



Mojtaba Pashapour

civil engineering

خاک‌های مسلح شده با روش نیلینگ

بررسی خاک‌های مسلح شده با روش نیلینگ به همراه مدلسازی عددی در نرم افزار

PLAXIS 2D

تهیه کننده مهندس مجتبی پاشاپور آذر (مدرس و طراح سازه)

تدریس خصوصی طراحی سازه بتنی و فولادی با نرم افزار ایتبس و سیف

[@MP_Civil](https://www.instagram.com/MP_Civil) لینک کانال آموزش، طراحی اجرا



مقدمه

میخکوبی خاک یک روش تسلیح در جای خاک است که در دو دهه اخیر برای حفظ دیوارهای حفاری و ایستایی شیب‌ها به صورت روز افزون به کار می‌رود. روش‌های طراحی که مورد استفاده قرار گرفته در اروپا عمدتاً روش آلمانی و روش فرانسوی و در آمریکا روش davis می‌باشد. در حالت کلی این روش‌ها از جا درآمدگی میخ و پایداری کلی دیوار میخ‌کوبی شده را کنترل می‌کنند. در این جا برای پایداری شیب‌های موجود و یا در حال گودبرداری از روش نیلینگ استفاده گردیده است. این روش شامل نصب آرماتورهای فولادی در فواصل نزدیک که متعاقباً توسط دوجاب سیمانی پوشانده خواهد شد، می‌باشد نیلینگ برای اجرای سازه‌های محافظ موقت دائم قابل استفاده می‌باشد. در راستای استفاده موثر از خاک مسلح، استفاده از روش‌های جدیدتری نظیر مهاربندی خاک و میخ‌کوبی خاک معمول شده است. سیستم‌های مهاربندی و میخکوبی خاک جهت پایدارسازی و نگهداری سازه‌های خاکی طراحی می‌شوند، تا توسط المان‌های کششی، تغییر مکان‌های سازه را محدود نمایند. اساس طراحی این عناصر بر مبنای انتقال بار از طریق اصطحکاک یا چسبندگی در ناحیه فصل مشترک خاک و مصالح تسلیح می‌باشد. از مزایای اجرای این سیستم‌ها، امکان پایدارسازی دیوارهای خاکی بزرگ، در زمان کوتاه و با مراحل اجرایی کمتر نسبت به سایر روش‌ها و با مصرف کمترین هزینه می‌باشد. استفاده از این سیستم‌ها در سازه‌های خاکی که شرایط اجرای این سیستم‌ها را دارند، مستلزم یک تخمین دقیق از دوام و پایداری اجرای سازه در دراز مدت می‌باشد. اساس این سیستم بر مبنای کاربرد مصالح تسلیح کششی در ناحیه مقاوم خاک می‌باشد که در فاصله کمی نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند. سیستم‌های میخکوبی شده قابلیت تحمل بارهای



قائم استاتیکی و دینامیکی را دارا می‌باشند. از اینرو می‌توان از این سیستم جهت ساخت کوله پلها استفاده نمود. همچنین می‌توان از این سیستم جهت پایدار سازی و تعمیر سازه‌های خاکی موجود نیز بهره برد. در سیستم‌های میخکوبی شده، مصالح تسلیح عموماً از میلگردهای فولادی که قابلیت تحمل نیروهای کشش و تا اندازه‌ای برشی را دارند تشکیل شده است.

مهار کششی نیلینگ معمولاً از آرماتورهای فولادی با قطر ۲۰ الی ۴۰ میلیمتر و با حد تسلیم ۴۲۰ الی ۵۰۰ نیوتن بر میلیمتر مربع استفاده می‌شوند که درون یک چال حفاری شده با قطر ۷۶ الی ۱۵۰ میلیمتر قرار گرفته و دور آن درون چال تزریق می‌گردد. فواصل بین مهارهای کششی حدود ۱ الی ۲ متر می‌باشد و طول آنها حدود ۷۰ الی ۱۰۰ درصد ارتفاع گود می‌باشد و حداقل شیب نسبت به افق حدود ۱۵ درجه می‌باشد.

شایان ذکر است که کلیه سطوح ترانشه‌های حفاری شده که توسط نیلینگ بایستی مسلح شوند، ابتدا با استفاده از شبکه‌ی مش و شاتکریت حفاظت شده و سپس سیستم نیلینگ روی آن‌ها اجرا می‌شود باید توجه داشت که رویه شاتکریت شده روی ترانشه‌های حفاری شده نقش سازه‌ای نداشته اما می‌توان جهت اطمینان برای پایداری موقت خاک بین مهارها استفاده نمود. در شکل (۱) نمونه‌هایی از نیلینگ آورده شده است.



شکل (۱) – نمونه‌هایی از نیلینگ

اصول طراحی نیلینگ

۱. هندسه سازه مشخص گردد.
۲. عمق و زاویه شیب خاکبرداری مشخص گردد.
۳. بارگذاری و سربار بارهای وارده به Nail و موقعیت سطح افزایش تخمین زده شود.
۴. انتخاب نوع آرماتور شامل: سطح مقطع – طول – فاصله از یکدیگر و در هر تراز مقاومت موضعی آنها تضمین گردد تا مقاومت از نظر استحکام و ظرفیت چسبندگی برای تحمل نیروها تخمین زده شده و با ضریب اطمینان مناسب و قابل قبول کنترل شوند.
۵. پایداری کل سازه نگهدارنده و خاک اطراف آن در زمان حفاری گود و ایجاد پله‌های حفاری و بررسی و کنترل ضریب اطمینان قابل قبول
۶. تخمین نیروهای وارده بر صفحه فولادی Bearing plate



۷. در نظر گرفتن سطح پیزومتریک آبهای زیرزمینی و لحاظ نمودن سیستم زهکشی.

مراحل اجرای سیستم نیلینگ

مطابق شکل (۲) مراحل اجرای نیلینگ بصورت شماتیک نشان داده شده است.

۱. گودبرداری در مرحله اول ترانشه و یا گود و ایجاد پله بعدی عملیات.

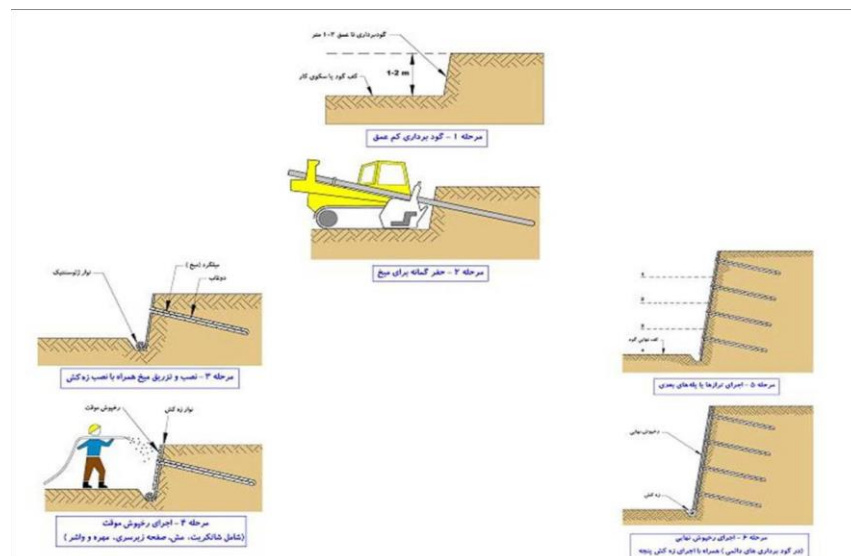
۲. حفاری چال جهت نصب مهار کششی Nail

۳. قراردادن آرماتور داخل چال و تزریق چال و اجرای سیستم زهکشی

۴. اجرای شاتکریت جداره و نصب صفحات فولادی.

۵. گودبرداری مرحله بعدی ترانشه و یا گود و ایجاد پله‌های بعدی عملیات.

۶. اجرای پوشش شاتکریت نهایی پس از اتمام آخرین مرحله حفاری



شکل (۲) - مراحل اجرای سیستم نیلینگ



کاربرد نیلینگ در پروژه‌ها

الف) پایداری ترانشه‌ها در احداث بزرگراه‌ها و راه‌آهن‌ها که برای زیباسازی روش نیلینگ در محل‌های قابل رویت می‌توان از رویه‌های سنگ‌چین یا سایر اجزای مقاوم و رنگی استفاده کرد.

ب) پایداری جداره تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی

ج) پایداری و حفاظت گود در سازه‌های مناطق شهری، ساختمان‌های مچاور گود، ایستگاه‌های زیرزمینی مترو

د) پایداری کوله‌های مجاور پل‌ها در زمین‌های سست و ریزشی



شکل (۳) – کاربرد نیلینگ در پروژه‌ها



مزیت‌ها و محدودیت‌ها

تکنیک نیلینگ خاک یک روش جایگزین برای تکنیک‌های قدیمی نظیر دیوار حائل می‌باشد. موارد ذیل برخی از مزایای نیلینگ خاک با در نظر گرفتن مواردی همچون اجرا و ساخت، هزینه و عملکرد می‌باشد:

۱. این روش برای سایت‌های محدود و باریک با دسترسی دشوار مناسب است، زیرا تجهیزات نصب نیلینگ به نسبت کوچک و قابل حمل هستند.
۲. به راحتی می‌تواند در طول اجرا بر محدودیت‌ها و تغییرات در خاک و زمین فائق شود.
۳. طی اجرا کمترین تأثیرات زیست محیطی را نسبت به دیوار حائل دارد، زیرا چندان نیاز به عملیات خاکی ندارد و همچنین در این سیستم قطع درختان هم ضرورت ندارد.
۴. بدلیل کمتر بودن عملیات خاکی در شیب‌ها نسبت به ساخت دیوار حائل هزینه و زمان کمتری را صرف می‌کند.
۵. در این روش خصوصیات ژئولوژیکی مضر کمتر حس می‌شود و از اینرو قابلیت اطمینان بیشتری دارد. همچنین به واسطه تعداد زیاد نیلینگ قابلیت افزونگی بیشتری دارد.
۶. مود خرابی سیستم نیلینگ شکل‌پذیر است، بنابراین قابلیت ارائه علائم هشداردهنده قبل از خرابی را داراست.



تکنیک نیلینگ دارای محدودیت‌های ذیل می‌باشد:

۱. وجود تجهیزات، سازه‌های درون خاک و دیگر موارد مدفون در خاک محدودیت‌هایی را برای طول و طرح‌بندی نیلینگ‌ها ایجاد می‌کند.
۲. ناحیه اشغال شده توسط نیلینگ‌ها بی‌حاصل شده و محدودیت‌هایی را در زمینه توسعه در آینده خواهد داشت.
۳. باید از مالکان زمین‌ها یا ساختمان‌های مجاور برای نصب نیلینگ اجازه گرفته شود و ممکن است محدودیت‌های فنی بدلیل وجود ساختمان به وجود آید.
۴. بالا بودن تراز آب زیرزمینی ممکن است منجر به بروز مشکلاتی در اجرا، متهم‌زنی و گروت‌ریزی گردد.
۵. وجود زمین نفوذپذیر و متخلخل با سنگ‌ها و شن‌های زیاد می‌تواند منجر به سختی‌هایی در اجرا به واسطه پتانسیل نشت گروت گردد.
۶. زمین‌های دارای مقادیر زیادی ریزدانه می‌تواند باعث مشکلات خزش بین زمین و نیلینگ‌ها شود.
۷. نصب نیلینگ‌های با طول بلند دشوار است و از اینرو تکنیک نیلینگ خاک ممکن است برای شیب‌های بزرگ و توده‌های عظیم مناسب نباشد.



۸. به این دلیل که نیلینگ‌ها پیش تنیده نیستند انتقال نیروها توسط نیلینگ با تغییر شکل خاک همراه خواهد بود. بنابراین باید تاثیر سازه‌های اطراف، راه‌ها و سایر زیرساخت‌ها به دقت در نظر گرفته شود.

۹. نیلینگ‌ها در پایدارسازی پروفیل‌های بزرگ با شیب تند، صخره‌ها، پیش‌امدگی‌ها، یا در نواحی با سطح فرسایش بالا چندان موثر نیستند.

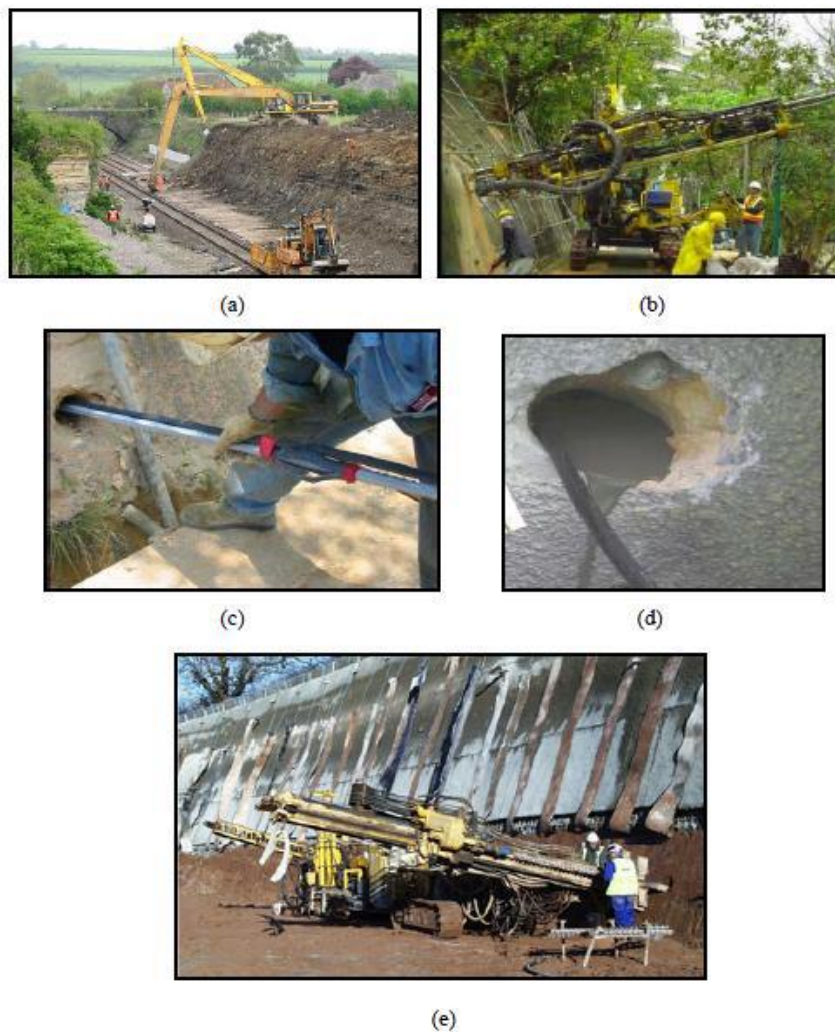
مکانیزم عملکرد یک سیستم نیلینگ خاک

اساساً تکنیک نیلینگ خاک پایداری شیب‌ها، دیوارهای حائل و گودها را از طریق انتقال تنش به میله‌های نیلینگ (نیل‌ها) تامین می‌کند. نیروهای کششی ابتدا از طریق اندرکنش سایشی بین میله‌های نیلینگ و زمین ایجاد می‌شوند و عکس‌العمل‌ها به وسیله راس نیلینگ و بتن سطح تامین می‌شوند. نیروهای کششی در میله‌های نیلینگ، خاک را به وسیله تحمل مستقیم بارهای برشی اعمال شده و با افزایش تنش‌های نرمال در خاک در سطح بالقوه گسیختگی، تقویت می‌کند. از اینرو امکان تحقق مقاومت برشی یالاتر را فراهم می‌آورد. راس‌های نیلینگ و بتن سطح نیز یک اثر بازدارنده به وسیله محدود کردن تغییرشکل خاک نزدیک به سطح شیب ایجاد می‌نمایند. در نتیجه میانگین تنش موثر و مقاومت برشی خاک پشت راس‌های نیلینگ افزایش خواهد یافت. همچنین این راس‌ها در جلوگیری از گسیختگی موضعی نزدیک سطح شیب و ارتقای عملکرد توده خاک تقویت شده و از طریق باز توزیع نیروها در میان میله‌های نیلینگ موثر هستند.



