضریب اطمینان کاهش پیدا می‌کند. در شکل ۱۱ (ب) نیز نمودار جابجایی کل حداکثر دیواره نشان داده شده است. مطابق شکل با افزایش ضخامت شاتکریت جابجایی دیواره نیز افزایش می‌یابد. دلیل چنین رفتاری می‌تواند افزایش بار در دیواره باشد. شاتکریت ۱۰ سانتیمتری خود قابلیت تحمل بار ناشی از خاک پشت آن را دارد و با افزایش ضخامت تنها بار نیلینگ‌ها افزایش یافته و در نتیجه ضریب اطمینان کاهش پیدا کرده و جابجایی‌ها افزایش پیدا می‌کند.



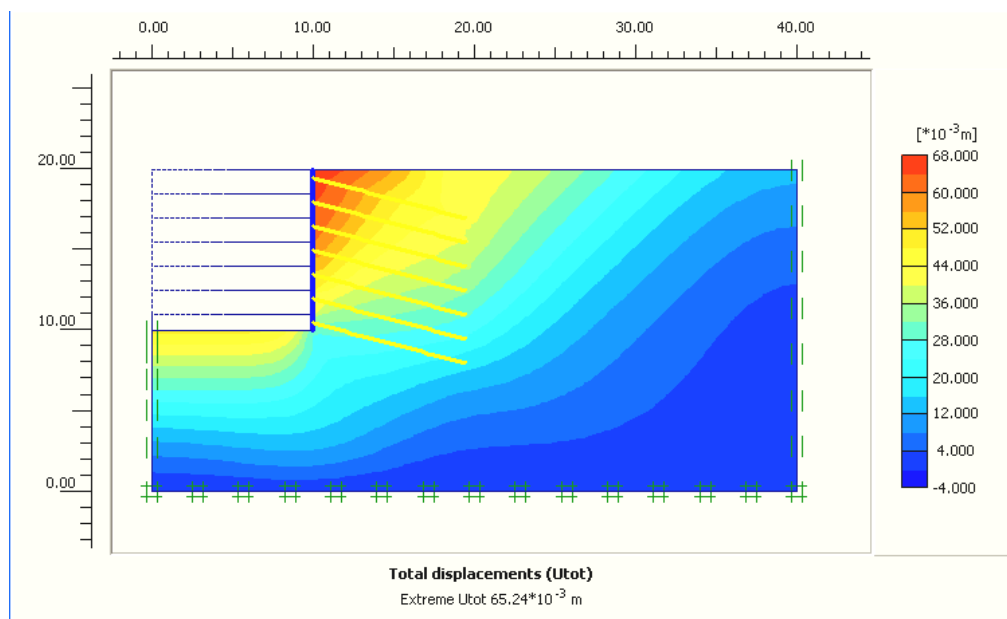
الف



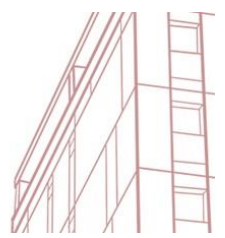
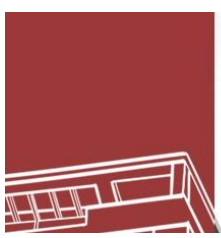
ب

شکل (۱-الف) نمودار ضریب اطمینان در مقابل ضخامت شاتکریت، (ب) نمودار جابجایی حداکثر گود در مقابل ضخامت شاتکریت

در شکل ۱۲ کانتور جابجایی کل برای مدل شماره ۱ نشان داده شده است که بهترین وضعیت را در بین ۳ مدل دارد. چنانچه از شکل قابل مشاهده است، در فاصله ۲۰ متری از دیوار جابجایی‌ها به ۲ سانتیمتر کاهش پیدا کرده است که می‌توان بیان کرد طول زیادی متأثر از این گودبرداری بوده است.