پایداری داخلی سیستم نیلینگ خاک معمولاً با استفاده از مدل دو ناحیه‌ای (ناحیه فعال و ناحیه غیرفعال یا مقاوم) برآورد می‌گردد که به وسیله سطح بالقوه گسیختگی جدا می‌شود. ناحیه فعال محدوده‌ای در جلوی سطح بالقوه گسیختگی جدا می‌شود. ناحیه فعال محدوده‌ای در جلوی سطح بالقوه گسیختگی قرار دارد که تمایل به جدا شدن از سیستم نیلینگ دارد. ناحیه غیر فعال یا مقاوم محدوده‌ای در پشت سطح بالقوه گسیختگی است که بعد از گسیختگی کم و بیش سالم باقی می‌ماند. عملکرد نیلینگ باید به گونه‌ای باشد که ناحیه فعال و غیر فعال را به هم بدوزد.

باید توجه داشت که پیکربندی این دو ناحیه جهت ایجاد یک مدل ساده شده برای محدود نمودن معدلات تحلیل می‌باشد که در آن تغییر شکل سیستم نیلینگ در نظر گرفته نمی‌شود. در حالت واقعی، در یک شیب خاک عموماً یک ناحیه برشی در معرض نیروهای برشی نیز وجود دارد. اندرکنش میله نیلینگ و خاک پیچیده است و میله‌های نیلینگ تحت تاثیر عوامل زیادی هستند. این عوامل شامل خواص مکانیکی میله‌های نیلینگ (مانند مقاومت کششی، مقاومت برشی و ظرفیت خمشی)، موقعیت و نحوه قرارگیری میله‌های نیلینگ، مقاومت برشی خاک، سختی نسبی میله‌های نیلینگ و خاک، اصطکام بین میله‌های نیلینگ و خاک، ابعاد راس نیلینگ و ماهیت سطح بتن می‌باشد.



شکل (۴) – اجرای سیستم نیلینگ

بررسی میدانی محل اجرای نیلینگ

به طور کلی بررسی و تست میدانی جهت اجرای سیستم‌های نیلینگ شامل مراحل زیر است:

مطالعات کتایخانه‌ای، بازدید و شناسایی میدانی، جمع‌آوری داده‌های میدانی شامل اطلاعات و نتایج آزمایشگاهی خاک محل و پیگیری و مرور مکرر بررسی‌های انجام شده و فرضیات طراحی حین ساخت.



انواع روش‌های پایدارسازی گودها:

جداره‌های مهاربندی شده توسط المان‌های افقی و مایل (Braced wall using wale struts)

جداره‌های مهاربندی شده توسط المان‌های کششی (Soldier beam& lagging)

جداره‌های مهاربندی شده توسط سپرکوبی (Braced sheet pile)

جداره‌های مهاربندی شده توسط شمع‌های درجا (Bored pile walls)

جداره‌های مهاربندی شده توسط دیوار دیافراگمی (Diaphragm walls-Slurry wall)

جداره‌های مهاربندی شده توسط میخکوبی (Soil nailing)

جداره‌های مهاربندی شده توسط انکراژ (Anchorage)

جداره‌های مهاربندی شده توسط دوخت به پشت - پین گذاری (Tie back)

جداره‌های مهاربندی شده توسط میکروپایل (Micropile)

جداره‌های مهاربندی شده توسط خرپا (Truss - Raker)

شیب‌دار کردن (Slopeing)



تاریخچه میخکوبی خاک

برای اولین بار مهندسين اتریشی از روش میخکوبی برای پایدارسازی شیروانی های سنگی در تونل استفاده کردند. آنها در اوایل دهه ۱۹۶۰ برای پایدارسازی جداره های تونل، شبکه ای از سوراخ ها را در طاق و دیوارهای سنگی تونل حفاری کرده، در داخل آن میلگردهای فولادی قرار داده و قسمت انتهایی آن را با شبکه مش بندی در محیط تونل گیردار کردند. سپس با دوغاب ریزی در سوراخ های حفر شده و بتن پاشی به جداره تونل، موفق به پایداری ایمن جداره های داخلی تونل شدند. این روش بعدها توسط مهندسين آلمانی و فرانسوی برای پایدارسازی در شیروانی های خاکی مورد استفاده قرار گرفت. به عبارت دیگر مهندسين آلمانی و فرانسوی، روش اتریشی میخکوبی در سنگ را برای شیب ها و دیوارهای خاکی به کار بستند. آنها استفاده از تکنولوژی میخکوبی در تونل را به پایدار نمودن شیب ها و دیوارهای خاکی گودبرداری شده و کوله پل ها تعمیم دادند.

پس از آن استفاده از میخکوبی به طور گسترده در طرح های مختلف عمرانی نظیر تثبیت ترانشه های خط آهن و بزرگراه ها مناطق شهری جهت احداث ساختمان های بلند مرتبه که شامل چندین طبقه در داخل زمین هستند و تثبیت شیب های زمین در برابر لغزش های احتمالی به کار بسته شد.

یکی از اولین کاربردهای میخکوبی خاک در سال ۱۹۷۲ در فرانسه برای پروژه تعریض راه آهن بود که ترانشه‌هایی با ارتفاع ۱۸ متر در ماسه به وسیله میخکوبی پایدار گردید. به خاطر سرعت این



روش و اقتصادی بودن آن نسبت به سایر روش‌های رایج نگهداری خاک، استفاده از این روش در فرانسه و سایر نقاط اروپا افزایش یافت [۱].

در آلمان اولین استفاده از دیوار میخکوبی شده در سال ۱۹۷۵ اتفاق افتاد و اولین برنامه تحقیقاتی مهم روی دیوارهای میخکوبی شده در آلمان در خلال سال‌های ۱۹۷۵ تا ۱۹۸۱ توسط دانشگاه کارسلوه و شرکت ساختمانی بایور صورت گرفت که شامل آزمایشات بزرگ مقیاس از دیوارهای آزمایشی و توسعه روش‌های تحلیلی برای استفاده در طراحی بود [۲].

در فرانسه نیز برنامه تحقیقاتی کلوتر در سال ۱۹۸۶ صورت گرفت که شامل آزمایشات بزرگ مقیاس و بازبینی دیوار در دوره بهره‌برداری و مدل‌سازی عددی بود [۳].

در آمریکای شمالی (واشینگتن، مکزیکو سیتی و ونکوور) در اواخر دهه ۱۹۶۰ و اوایل دهه ۱۹۷۰ از میخکوبی خاک برای نگهداری موقت گودبرداری‌ها استفاده شد یکی از اولین کاربردهای میخکوبی خاک در ایالات متحده در سال ۱۹۷۶ متری و گودبرداری‌های عمیق (۱۳.۷ متری)، به منظور توسعه یک بیمارستان بود که از آن به بعد استفاده از این روش به خاطر محاسن فنی و همچنین بهینه بودن از نظر اقتصادی، رو به افزایش گذاشت. بسیاری از دیوارهای ساخته شده در ایالات متحده هنوز به عنوان سازه‌های حائل موقت استفاده می‌شوند ولی استفاده از دیوارهای میخکوبی شده به عنوان سازه‌های دائمی، در سال‌های اخیر افزایش یافته است. تاکنون مطالعات تجربی و تحلیل‌های عددی فراوانی به منظور درک بهتر رفتار شیب‌ها دیوارهای خاکی میخکوبی شده انجام گرفته است. علاوه بر هندسه و مشخصات خاک، عوامل دیگری همچون زاویه قرارگیری میلگردها، مشخصات



میلگردها، طول آن‌ها و فواصل بین میلگردها، بر پایداری شیب‌های میخکوبی شده تاثیر فراوان دارند [۴].

رودریگو وارتیز (۲۰۱۴) با استفاده از روش تیر بر بستر الاستیک رفتار میل‌مهارها در گودبرداری‌های مهار شده را مطالعه کردند. آن‌ها دریافتند که افزایش سختی دیوار، پیش بارگذاری و سختی میل-مهارها می‌تواند موجب کاهش جابه‌جایی دیوار شود. در این پژوهش مشاهده شد که دیوار انعطاف-پذیر گرایش به تغییر شکل در قسمت پایین گودبرداری دارد، در حالی که دیوار صلب مدل تغییر مکان طره‌ای از خود نشان می‌دهد [۵].

هو و اسمیت (۲۰۱۵)، با انجام آنالیز اجزاء محدود سه بعدی بر روی دیوارهای میخکوبی شده به این نتیجه رسیدند که در زمان گسیختگی، مکان هندسی نیروهای کششی ماکزیمم، نیروهای برشی ماکزیمم و لنگر خمشی صفر در میخ‌ها نزدیک به هم و تقریباً منطبق بر سطح گسیختگی می‌باشند [۶].

لیو و کو (۲۰۰۶) به ساختار خود خاک، توجه زیادی کردند و روش‌های عددی شبیه‌سازی را مورد استفاده قرار داده و همچنین مدل خاک سخت شونده را برای مدلسازی عددی در دیوارهای میخکوبی شده ارائه دادند [۷].

بابو و سینگ (۲۰۰۸)، در تحقیقی با عنوان آنالیز عددی کارایی دیوارهای خاکی میخکوبی شده در شرایط لرزه‌ای به بررسی رفتار لرزه‌ای اینگونه دیوارهای خاکی پرداختند. مشاهدات تجربی (میدانی



و همچنین تست‌های انجام شده در مقیاس واقعی) نشان دهنده رفتار مناسب دیوارهای میخکوبی شده در برابر زمین لرزه بودند [۸].

سو و همکاران (۲۰۱۰)، طراحی ساخت و عملکرد یک دیوار میخکوبی شده به ارتفاع ۵ / ۱۳ متر، شامل ۹ ردیف میخ در هنگ کنگ را مورد بررسی قرار دادند. آنها با مدلسازی عددی FLAC این دیوار و مقایسه نتایج حاصله با مقادیر اندازه‌گیری شده، به این نتیجه رسیدند

که بیشترین نیروی محوری در میخ هفتم ایجاد شده و مکان هندسی نیروی کششی ماکزیمم بر سطح گسیختگی پیشبینی شده از روش تعادل حدی نیروها منطبق است. همچنین ماکزیمم نیروهای کششی ایجاد شده در میخ‌ها ثابت نبوده و به صورت تقریباً خطی تا میخ هفتم افزایش یافته و سپس بعد از آن کاهش می‌یابد. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر حاصله از حل عددی و روش تعادل حدی نیروها (روش مورد استفاده برای طراحی این دیوار) سازگاری این مقادیر با حل عددی و اختلاف زیاد آنها را با نتایج تعادل حدی نشان می‌دهد [۹].

حسینی و همکاران (۱۳۹۲)، در تحقیقی بیان داشتند که امروزه با توجه به کمبود فضاهای شهری، نیاز به استفاده از اعماق زمین به منظور ساختمان سازی بیش از پیش احساس می‌شود. از این جهت است که هر روزه به ویژه در شهرهای بزرگ تعداد گودبرداریهای عمیق در حال افزایش می‌باشد و پایدارسازی این گودها به یکی از مهمترین مسائل در علم مهندسی عمران تبدیل شده است. از روش‌های نسبتاً جدید در زمینه پایدارسازی گودبرداری‌ها و به طور کلی شیب‌های خاکی می‌توان به دو سیستم میخکوبی در خاک و استفاده از ریزشمع‌ها اشاره نمود. در تحقیق حاضر یکی از



گودبرداریهای عمیق در شهر تهران که متعلق به دانشگاه آزاد اسلامی می‌باشد توسط نرم‌افزار اجزای محدود FLAC مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در این پروژه به دلیل وجود ضخامت زیاد خاک دستی ترکیب دو روش میخکوبی در خاک و استفاده از ریزشمع پیشنهاد گردیده است. بدین منظور پارامترهای هندسی مختلفی از جمله زاویه نصب میخ‌ها و طول ریزشمع‌ها مورد تحلیل قرار گرفته و میزان جابه جایی افقی دیواره در هر یک از حالات بررسی شده است. نتایج بررسی ها نشان می‌دهد مناسب‌ترین زاویه نصب میخ‌ها ۱۵ درجه نسبت به اقق می‌باشد و بهتر است در این سیستم ترکیبی عمق المان‌های ریزشمع بیشتر از عمق گودبرداری در نظر گرفته شوند [۱۰].

مظفری در سال (۱۳۹۴)، در مقاله‌ای بیان داشت که دیوار حائل به عنوان بخش جدایی ناپذیر شریان‌های حیاتی در سرتاسر جهان، امروزه به طور گسترده در بنادر، گودبرداری جاده ها، پل ها و ...مورد استفاده قرار می‌گیرد. پایداری و مقاومت این دیوارها در برابر رانش جانبی خاک و سایر نیروهای خارجی توسط مقاومت خمشی آنها و عمق نفوذشان در خاک تأمین می‌شود. در شرایط دینامیکی رفتار این دیوارها به مشخصات هندسی و مکانیکی خاک و دیوار، اثرات اندرکنش خاک و دیوار و همچنین طبیعت حرکات ورودی بعنوان عوامل دینامیکی، بستگی دارد. روش‌های کلاسیکی که تاکنون در زمینه تحلیل دینامیکی دیوارهای حائل ارائه شده نظیر روش مونوبه-اکابه، مستقیماً قابل کاربرد برای تمامی دیوارهای حائل نبوده و بایستی در آنها تغییراتی اعمال شود که اینکار باعث ایجاد تقریبات قابل ملاحظه و تخمین‌های متفاوتی خواهد شد. هدف اصلی این تحقیق ارزیابی قابلیت اطمینان پایداری دیوارهای حائل بتنی طره‌ای تحت اثر بارهای لرزه‌ای براساس پارامترهای ژئوتکنیکی خاک اطراف دیوار، ارتفاع دیوار و بیش‌تیه زلزله می‌باشد. روش انجام تحقیق توسط



مطالعات کتابخانه‌ای و همچنین تحلیل و طراحی توسط نرم‌افزار PLAXIS می‌باشد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش بارامترهای مقاومتی خاک اطراف دیوار حایل طره‌ای نظیر مدول الاستیسیته و زاویه اصطکاک داخلی، نشست‌های این نوع دیوار در برابر شتاب ناشی از زلزله کاهش می‌یابد. با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک ساختگاه دیوار حایل طره‌ای به میزان ۳۳ به ۳۹ درجه، تغییر مکان خاک اطراف دیوار حایل به مقدار ۰.۰۰۰۲ متر کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش ارتفاع دیوار حایل طره‌ای تنش‌های وارده بر دیواره‌ی آن افزایش می‌یابد. به طوری که با افزایش ارتفاع دیوار به میزان ۲ متر تنش‌های ایجاد شده تحت نیروی زلزله حدود ۱۴ کیلونیوتن بر متر مربع افزایش می‌یابند. در هنگام وقوع زلزله، دیوارهای حائل که بر روی خاک نوع ۴ قرار دارند نشست کمتری نسبت به دیوارهایی دارند که بر روی خاک نوع ۲ واقع شده اند. با افزایش میزان بیشینه زلزله، تغییر مکان دیوارحائل و خاک اطراف آن افزایش می‌یابد. [۱۱].

جاوید و موحدی‌فر (۱۳۹۴)، در پژوهشی بیان داشتند که، سازه‌های ترتیبی دیوارهای میخ کوبی شده با دیوارهای مسلح شده مکانیکی نوعی از سازه‌های نگهبان جدید جهت جایگزینی خاک‌ریزهای موجود است که در قسمت جاده را از هم جدا می‌کنند. این دستگاه‌های مرکب به صورت معمول اجازه گسترش دادن دو قسمت جاده را با احداث یک مسیر جدید برای هر طرف جاده فراهم می‌کند و این در حالی است که در این روش استفاده از زمین‌های مجاور به حداقل میزان کاهش یابد. در این مقاله با بهره‌گیری از نرم‌افزار اجزای محدود PLAXIS 2D به بررسی رفتار دیوار مرکب میخ‌کوبی – مسلح شده مکانیک پرداخت شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تغییر در پارامترهای این دیوارها، در تغییر رفتار این سازه‌ها بسیار تاثیر گذار است [۱۲].



توکلی و همکاران ۱۳۹۶ به بررسی اثرات تغییر مکان ناشی از گودبرداری بر سازه مجاور در مناطق شهری پرداختند. در این تحقیق اهمیت درنظر گیری تغییر شکل‌ها در محیط اطراف محل گودبرداری و میزان تأثیر این تغییر مکان‌ها بر روی سازه‌های اطراف مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. برای این منظور از تقابل دو برنامه اجزاء محدود Etabs و Plaxis و مدل رفتاری خاک سخت شونده برای مصالح زمین استفاده شده است. برای لحاظ نمودن تأثیر سختی سازه مجاور از یک ساختمان بتنی با سیستم مهاربندی قاب خمشی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که سختی سازه مجاور تأثیر قابل توجهی در کنترل تغییر مکان زمین به علت گودبرداری دارد به طوری که سختی سازه مجاور باعث می‌شود تغییر مکان‌های افقی حداکثر در نواحی پایین دیواره گود اتفاق افتد در صورتی که در حالت بدون درنظر گیری سختی، تغییر مکان‌های افقی حداکثر در نزدیکی سطح زمین رخ می‌دهند. و همچنین با افزایش عمق گودبرداری، تأثیر سختی هم بیشتر شده و میزان تغییر مکان کاهش می‌یابد [۱۳].

حسنپور و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی تأثیر عمق خاکبرداری بر عملکرد گود و ساختمان مجاور با استفاده از اطلاعات میدانی مشخصات خاک و عمق گودبرداری در نقاط مختلف شهر، پرداختند. برای مدل سازی عددی گود مهار شده با سیستم نیلینگ از نرم افزار Plaxis استفاده شده است. به منظور مدل سازی دیواره گود و نیلینگ‌ها در شرایط کرنش مسطح از المان Plate استفاده گردیده که دارای دو مشخصه اصلی مقاومت خمشی (EI) و مقاومت محوری (EA) می‌باشد. در ابتدا تأثیر سه مدل رفتاری خاک مدل الاستوپلاستیک با معیار گسیختگی موهر کلمب، مدل خاک سخت شونده، مدل خاک سخت-شونده با اثر سختی ناشی از کرنش‌های کوچک که توسعه یافته‌ی



دل خاک سخت شونده است) مورد بررسی و مناسب ترین مدل معرفی شده و در ادامه تأثیر دو ساختمان ۲ و ۵ طبقه مجاور گود ارزیابی گردید. تغییرات نشست سطح زمین و به تبع آن تغییر شکل جانبی ساختمان تحت تأثیر دو عامل قرار دارد. عامل اول افزایش ۴ تغییر شکل دیواره گود است که منجر به افزایش نشست زمین به خصوص در نواحی مجاور گود می‌گردد. عامل دیگر وزن خروج از مرکزیت در ساختمان تأثیر قابل ملاحظه‌ای، به بعد H5/0 ساختمان می‌باشد به طوری که با افزایش عمق خاکبرداری از بر افزایش نشست فونداسیون و انحراف جانبی ساختمان خواهد داشت. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد با افزایش عمق خاکبرداری، تغییر شکل جانبی ساختمان و نشست فونداسیون در نزدیکی گود افزایش خواهد یافت [۱۴].

اویانگ و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بررسی تجزیه و تحلیل پایداری لرزه‌ای شیب تقویت شده با میخ با استفاده از روش کینماتیک پرداختند. پیش بینی ضریب شتاب لرزه‌ای بحرانی و جابجایی دائمی لرزه‌ای شیب تقویت شده توسط میخ تحت بار لرزه‌ای نقش مهمی در کمک به طراحی در مناطق لرزه خیز ایفا کرده است. در این مقاله، پایداری لرزه‌ای شیب تقویت شده با میخ با استفاده از قضیه کینماتیکی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. مکانیزم شکست مارپیچی در نظر گرفته شده و عبارات تحلیلی مربوطه برای محاسبه ضریب شتاب تسلیم لرزه‌ای بحرانی و جابجایی دائمی شیب در معرض بارگذاری زلزله در نظر گرفته شده است. یک سری محاسبات برای نشان دادن تأثیر نیروی اینرسی بر ثبات شیب تقویت شده با میخ انجام شده است. مطالعات پارامتری نشان می‌دهد که استحکام و هندسه شیب و پارامترهای مشخصه میخ اثر قابل ملاحظه‌ای بر ضریب شتاب لرزه‌ای بحرانی و جابجایی دائمی شیب تقویت شده با میخ دارد [۱۵].



فرخزاد و همکاران در سال ۲۰۲۱، به بررسی رفتار لرزه‌ای حفاری تقویت شده با روش میخ پرداختند. میخکوب کردن خاک یک روش تقویت خاک در محل است که برای افزایش پایداری دامنه‌های زمین، دیوارهای حایل و حفاری استفاده می‌شود. این تکنیک شامل نصب میخ‌های تقویت کننده در حفره‌های از پیش حفر شده است که ممکن است از نظر طول و زاویه حفاری متفاوت باشد. در این مقاله، اثرات طول و زاویه میخ‌های نصب شده بر رفتار لرزه‌ای حفاری‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور، یک مطالعه اجزای محدود پارامتریک انجام شد و تجزیه و تحلیل با استفاده از رکورد زلزله طبس (ایران، ۱۹۷۸) و منجیل (ایران، ۱۹۹۰) انجام شد. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که طول، زاویه و فاصله میخ در پاسخ شتاب و همچنین جابجایی‌های عمودی و افقی در سطح حفاری در طول تحریکات تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، نشان داده شده است که وزن سربار، نوع خاک و شتاب زلزله بر ثبات لرزه‌ای دیوارهای میخکوب شده خاک و ضریب تقویت تأثیر می‌گذارد. در قسمت پایانی، مطالعه موردی دیوار میخکوب شده برای پایداری گودال در "توحید سرای محله تهران" مورد بررسی قرار گرفته است [۱۶].

ساهو و همکاران در سال ۲۰۲۱، به بررسی آزمایش‌های میز لرزان برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای خاکریزهای تثبیت شده با میخکوب پرداختند. مجموعه‌ای از آزمایش‌های میز لرزان بر روی خاکریزهای میخ دار با ارتفاع ۰.۴ متر انجام می‌شود. پارامترهای مهم در نظر گرفته شده در این مطالعه شامل ترکیبی از سه زاویه مختلف شیب ($\beta = 30$ درجه، ۴۵ درجه، و ۶۰ درجه)، سه حالت مختلف ($i = 0$ درجه، ۱۵ درجه، و ۳۰ درجه)، و سه طول متفاوت ($l = 0.2$ ، ۰.۳ و ۰.۴ متر). این مطالعه نشان داد که تأثیر زاویه شیب بر مقاومت لرزه‌ای شیب‌های میخ دار با میخ بسیار



زیاد بود و حداقل میزان جابجایی رو به روی با شیب میخ ۰ و ۱۵ درجه برای شیب های میخ دار به ترتیب بدست آمد. به یک مدل شیب میخ دار با شیب میخ ۱۵ درجه باعث تقویت بهتر میخ های افقی و ۳۰ درجه شیبدار هنگام تثبیت شیب‌های خاک می شود [۱۷].

محمد زاکی و همکاران در سال ۲۰۱۵، به بررسی تجزیه و تحلیل میخکوبی خاک تحت بارگذاری زلزله در مالزی با استفاده از روش اجزای محدود پرداختند. میخکوب کردن خاک به یک روش پذیرفته شده تبدیل شده است و راه حلی عملی برای ساخت دیوار حائل دائمی، تثبیت شیب و حفاظت از برش‌های موجود در برابر خرابی ارائه می‌دهد. در مالزی، میخ کوب شدن خاک معمولاً در شیب بریده انجام می‌شود و به دلیل مشکل فرسایش، به عنوان روش پیشگیری با تزریق گروت نصب می‌شود. با این حال، اگرچه ممکن است کارایی سیستم میخکوب خاک توسط پمهندسان به خوبی درک شود، اما شکست شیب و فروپاشی حفاری عمیق به طور مداوم، به ویژه برای ساخت و ساز در منطقه لرزه خیز، رخ می‌دهد. مالزی تجربیات بی‌شماری از زلزله دارد، حتی این کشور در گروه لرزه خیزی کم طبقه بندی شده است. از این رو، در زمینه مهندسی ژئوتکنیک تجزیه و تحلیل و مطالعه تأثیر زلزله بر سیستم های میخکوب خاک در مالزی اهمیت یافته است. اهداف این مقاله تمرکز و مطالعه این موضوع فنی با استفاده از برنامه اجزا محدود است. این مطالعه تحقیقاتی PGA 0.08g را بر اساس موقعیت جمعیت اصلی در مالزی انتخاب می‌کند. ضریب ایمنی در این برنامه اجزای محدود با استفاده از کاهش phi-c محاسبه شد. میخکوب شدن خاک در شرایط لرزه ای پاسخ رضایت بخشی می‌دهد، بنابراین از روش شبه استاتیک برای مطالعه بارگذاری لرزه ای استفاده می‌شود. بر اساس نتایج تجزیه و تحلیل استاتیک، FOS برای حفاری عمیق تثبیت شده با میخکوب



شدن خاک ۱.۵۴ است. با این حال ، با در نظر گرفتن زلزله یا بار لرزه‌ای ، FOS به ۱.۱۶ کاهش می‌یابد و درصد کاهش حدود ۲۵ است [۱۸].

رضوی قزلجه و همکاران در سال ۱۳۹۷، به بررسی تحلیل لرزه‌ای پایداری شیروانی خاکی به روش ترکیبی انکراژ و شمع های بتنی پرداختند. خاک دارای رفتار بسیار پیچیده‌ای است و تعیین اینکه گودبرداری انجام شده تا چه عمقی می‌تواند ایمن باشد و از چه روش‌هایی برای پایدارسازی گود استفاده شود امری پیچیده خواهد بود لذا برای رفع مشکل ذکر شده از روش‌های ترکیبی در این پژوهش استفاده شد زیرا هر یک از روش‌های پایدارسازی گود به تنهایی دارای مزایا و معایبی می‌باشند اما هنگامی که به صورت ترکیبی به کار روند باعث بهبود در پایدارسازی گود می‌شوند. روش‌های بسیاری برای پایدارسازی گودها وجود دارد که از جمله آن می‌توان به روش انکراژ و شمع بتنی اشاره کرد. در این پژوهش سعی شده تا دو روش مذکور را با هم ترکیب کرده و به یک مدل بهتر، ایمن تر و اقتصادی تر برای ایجاد سازه نگهبان گود رسید تا بتوان آن را جایگزین روش‌های قدیمی تر و غیر ایمن و غیراقتصادی نمود. هدف این پژوهش تامین پایداری لازم برای گود از طریق ایجاد یک سازه نگهبان ترکیبی بهینه هست که زاویه و طول و چیدمانی بهینه برای انکرها و شمع ها بدهد. به نحوی که موجب گسیختگی و تغییر شکل مخرب در گود نشود، که به وسیله نرم افزارهای Abaqus و Plaxis مدل سازی انجام شده است. برای این منظور ابتدا باید روش انکراژ مدل سازی شود، سپس زمانی که نتایج مطلوب بدست آمد، شمع ها به سازه انکر شده اضافه می‌شود و نتایج روش انکراژ و روش ترکیبی باهم مقایسه می‌شوند. در این پژوهش میزان تغییر شکل های لرزه ای سازه نگهبان در گودبرداری های عمیق و توزیع تنش در انکرها در شرایط خاک چندلایه و در حالت



اجرای انکرها با زاویه ۱۵ درجه و با طول متفاوت ۱۵ و ۱۲ و ۱۰ و ۸ متری مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهده شد که استفاده از روش ترکیبی انکراژ و شمع بتنی در پایداری گود (مخصوصا گودهای عمیق) بسیار موثر عمل نموده است. همچنین بیشترین تاثیر مثبت این روش ترکیبی در بهبود رفتار لرزه ای گود می باشد که منجر به ایمنی بسیار بیشتر گود نسبت به حالت منفرد شده است [۱۹].

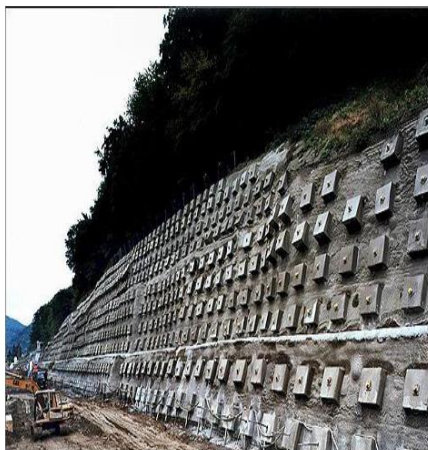
کاربردهای میخکوبی خاک در پروژه‌های مهندسی عمران

الف) پایداری ترانشه‌ها در احداث بزرگراه‌ها و راه آهن‌ها

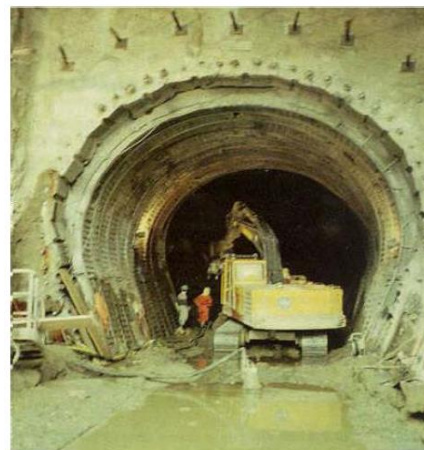
ب) پایداری جداره تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی

ج) پایدارسازی گودها در مناطق شهری و ایستگاه‌های زیرزمینی مترو

د) پایدارسازی کوله‌های مجاور پل‌ها در زمین‌های سست و ریزشی



(الف)



(ب)



(ج)



(د)

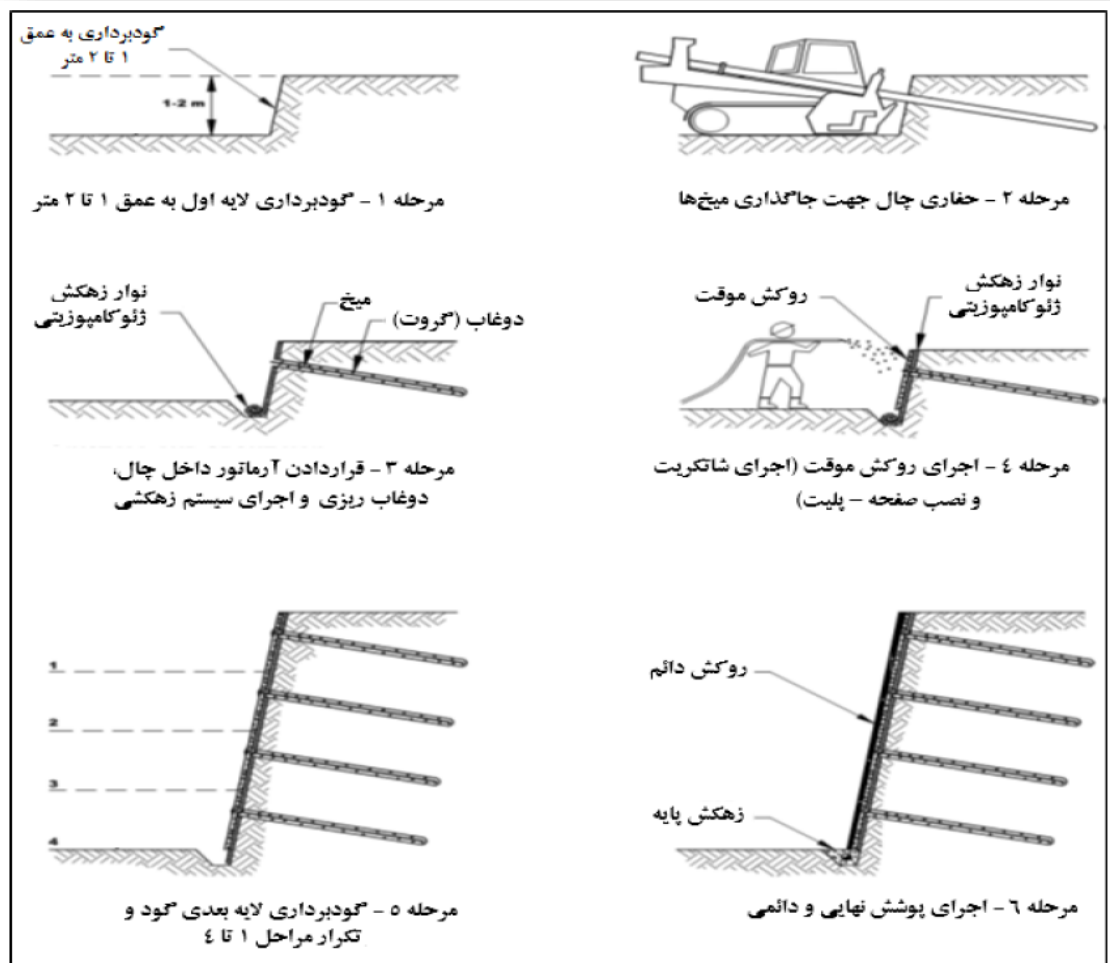
کاربردهای میخکوبی خاک (الف) پایداری ترانشه (ب) پایداری جداره تونل، (ج) پایداری گودها در محیط شهری، (د) پایداری کوله های مجاور پل ها