شکل ۱۲- کانتور جابجایی کل گود با شاتکریت به ضخامت ۱۰ سانتیمتر



۸. نتیجه گیری

نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها نیز عبارت‌اند از:

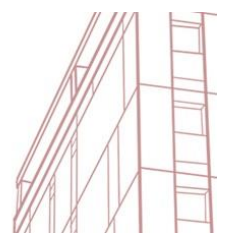
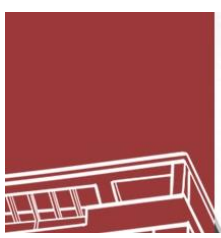
۱. با افزایش ضخامت شاتکریت میزان ضریب اطمینان کاهش پیدا می‌کند و جابجایی دیواره نیز افزایش می‌یابد. دلیل چنین رفتاری می‌تواند افزایش بار در دیواره باشد.
۲. با افزایش طول نیلینگ ضریب اطمینان نیز کاهش پیدا می‌کند اما پس از طول ۱۴ متر نمودار به صورت افقی درمی‌آید که نیلینگ با طول بیشتر از این مقدار هیچ نقشی در افزایش مقاومت سیستم نیلینگ ندارد که در این مطالعه این طول برابر ۱۴ متر بود.
۳. در سیستم میخکوبی تغییرات ضریب اطمینان برحسب زاویه نیلینگ نشان داده است که هرچه زاویه نیلینگ با سطح گسیختگی به ۹۰ درجه نزدیک‌تر شود ضریب اطمینان بهتر خواهد بود، در واقع که در پروژه مورد مطالعه بهترین زاویه ۱۵ درجه است.
۴. شمع به تنهایی در خاک مورد مطالعه قادر به تحمل تغییرشکل و در نتیجه تنش ناشی از خاک نبوده و تغییرشکل زیادی اتفاق افتاده و مدل گسیخته و ناپایدار می‌شود. چنانچه برای پایدارسازی گود از شمع نگهبان استفاده شود لازم است تا شمع توسط مهارهایی در یک یا چند نقطه مقید شود تا جابجایی آن محدود شود.
۵. با توجه به کسب ضریب اطمینان خوب در دو مدل میخکوبی و دیواره شمعی طی مدل‌سازی انجام شده، انتخاب مناسب‌ترین گزینه بستگی به عوامل دیگری دارد مانند شرایط ساختگاه و همچنین، الزامات آیین‌نامه متناسب با شرایط و المان‌های موجود در اطراف گود است.

به منظور بررسی‌های بیشتر پیشنهادت زیر مطرح می‌گردد:

۱. مراحل اجرای این پژوهش با خواص خاک‌های مطالعات موردی ذکر شده، با نرم‌افزار Snail نیز انجام شود و نتایج بدست آمده با نتایج حاصله از این پژوهش مقایسه شود.
۲. مراحل اجرای این پژوهش با خواص خاک‌های مطالعات موردی ذکر شده، با نرم‌افزار Slope/W نیز انجام شود و نتایج بدست آمده با نتایج حاصله از این پژوهش مقایسه شود.

۱۲. مراجع

۱. تقی زاده قهی عزت الله، پایدارسازی جداره‌های گودبرداری عمیق به روش میخکوبی در مناطق شهری، آذر ۱۳۸۶، همایش مقررات ملی ساختمان.
۲. برآجا. ام. داس، زمستان ۱۳۹۰، کتاب اصول مهندسی ژئوتکنیک، شاپور طاحونی، انتشارات پارس آئین، جلد دوم مهندسی پی.
۳. فاخر، علی، مهندسی پی پیشرفته، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۹۰



4. Dong-Soo Kim & ByongChul Lee. Cylindrical Diaphragm Wall Movement During Deep Excavation, International Journal of Offshore and Polar Engineering, vol.13No.4December2003
5. LiewShaw-Shong, Soil Nailing for Slope Strengthening, May 2005 Geotechnical Engineering 2005 Kuala Lumpur Malaysia.
۶. خزائی جهانگیر، تحلیل غیرخطی دیوارهای حائل مهارشده برای خاک برداری عمیق، دی ۱۳۷۵، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده عمران دانشگاه امیرکبیر
۷. متولی رامین، روش های نگهداری زمین (خاک برداری) با توجه به محدودیتهای سازه ای شهر یور ۱۳۷۶، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده عمران دانشگاه امیرکبیر
8. Sabatini, P. J., D. G. Pass, and Robert Charles Bachus. Geotechnical engineering circular no. 4: Ground anchors and anchored systems. No. FHWA-IF-99-015. 1999.
9. W.F. Chen, The Civil Engineering handbook, second edition, Hawaii University
۱۰. هاتف نادری و کمری میر جلال، تحلیل پایداری شیب های خاکی مهارشده با میخکوبی، شهر یور ۱۳۸۴، مقاله نشریه دانشکده فنی جلد ۳۹ شماره ۳.
11. Babu, GL Sivakumar, and Vikas Pratap Singh. "Simulation of soil nail structures using PLAXIS 2D." Plaxis Bulletin Spring Issue No. 25 (2009): 16-21.