مراحل ساخت دیوارهای میخکوبی شده در خاک

مراحل گودبرداری و میخکوبی در خاک به صورت مرحله به مرحله انجام می شود که در اولین مرحله، گودبرداری اولیه تا عمقی انجام می شود که دیواره گودبرداری شده بتواند بدون هیچ مهاري پایداری خود را برای ۱ تا ۲ روز حفظ کند. سپس سوراخ هایی به طول، قطر و شیب مشخص حفر شده و میخ ها را در سوراخ های حفر شده جاسازی می کنند. جهت تنظیم و نگهداری امتداد میخ ها و تامین پوشش دوغاب دور میلگردها، داخل سوراخ های حفر شده، متمرکزکننده هایی تعبیه می شود. در این هنگام، یک لوله دوغاب ریزی را داخل سوراخ قرار داده و فضای خالی باقیمانده را با دوغاب پر می کنند سپس نوارهای زهکشی ژئوکامپوزیتی را جهت جمع آوری آب های زیرزمینی و انتقال آن به خارج از گود نصب می کنند. سپس روکش موقت به صورت پوشش شاتکریتی مسلح متشکل از شبکه میلگرد جوش داده شده اجرا می شود بعد از اینکه بتن شاتکریت بر روی سطح گود پاشیده شد، یک صفحه پلیت فولادی بر روی نوک میخ قرار داده می شود و از واشر و مهره



های شش گوش برای اتصال میخ به صفحه پلیت استفاده می شود. توجه شود که مدت ۹۰ ساعت لازم است تا بتن شاتکریت به مقاومت فشاری سه روزه برسد و سپس همین عملیاتی که به ترتیب گفته شد برای بقیه لایه های گودبرداری تکرار می شود.



مراحل اجرای میخکوبی در خاک



شرایط مساعد خاک جهت اجرای سیستم میخکوبی

سیستم دیوارهای خاکی میخکوبی شده در خاک‌های مختلفی با موفقیت اجرا شده است. عموماً در اینگونه خاک‌های مطلوب، سختی‌ها و پیچیدگی‌های ساخت بطور درازمدت وجود نداشته است. مواردی که میخکوبی خاک توجیه اقتصادی و تکنیکی داشته است عبارتند از:

خاکی که در آن گودبرداری شده است، قادر باشد برای مدت زمان ۱ تا ۲ روز بدون مهار شدن، پایداری خود را حفظ کند.

تمام میخ‌هایی که در بالای سطح آب زیرزمینی واقع شده‌اند.

چنانچه میخ‌هایی نیز زیر سطح آب زیرزمینی واقع شوند اما آب زیرزمینی به شکل ویرانگری بر روی سطح گود، مقاومت چسبندگی بین سطح اندرکنش گروت و خاک و یا سالم ماندن درازمدت میخ‌ها تاثیر نگذارد (مثلاً ویژگی‌های شیمیایی خاک، خوردگی را تشدید نکند).

در واقع شرایط خاک، هنگامی برای اجرای دیوار میخکوبی مطلوب فرض می‌شود که نتایج آزمون‌های محلی، صلاحیت خاک را تایید نمایند. آزمون نفوذ استاندارد (SPT) که عدد SPT-N را بدست می‌دهد، می‌تواند برای تعیین شرایط مطلوب خاک اعتمادپذیری لازم را داشته باشد. بر اساس معیارهای عمومی فوق‌الذکر، تقسیم‌بندی خاک‌های مطلوب برای اجرای دیوار میخکوبی بصورت زیر می‌باشد:

خاک‌های ریزدانه سخت تا مقاوم: خاک‌های ریزدانه (چسبنده) ممکن است شامل رس‌های سخت تا مقاوم، سیلت‌های رس‌دار، رس‌های لای‌دار، رس‌های ماسه‌دار، لای‌های ماسه‌دار و ترکیبی از



آنها باشد. بطور تجربی خاک های ریزدانه می توانند به عنوان خاک های سخت طبقه بندی شوند اگر عدد SPT-N خاک، حداقل برابر با ۳ ضربه به ازای ۹۲۲ میلیمتر باشد. با این حال برای تعیین مشخصات استقامتی خاک های ریزدانه، نباید منحصرأ به مقادیر SPT-N تکیه شود. در عوض، مشخصات استقامتی (مقاومت برشی) باید بوسیله دیگر آزمایش های محلی یا آزمایشگاهی تهیه شود. برای به حداقل رساندن جابجایی های افقی درازمدت دیوار خاکی میخکوبی شده، خاک های ریزدانه باید خاصیت خمیری نسبتاً کمی داشته باشند (یعنی بطور کلی $PI < 15$).

خاک های دانه ای متراکم تا خیلی متراکم با کمی چسبندگی ظاهری: اینگونه خاک ها شامل ماسه و شن با SPT-N بزرگتر از ۹ می باشند و همچنین با مقداری ریزدانه (معمولاً ۱۰ تا ۱۵ درصد) یا با سیمان طبیعی برای تامین چسبندگی همراه هستند. نیروهای موئینگی در ماسه های ریز مرطوب ممکن است یک چسبندگی ظاهری ایجاد نماید؛ بطور کلی، چسبندگی ظاهری برای این نوع خاک ها باید بزرگتر از ۵ کیلوپاسکال باشد تا زمان خود پایداری معقولی را تضمین نماید. برای جلوگیری از قطع شدید نیروهای موئینگی و بواسطه آن کاهش در چسبندگی ظاهری، لازم است جریان آب به سمت سطح گودبرداری به حداقل برسد که این عمل می تواند از طریق تغییر دادن مسیر جریان آب انجام شود.

سنگ هوازده بدون صفحات سست: سنگ هوازده به شرطی می تواند یک تکیه گاه مناسب برای میخ ها تامین نماید که صفحات سست در جهت های نامطلوب زیاد نباشند. همچنین مطلوب است که درجه هوازده در کل سنگ تقریباً یکنواخت باشد تا تنها یک روش مته زنی و نصب نیاز شود. برعکس تغییرات زیاد در هوازده سنگ در یک ساختگاه، ممکن است مستلزم تغییرات در تجهیزات



مته کاری و یا روش های نصب شود که در نتیجه باعث افزایش هزینه اجرای سیستم میخکوبی می شود.

رسوبات یخچالی: این خاک ها معمولاً برای اجرای دیوار میخکوبی مناسب هستند. به دلیل آنکه معمولاً متراکم، خوب دانه بندی شده و با مقدار محدودی ریزدانه همراه هستند.

شرایط نامناسب و مشکل ساز میخ کوبی خاک (نیلینگ)

موارد نامناسب و شرایط دشوار زمین جهت میخ کوبی خاک عبارتند از:

خاک های خشک و فاقد چسبندگی

وجود آب زیرزمینی زیاد

خاک های دارای تخته سنگ و قلوه سنگ (به دلیل مشکلات حفاری)

خاک های ریزدانه نرم تا خیلی نرم

خاک های آلی

خاک های خورنده یا آب زیرزمینی اسیدی

سنگ های هوازده و دارای صفحات ضعیف و آهکی



انواع میخ ها و روش های نصب آنها

هر چند رویه متعارف نصب میخ ها شامل حفر سوراخ با مته و سپس جاسازی و دوغاب ریزی میخ ها می باشد ولی دیگر روش های نصب میخ به صورت خلاصه وار معرفی می شود که عبارتند از:

مته کاری و دوغاب ریزی میخ ها: در این روش سوراخ هایی به قطر تقریبی ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلیمتر در خاک حفر می شوند که فاصله سوراخ ها از همدیگر حدود ۱/۵ متر می باشد. میلگردهای فولادی درون سوراخ ها جاسازی شده و سپس درون سوراخ ها دوغاب ریزی می شود. در این روش میخ ها توسط دوغاب در برابر خوردگی محافظت می شوند. میخ های دوغاب ریزی شده، رایجترین میخ ها در پروژه های FHWA بوده اند و می توانند در کاربردهای موقت و دائمی استفاده شوند.

میخ های کوبیده شده: قطر این نوع از میخ ها نسبتاً کم است (۱۹ تا ۲۵ میلیمتر). و به طور مکانیکی داخل زمین کوبیده می شوند. فاصله میخ ها از یکدیگر معمولاً ۱ تا ۱/۲ متر می باشد. نصب این میخ ها نسبتاً سریع و ساده است ولی بدلیل عدم محافظ بودن میخ ها در برابر خوردگی، از این روش تنها برای کاربردهای موقت استفاده می شود. در حال حاضر از این روش در پروژه های FHWA به کار گرفته نمی شود.

میخ های خود حفار: این نوع از میخ ها شامل میلگردهای توخالی می باشد که می توانند در یک عملیات، هم حفاری کنند و هم دوغاب ریزی شوند. در این روش، دوغاب از میان میلگرد توخالی همزمان با مته کاری تزریق می شود. نصب در این روش، سریعتر از روش مته کاری و سپس دوغاب ریزی می باشد و بر خلاف روش میخ های کوبیده شده، تا حدودی حفاظت در برابر خوردگی توسط



دوغاب فراهم می شود. این روش بیشتر برای سیستم های میخکوبی موقت به کار میرود. در حال حاضر این روش در پروژه های FHWA به کار گرفته نمی شود.

میخ های فواره ای دوغاب ریزی شده: میخ های با تزریق فورانی، عناصری متشکل از خاک تحت تزریق با یک میله فولادی مرکزی می باشند. در این روش میخ ها با استفاده از چکش های کوبشی لرزه ای با فرکانس زیاد (تا ۷۰ هرتز) نصب شده و تزریق سیمان هم در طی نصب صورت می گیرد. در حال حاضر این روش در پروژه های FHWA به کار گرفته نمی شود.

شلیک میخ ها: در این روش، میلگردها با سرعت بسیار زیادی با استفاده از مکانیسم هوای فشرده، به درون خاک شلیک می شوند. قطر میلگردها معمولاً بین ۱۹ تا ۲۵ میلیمتر و طول حدود ۸ متر می باشد. این روش نصب بسیار سریع بوده و کمترین ضربه را به ساختگاه پروژه وارد می کند. ولی ممکن است کنترل طول نفوذ میخ در خاک، دشوار باشد. در حال حاضر این روش در پروژه های FHWA به کار گرفته نمی شود.

انواع مدهای گسیختگی مربوط به دیوارهای میخکوبی شده در خاک

در واقع گسیختگی دیوارهای میخکوبی شده توسط یکی از مدهای گسیختگی زیر رخ می دهد و هر کدام از این مدهای گسیختگی، شامل چندین حالت می باشد که عبارتند از:

مدهای گسیختگی خارجی (External Failure Modes)

گسیختگی پایداری کلی (Global Stability Failure)



گسیختگی پایداری لغزشی (Sliding Stability Failure)

گسیختگی ظرفیت باربری (Bearing Failure)

مدهای گسیختگی داخلی (Internal Failure Modes)

گسیختگی از جا درآمدگی میخ (Nail-Soil Pullout Failure)

گسیختگی لغزشی بین میخ و دوغاب (Bar-Grout Pullout Failure)

گسیختگی کششی میخ (Nail Tensile Failure)

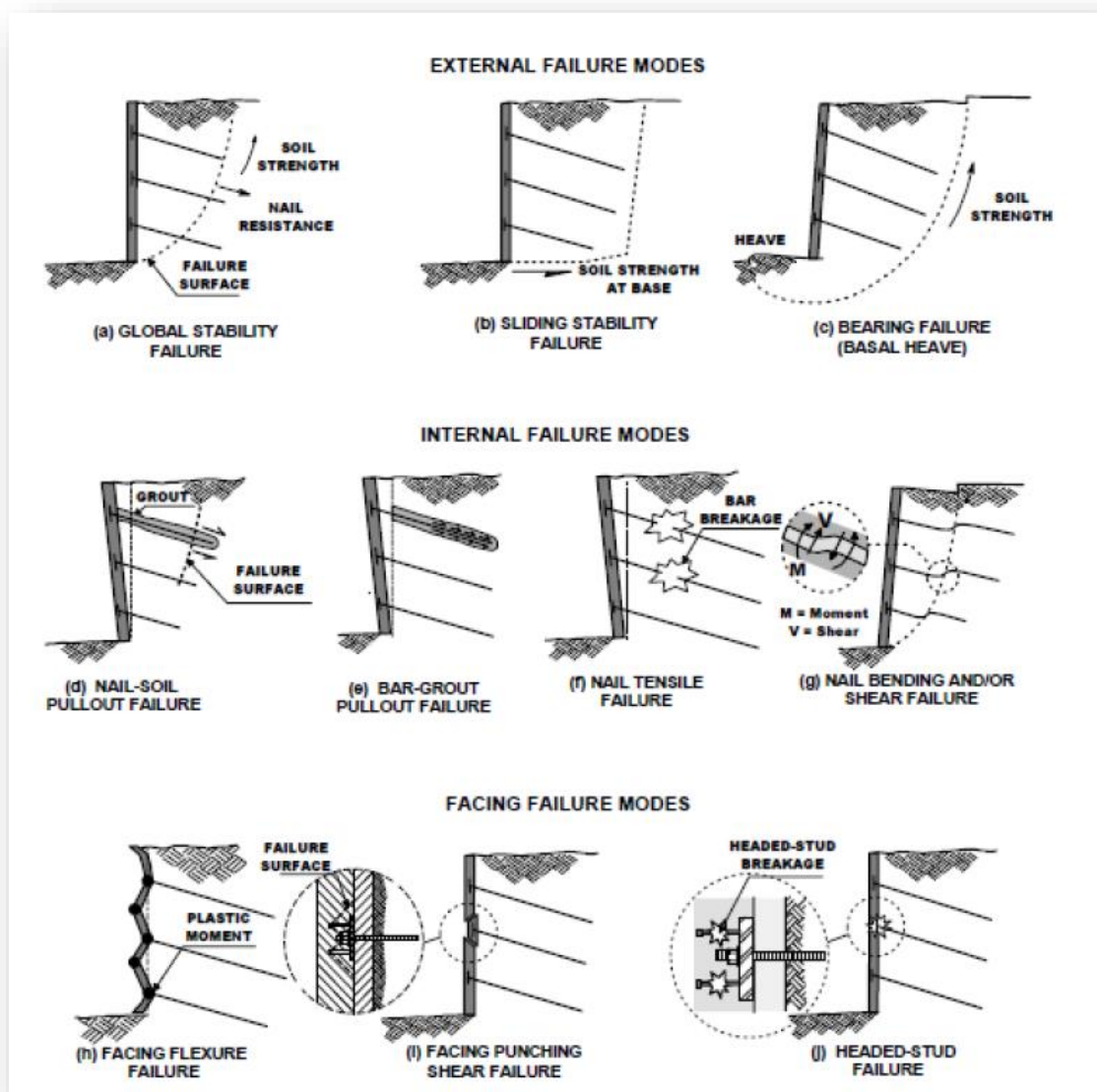
گسیختگی خمشی و برشی میخ (Nail Bending and/or Shear Failure)

مدهای گسیختگی رویه دیوار (Facing Failure Modes)

گسیختگی خمشی رویه دیوار (Facing Flexure Failure)

گسیختگی برش سوراخ کننده رویه دیوار (Facing Punching Shear Failure)

گسیختگی کششی گل میخ ها (Headed-Stud Failure)



مدهای اصلی گسیختگی سیستم های میخکوبی شده در خاک



اجزای اصلی دیوارهای میخ کوبی شده (نیلینگ)

روش عمومی اجرای میخ کوبی در خاک (نیلینگ) بدین ترتیب است که ابتدا سوراخی جهت قرار دادن آرماتور فولادی (Nail) در دیوار حفر گردیده، پس از قرار دادن آرماتور در چال، داخل چال و پیرامون آرماتور، دوغاب و مهره روی سر رزوه شده نیل نصب میگردد. سیمان به صورت ثقلی و یا با فشار تزریق می شود. سپس سطح دیواره با مش فولادی و شاتکریت بتنی پوشانده شده و صفحات فلزی و مهره روی سر رزوه شده نیل نصب می گردد.

عناصر به کار رفته در روش میخ کوبی خاک شامل موارد زیر می باشند:

آرماتور فولادی (به صورت معمول میلگرد آجدار تیپ ۳ بزرگتر از شماره ۲۵)

دوغاب سیمان

سر رزوه شده (پیچ دار) آرماتور

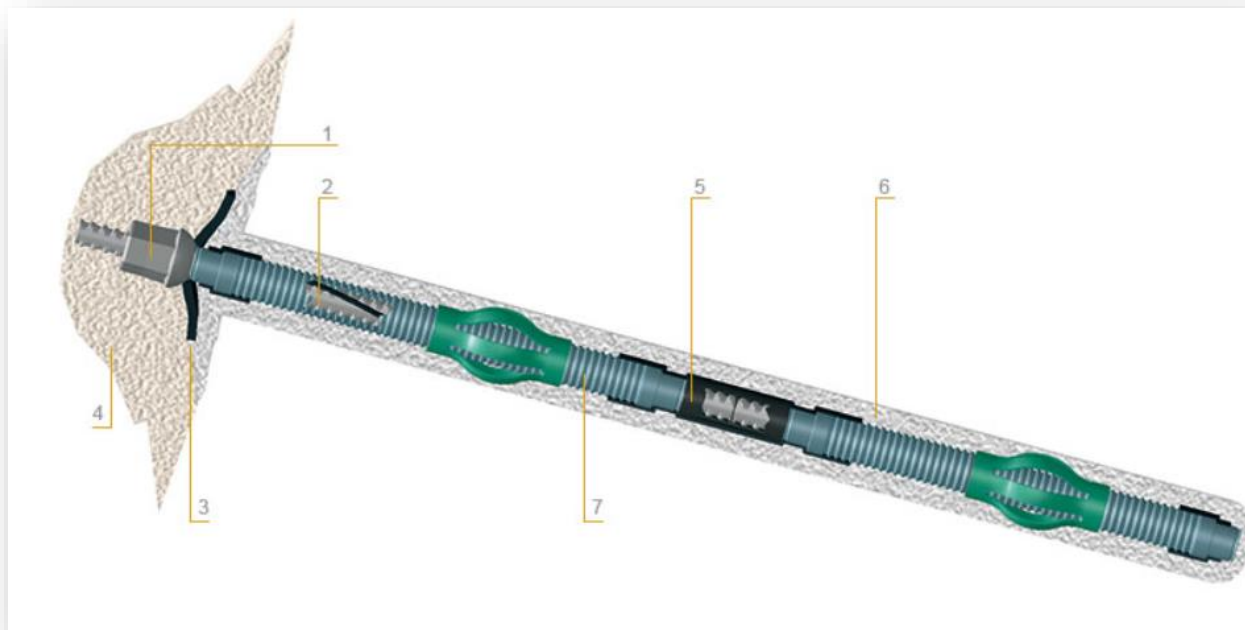
مهره، واشر زاویه دار و صفحه فلزی

پوشش موقت و دائم (پوشش موقت به صورت معمول شامل یک لایه مش فولادی و لایه بتن پاشیده

شده بر روی آن با ضخامت معمول ۱۰ سانتیمتر می باشد، همچنین پوشش دائم در ایران صرفاً

جهت پایدارسازی دائمی استفاده می گردد)

نوار زهکشی ژئوکامپوزیتی



اجزای نیلینگ

تجهیزات و ماشین آلات نیلینگ

دریل واگن

روش های نیلینگ دریل واگن نوع دیگری از سیستم حفاری ضربه ای است که چالزن از طریق تسمه ها به دکل نصب گردیده و به صورت خشاب وار بر روی دکل بالا و پایین می شود و مجموعه دکل و چالزن بر روی ارابه ای دو یا سه چرخ لاستیکی سوار گردیده اند که به همین دلیل به آن دریل واگن می گویند.

روش های نیلینگ دریل واگن با زاویه های مختلف می تواند چال حفر کند و در مجموع حفر چال با دریل واگن در مقایسه با انواع چکش های حفاری در شرایط یکسان از نظر سنگ با سهولت



و کیفیت بهتری صورت می گیرد. از دریل واگن می توان برای حفر چال هایی با عمق تا ۴۵ متر (۱۵۰ فوت) و قطر تا ۴.۵ اینچ برای سنگ های نیمه سخت و سخت استفاده کرد . اما به طور رایج عمق چال هایی که با دریل واگن حفاری می شوند تا ۹ متر (۳۰ فوت) است. طول لوله حفاری با توجه به نوع ایجاد کننده تراست و دریل واگن متفاوت است.

دریل واگن

بعضی از دریل واگن ها پایه های زنجیری دارند. علت استفاده از پایه های زنجیری، سرعت در انتقال آنها بخصوص در شرایط صعب العبور است. این نوع دریل واگن ها قادر هستند چال هایی با قطر تا ۶ اینچ (۱۵ سانتی متر) را حفاری کنند. آن دسته از دریل واگن ها را که پیش از یک چالزن دارند را جامبو دریل می نامند که در سرعت عملیات بسیار موثراند و در حفر تونل غالبا از آنها استفاده می شود.



دریل واگن



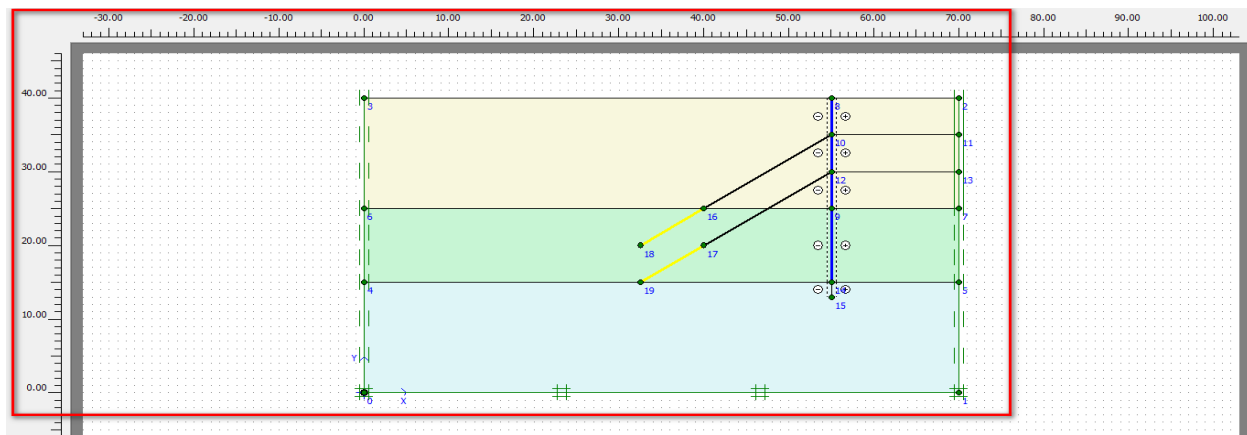
آنالیز ابعادی یا شبیه سازی در مدلسازی فیزیکی

جهت استفاده از مدلسازی فیزیکی باید اشراف کاملی به تئوریهای آنالیز ابعادی و قوانین تشابه داشت. مطابق قوانین آنالیز ابعادی و تشابه به طور خالصه میتوان گفت که چنانچه بتوان با بررسی پارامترهای موثر بر مدل آزمایشگاهی و با کمک یک سری گروه‌های بی بعد (بدون دیمانسیون) تشابه هندسی، سینماتیکی و دینامیکی بین مدل آزمایشگاهی با نمونه واقعی برقرار کرد، در این صورت میتوان نتایج حاصله را به نمونه اصلی تعمیم داد. در کنار برتری‌هایی که مدلسازی فیزیکی نسبت به روشهای اجرایی و مدلسازی عددی دارد، به دلیل خطاهای مقیاس بندی نسبت به واقعیت، ممکن است با پاسخهای کاملاً درستی همراه نباشد و نتواند رفتار واقعی سازه را نشان دهد. این خطاهای مقیاس بندی در مواردی شامل فاکتورهای هندسی، جابه‌جایی و دینامیکی ظاهر میشود و جهت کاهش آن بر روی نتایج و رفتار سازه، محققانی همچون باکینگهام یشگام بودند. مطابق با روش آنها ابتدا الزم است رفتار واقعی سازه‌ی مورد نظر درک شود، سپس متغیرهایی که تاثیر قابل توجهی بر روی عملکرد سیستم دارند شناسایی شده و به عنوان مولفه‌های ورودی جهت آنالیز ابعادی در نظر گرفته شوند و در نهایت بتوانند رفتار مدل را منطبق با واقعیت شرح دهند. متغیرهای اصلی و موثر در این روش، مولفه‌های زمان، جرم و طول هستند به طوری که با تشکیل گروه‌های بی بعد با استفاده از این مولفه‌ها و متغیرهای مورد نیاز جهت بررسی مسئله و حل معادلات خطی، می‌توان آنالیز ابعادی مورد نظر را به دست آورد.

مدلسازی در نرم افزار

یکی از روشهای رایج پایدارسازی گودهای عمیق استفاده از ترکیب دو روش نیلینگ و انکراژ میباشد. در ایجاد مدل اولیه سعی براین میشود که مدل تا حد امکان براساس توصیه‌های FHWA پیرامون نیلینگ و انکراژ هم در زمینه مسایل اجرایی و مسایل پیرامون طراحی در مدل اولیه در نظر گرفته شود.

جهت تحلیل مدل‌ها در این تحقیق از PLAXIS دوبعدی استفاده گردیده که مشخصات خاک و مدل اولیه در ادامه ارائه خواهد گردید. در مدل تحلیلی خاک در این گودبرداری مدل شده با توجه به شرایط ذکر شده توسط چانز، ورمیر، بونیر در نظر گرفته شده است. جهت حداقل انطباق نتایج با واقعیت، برای مدلسازی اولیه، از گودبرداری به عمق ۴۰ متر در که به روش ترکیبی نیلینگ و انکراژ پایدارسازی میشود که در شکل ۲ نمایی از پایدارسازی این گود مشاهده میشود، سپس مشخصات لایه های خاک دریافت گردید و با توجه به مساحت پروژه و تعداد گمانه ها، مشخصات خاکی که در تماس با سطوح انکر و نیلها میباشد مشخص گردید، که البته با توجه به هزینه های نمونهبرداری خاک، چیدمان لایه بندی و مشخصات خاک مربوط به هر لایه اکثرا دارای تخمینی میباشد از جمله شامل مشابه دانستن وضعیت خاک داخل گودبرداری با لایه های خاک پشت دیواره گودبرداری که با قبول عدم قطعیتها و تخمینهای موجود مشخصات



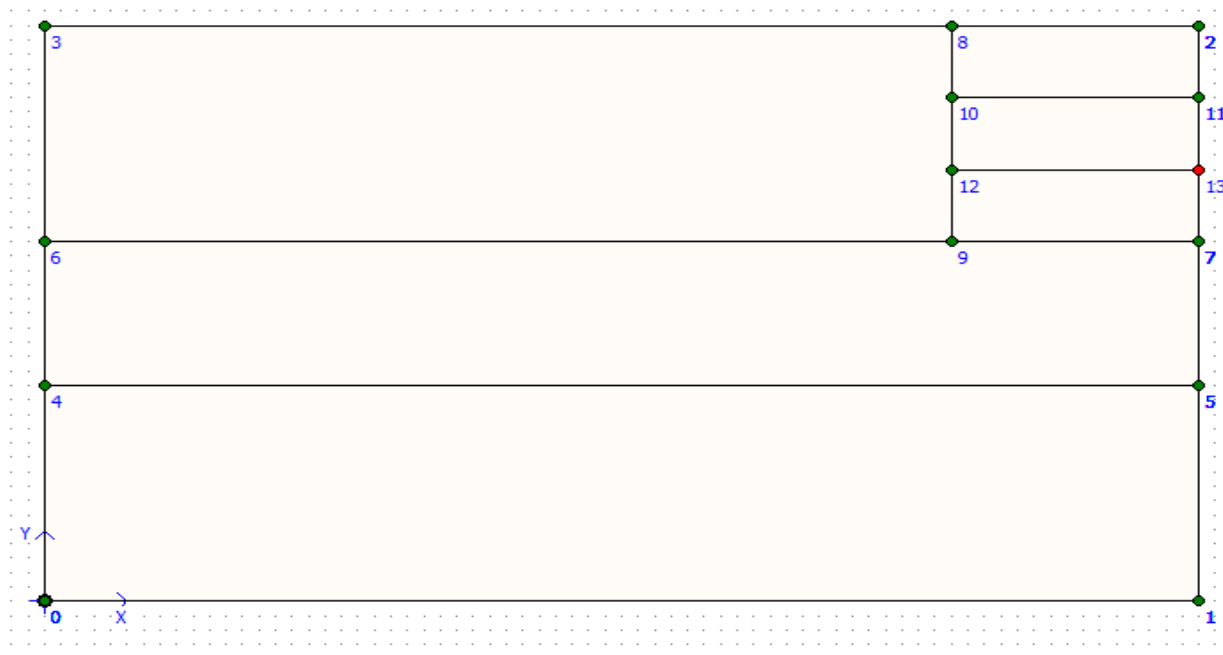
هندسه مدل

مشخصات لایه ها



مشخصات		لایه	مشخصات		لایه
۶	ضخامت متوسط لایه (m)	لایه دوم	۲	ضخامت متوسط لایه (m)	لایه خاک دستی
۰/۱	چسبندگی (kg/cm^2)		۰/۰۵	چسبندگی (kg/cm^2)	
۳۴	زاویه اصطکاک داخلی (Deg)		۳۰	زاویه اصطکاک داخلی (Deg)	
۱/۹	وزن مخصوص مرطوب (gr/cm^3)		۱/۷	وزن مخصوص مرطوب (gr/cm^3)	
۴۰۰	مدول یانگ (kg/cm^2)		۳۰۰	مدول یانگ (kg/cm^2)	
۱۰	ضخامت متوسط لایه (m)	لایه چهارم	۶	ضخامت متوسط لایه (m)	لایه سوم
۰/۱	چسبندگی (kg/cm^2)		۰/۰۵	چسبندگی (kg/cm^2)	
۳۵	زاویه اصطکاک داخلی (Deg)		۳۵	زاویه اصطکاک داخلی (Deg)	
۱/۹	وزن مخصوص مرطوب (gr/cm^3)		۱/۹	وزن مخصوص مرطوب (gr/cm^3)	
۵۰۰	مدول یانگ (kg/cm^2)		۵۰۰	مدول یانگ (kg/cm^2)	
			۰	چسبندگی (kg/cm^2)	لایه تحتانی
			۳۶	زاویه اصطکاک داخلی (Deg)	
			۱/۹۵	وزن مخصوص مرطوب (gr/cm^3)	
			۷۰۰	مدول یانگ (kg/cm^2)	

ساخت هندسه

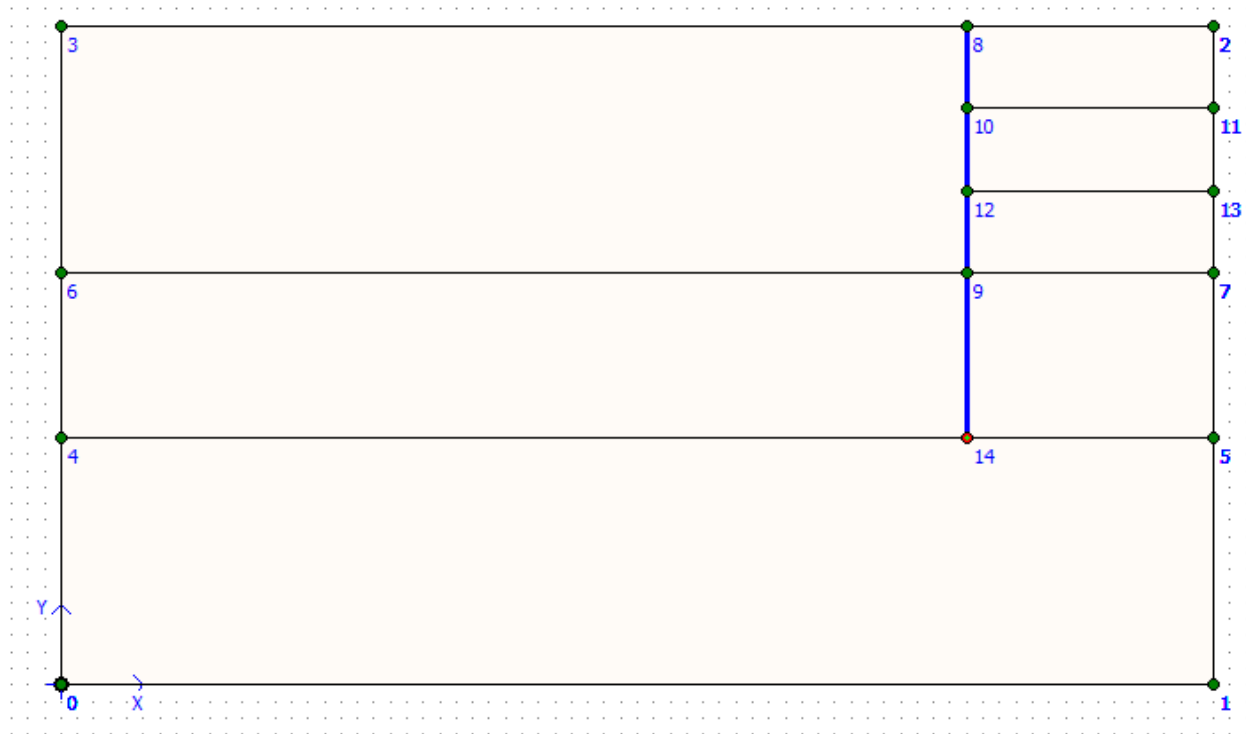


ساخت هندسه مدل



ساخت دیوار بتنی

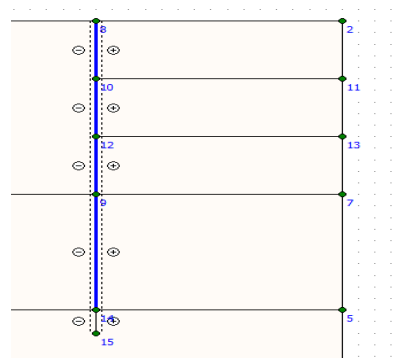
از ابزار Plate استفاده می‌کنیم.



ساخت دیوار بتنی

چون دیوار سپری از مصالحی غیر از خاک می‌باشد لذا با خاک اطراف آن اندرکنش دارد. برای در نظر گرفتن

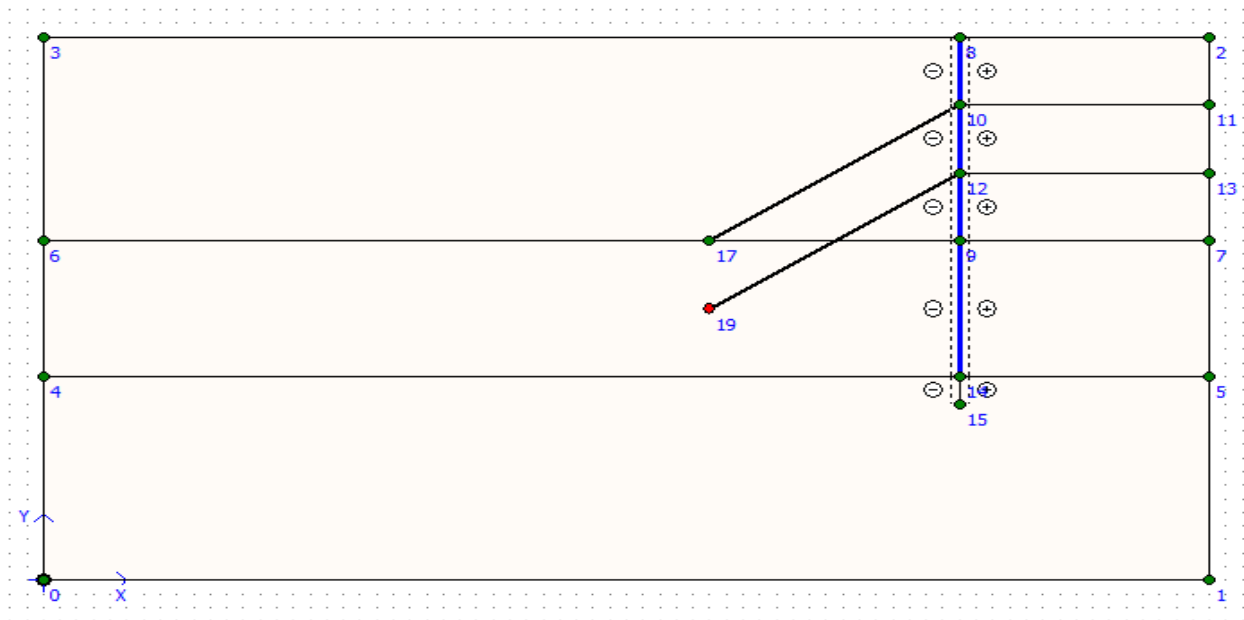
اندرکنش دیوار و خاک از المان Interface استفاده کنیم.



المان دیوار بتنی

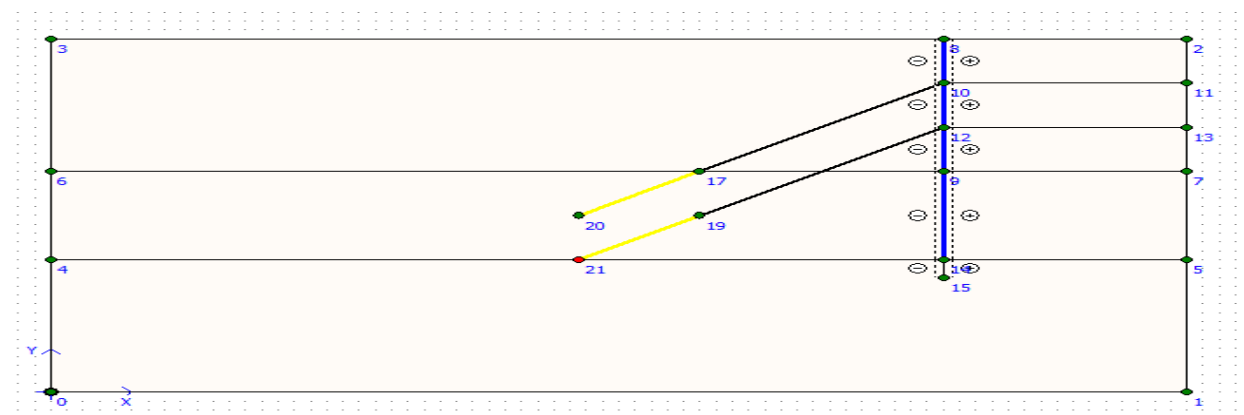


برای ترسیم المان انکر ابتدا بخش مهار نشده را با استفاده از ابزار Node-to-node anchor ترسیم کرده و بخش مهار شده را با استفاده از المان GEOGRID ترسیم می‌کنیم.



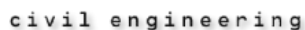
رسم انکر بخش مهار نشده

برای ترسیم بخش مهار شده انکرها المان GEOGRID را از نوار ابزار (Geometry) انتخاب می‌کنیم.



بخش المان مهار شده

پس از تکمیل هندسه‌ی مدل روی ابزار standard fixities کلیک می‌کنیم تا شرایط مرزی به صورت خودکار توسط برنامه ایجاد شود.

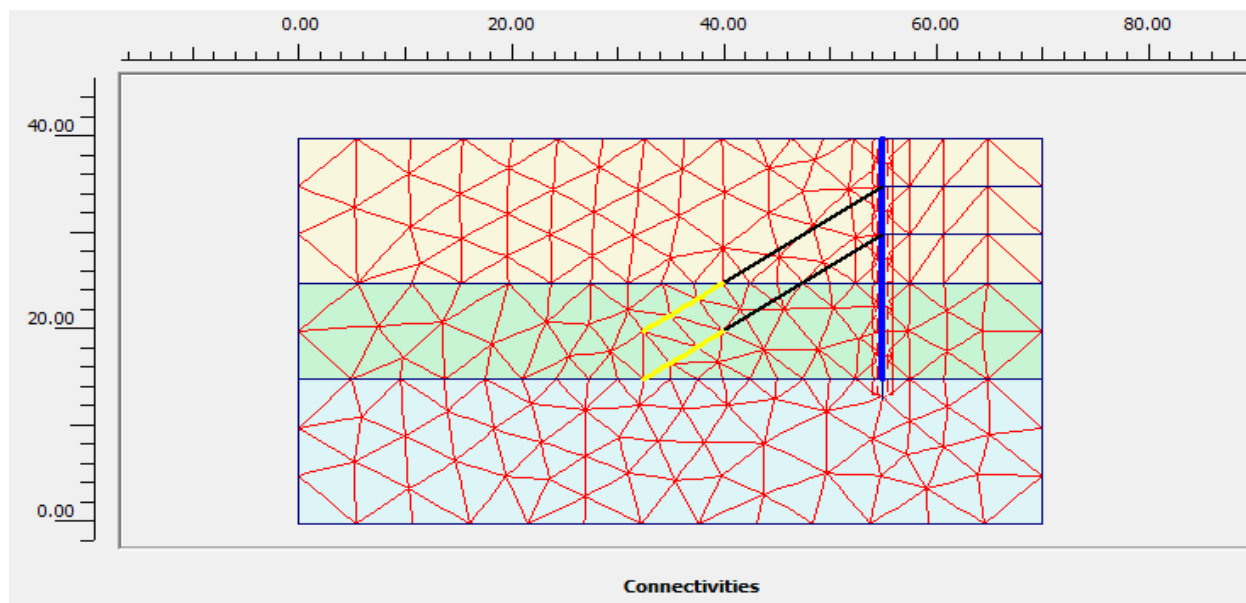


42



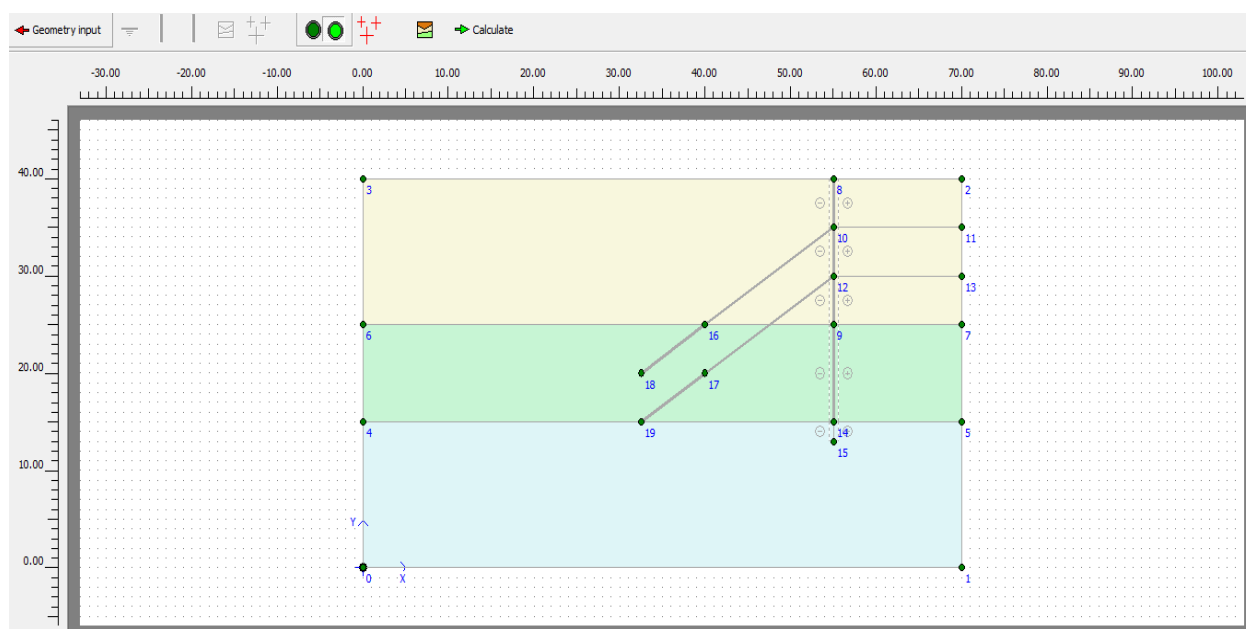


مش بندی

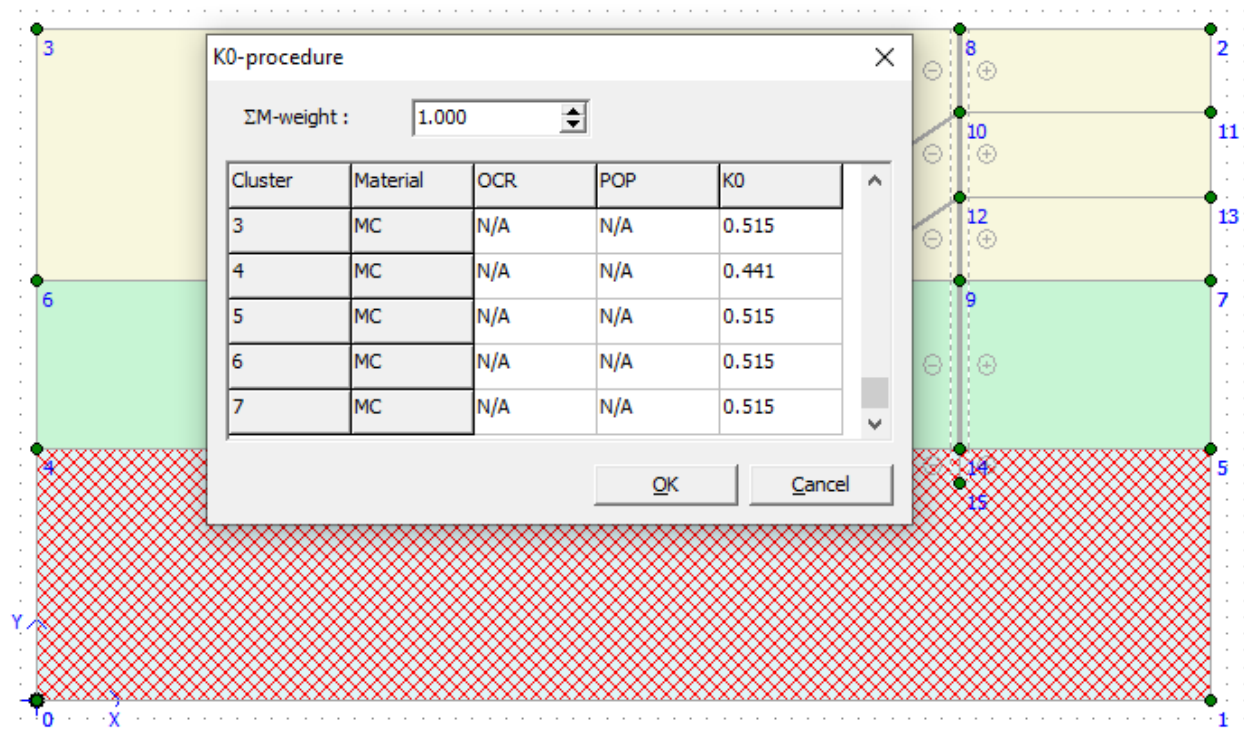


مش بندی مدل

ایجاد شرایط اولیه در مدل



برای ایجاد تنش های برجا از روش K_0 استفاده می نماییم.



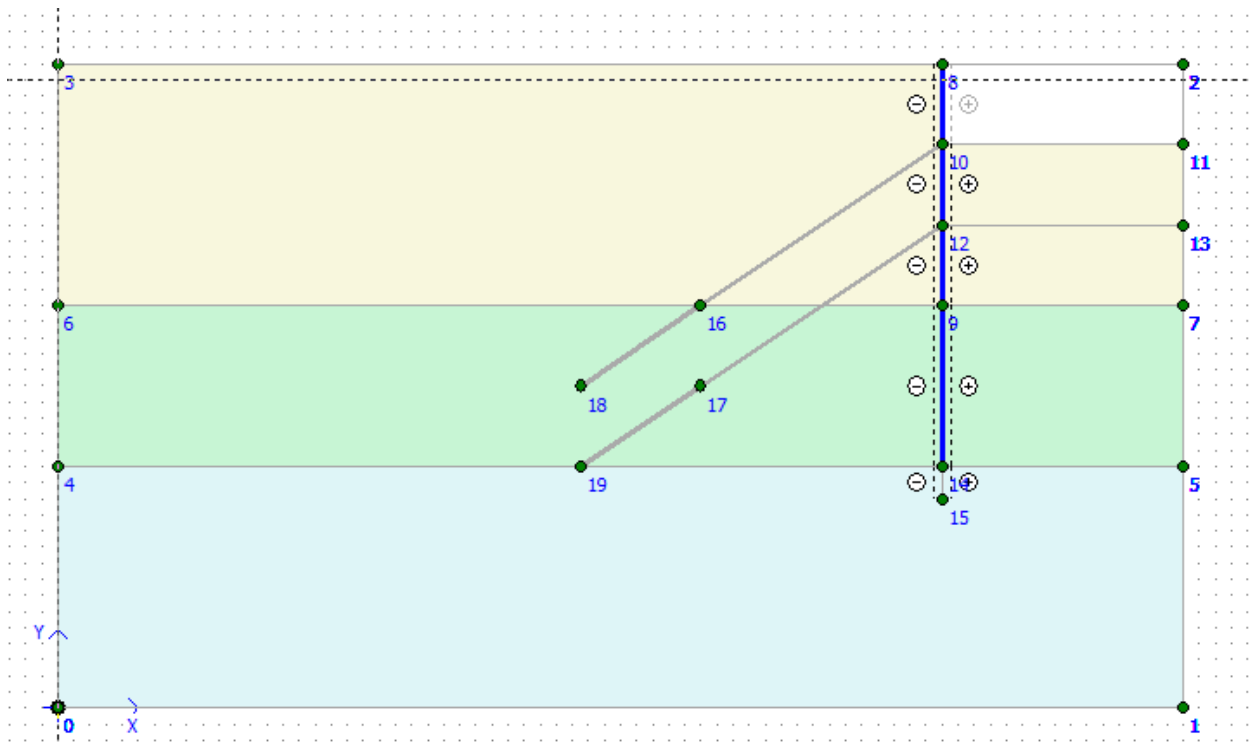
ایجاد شرایط اولیه در مدل

تحلیل مدل

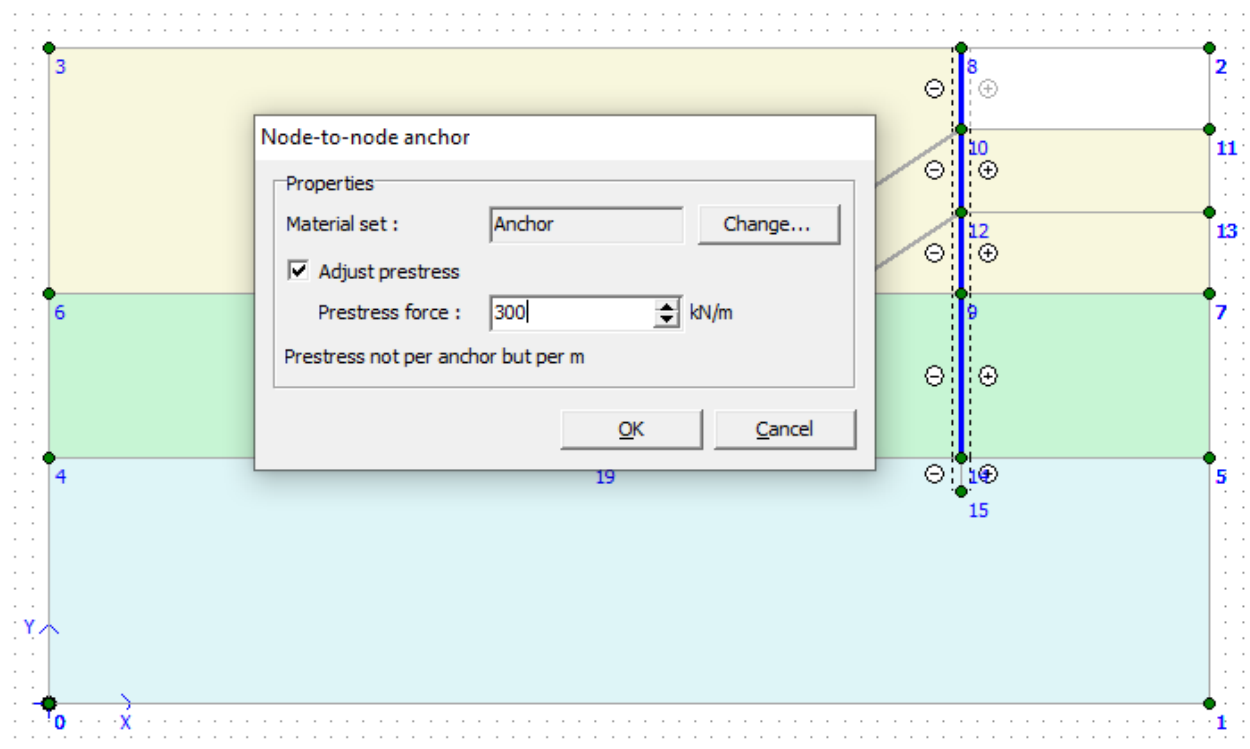
اولین فاز تحلیل مربوط به ایجاد دیوار بتنی می‌باشد. یک فاز با نام Wall + Excavation از نوع تحلیل پلاستیک ایجاد کرده و با کلیک روی دکمه Define در سربرگ Parameters وارد پنجره تغییرات می‌شویم. سپس دیوار بتنی و Interface های اطراف و انتهای دیوار را با کلیک روی آنها فعال می‌کنیم و گام اول حفاری را ایجاد می‌کنیم.

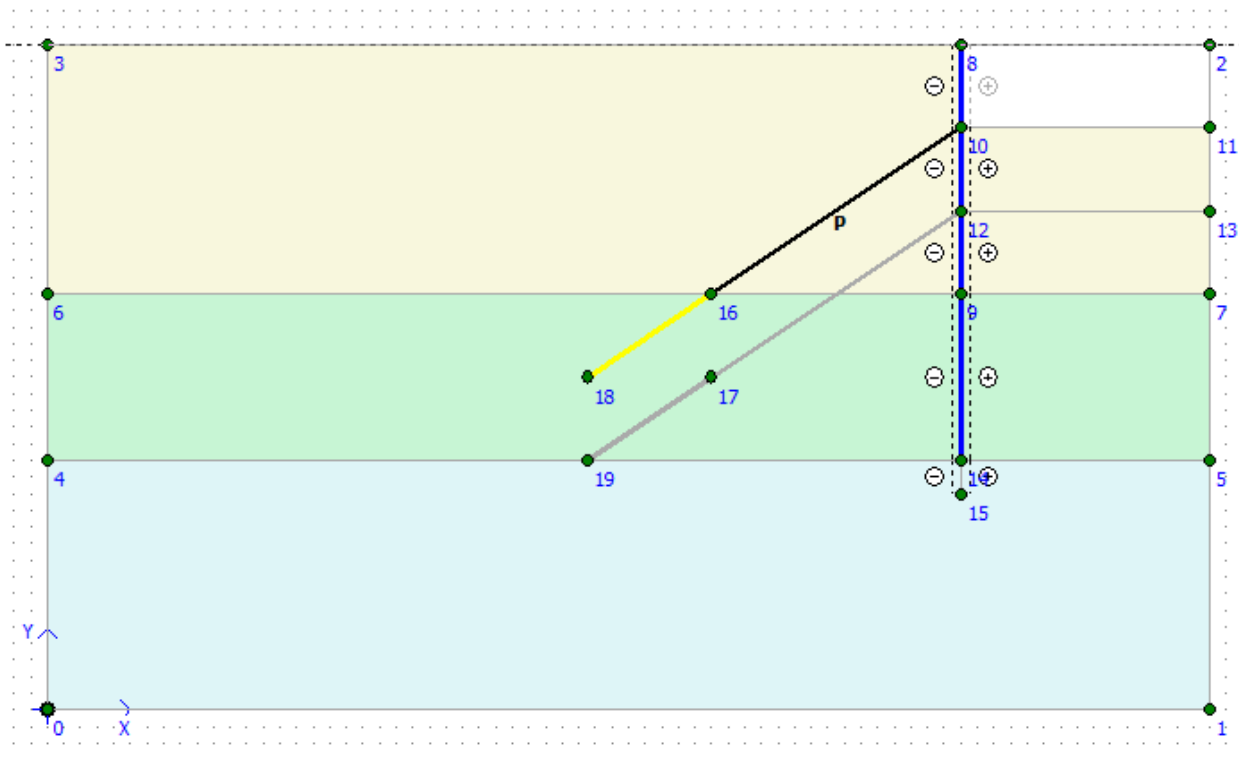
در فاز بعدی انکر اول را ایجاد کرده و آن را پیش تنیده می‌کنیم.

برای پیش تنیده کردن انکر اول یک فاز به نام Anchor1 از نوع تحلیل پلاستیک (Plastic Analysis) ایجاد می‌کنیم.

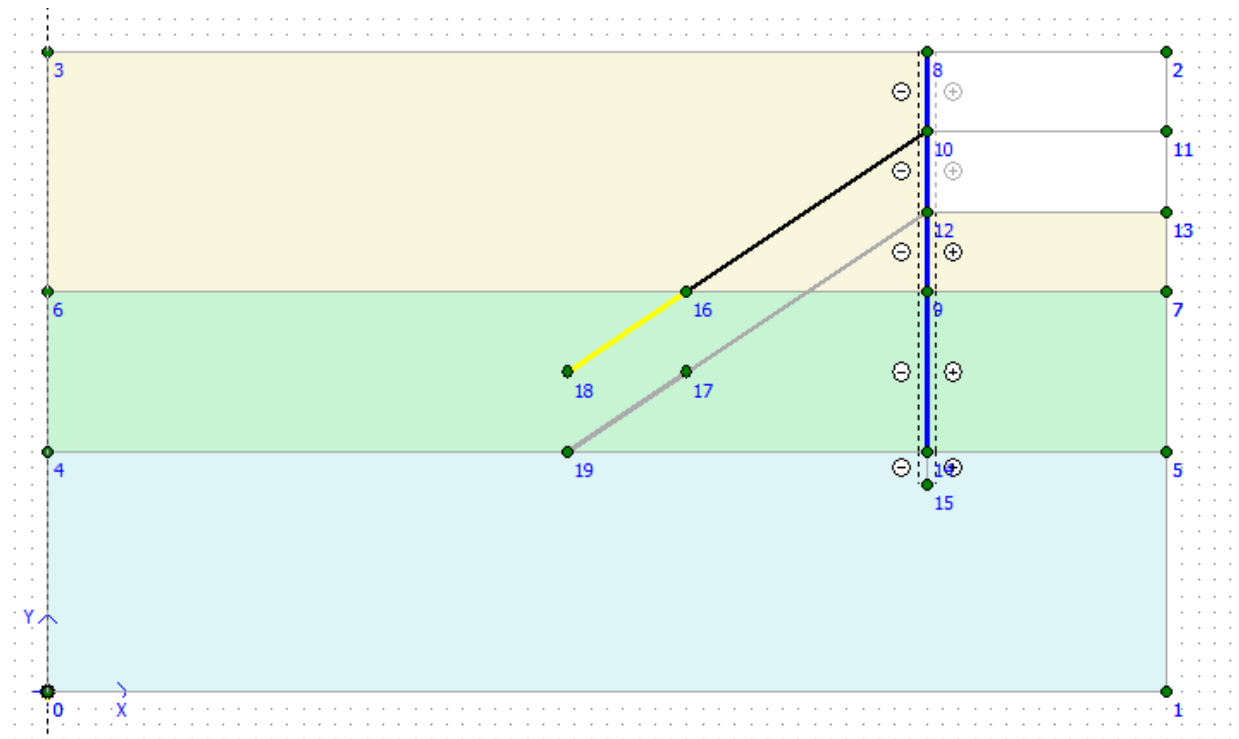


فاز اول تحلیل

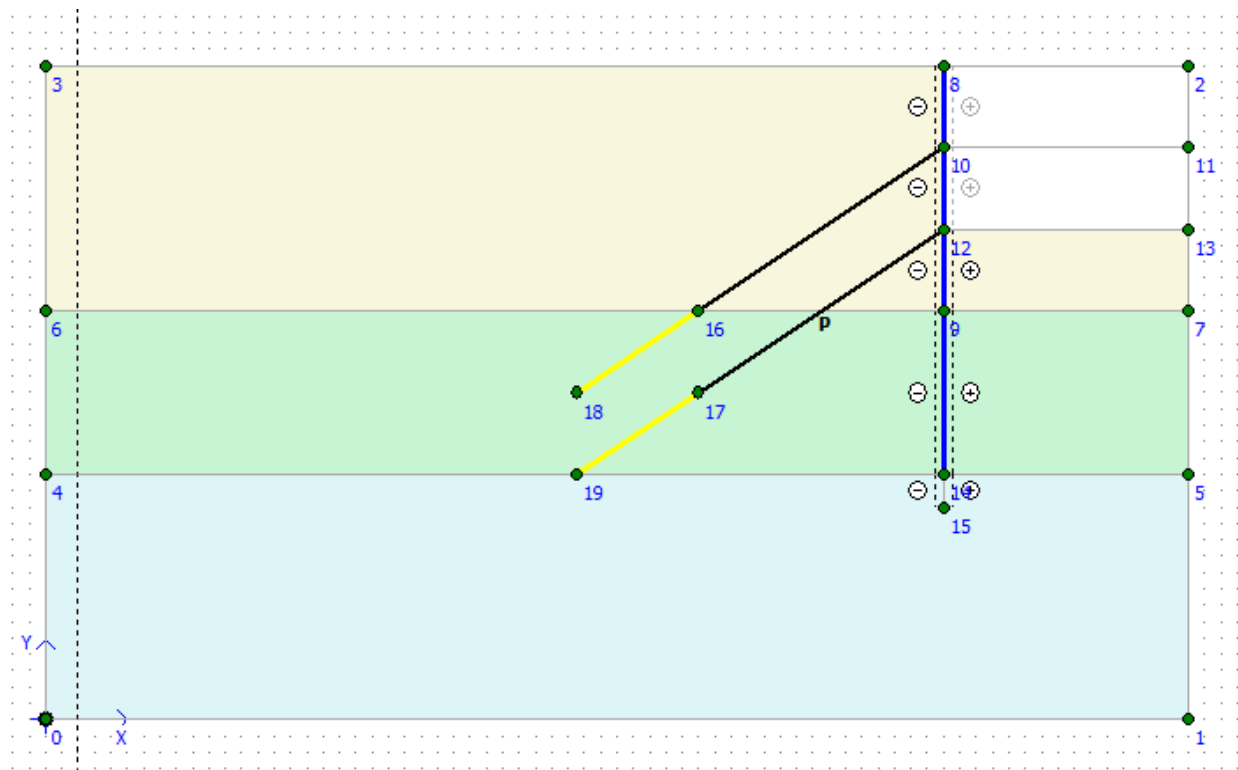




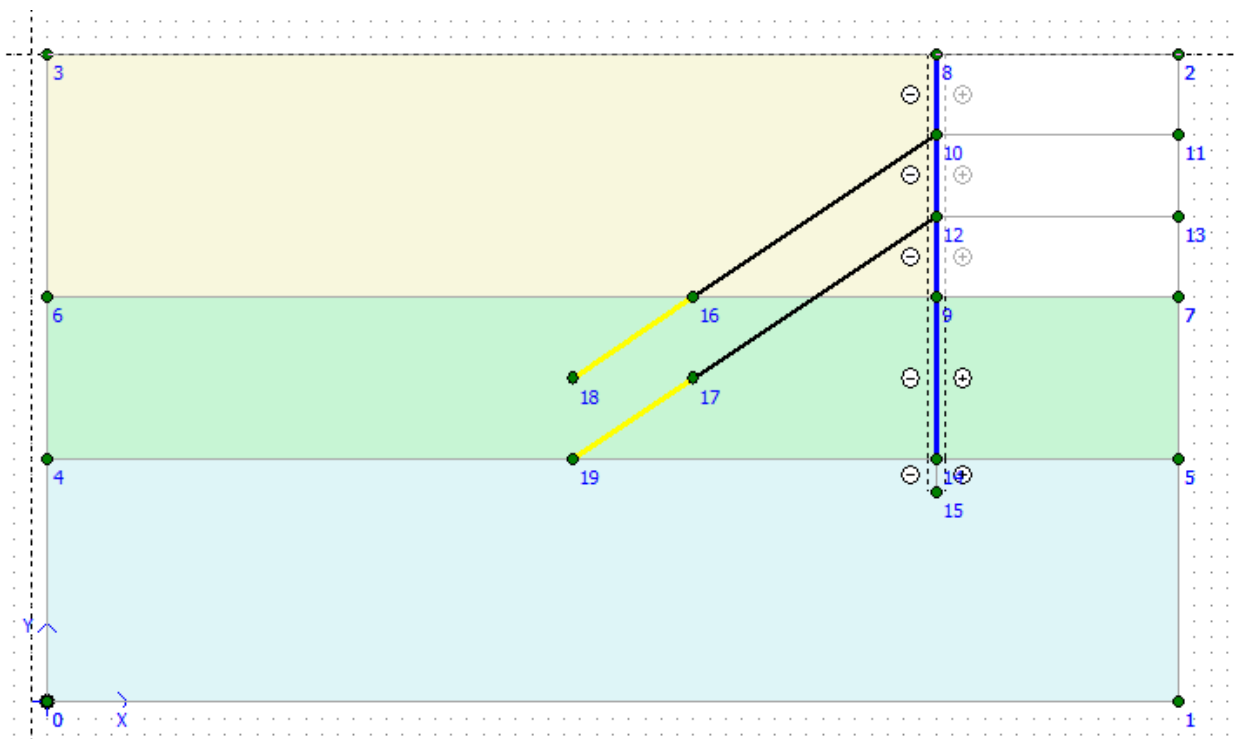
فاز دوم



فاز سوم



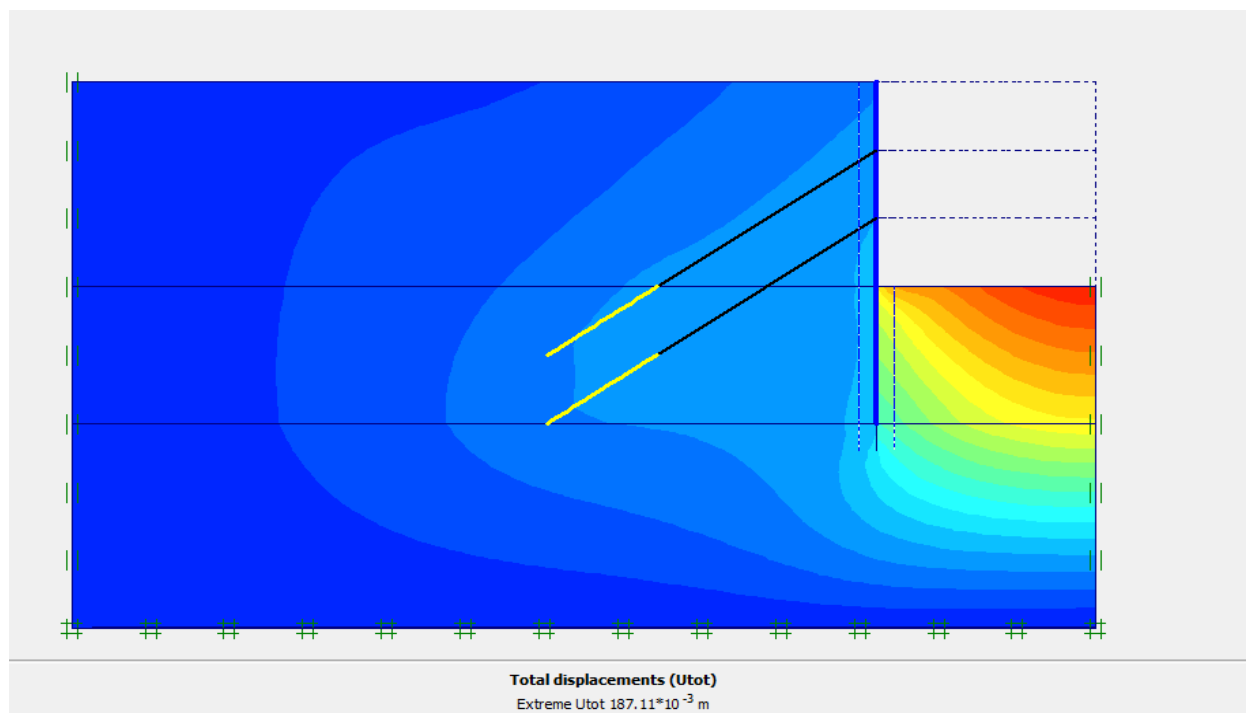
فاز چهارم



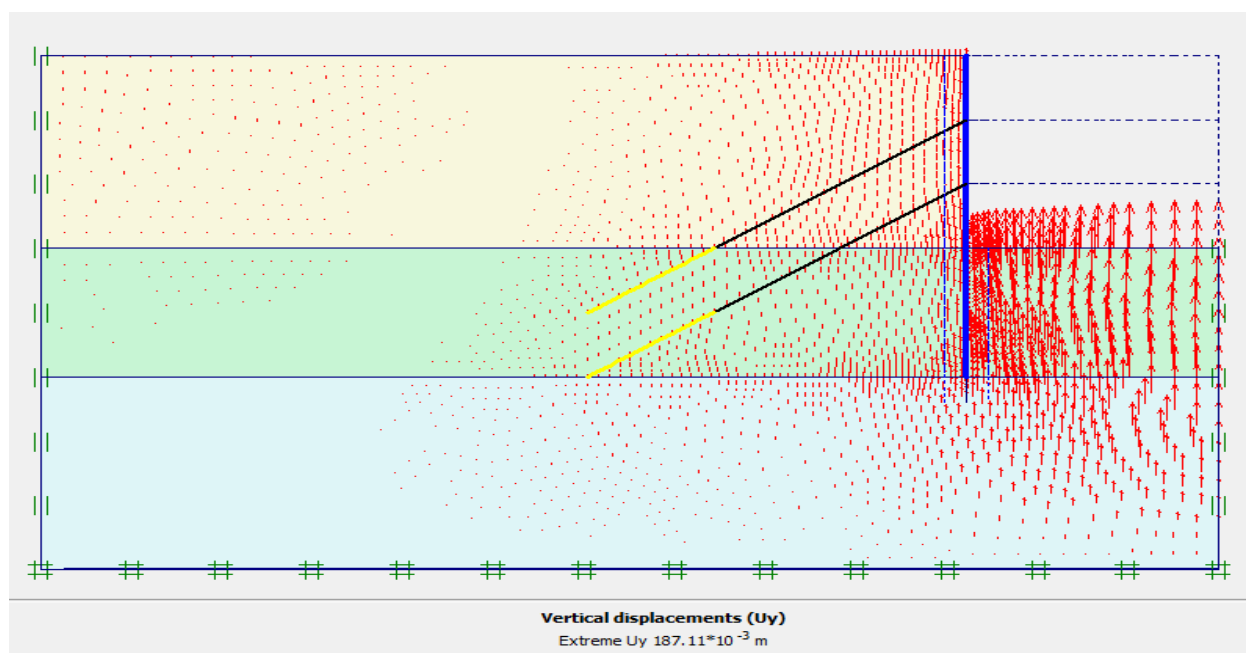
فاز پنجم



نتایج

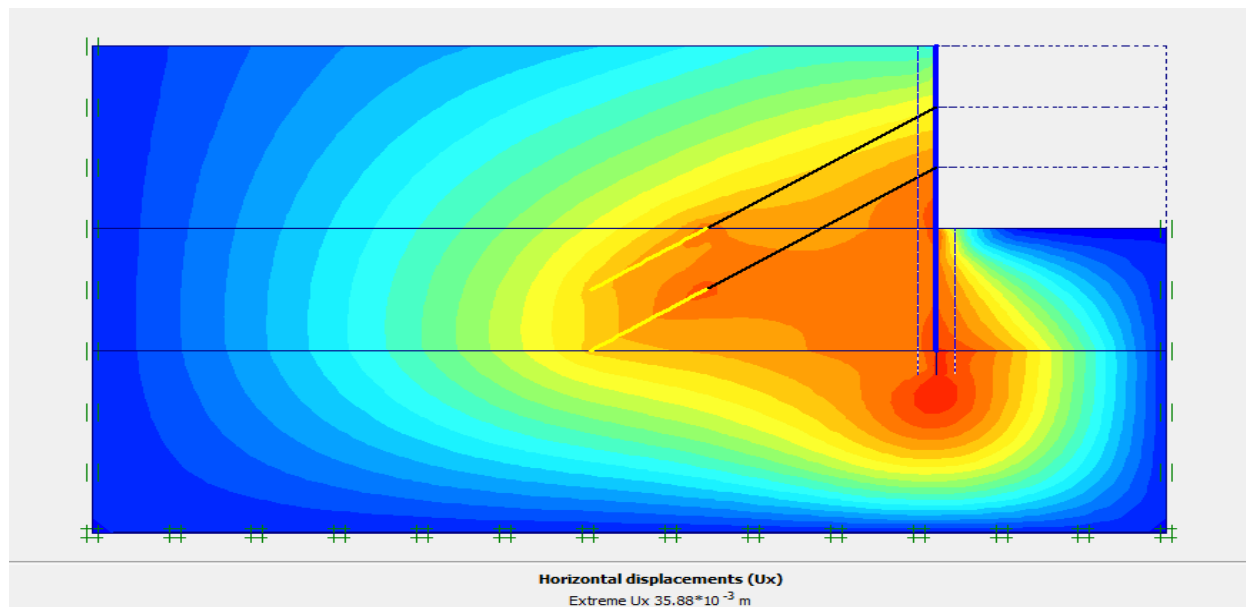


همانطور که در شکل مشاهده می‌شود حداکثر تغییر مکان ایجاد شده در مدل در کف گود می‌باشد یعنی در اثر ۱۵ متر حفاری کف گود حدود ۱۸ سانتی متر تغییر مکان داشته است.

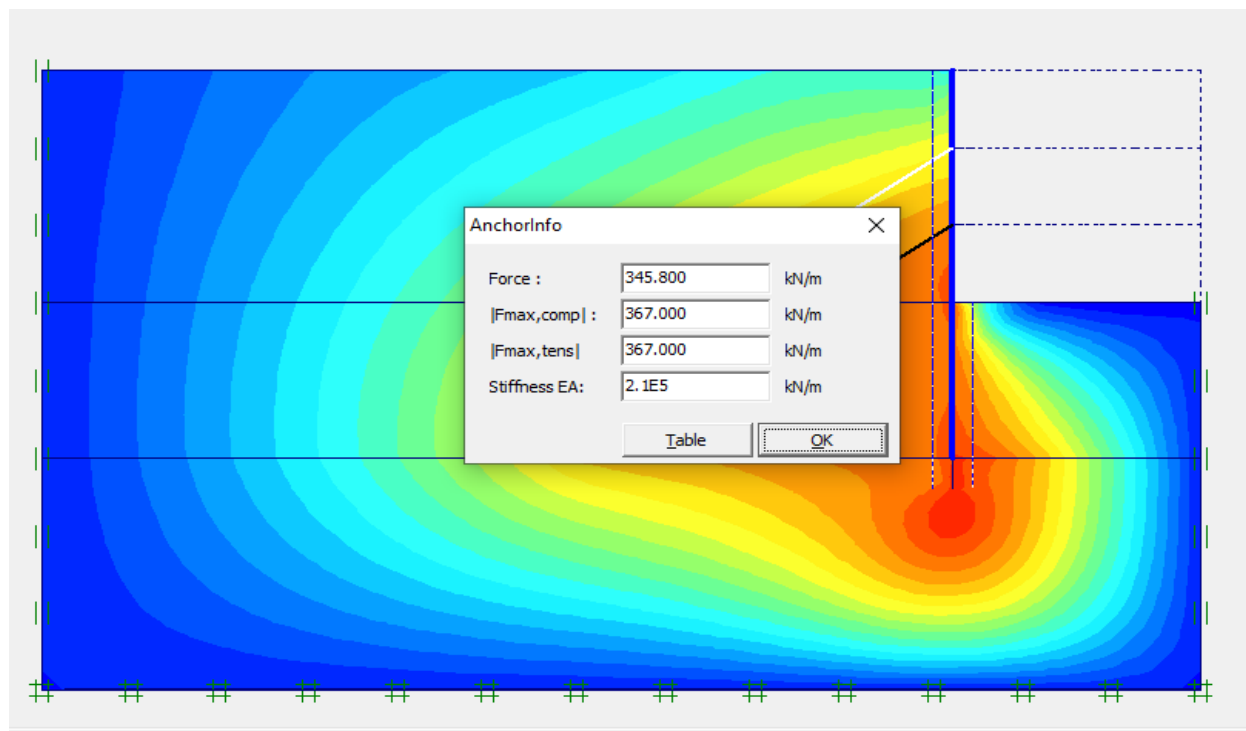




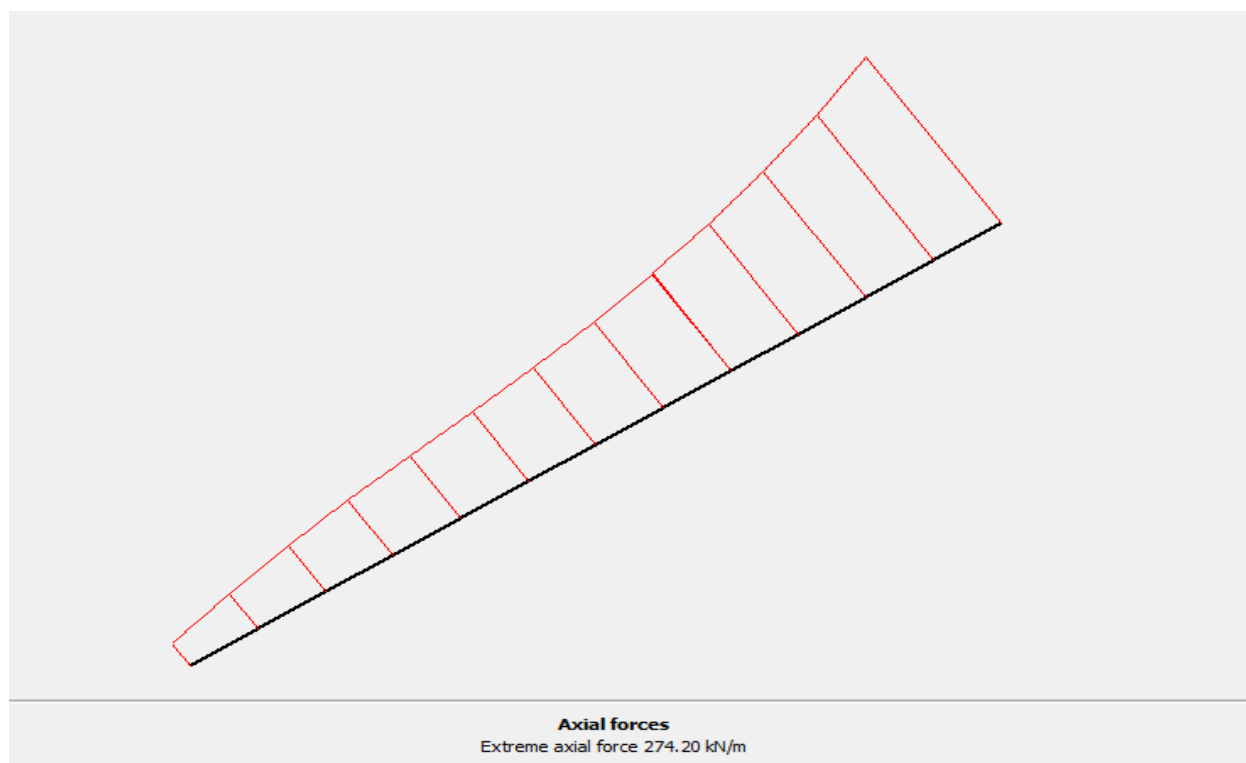
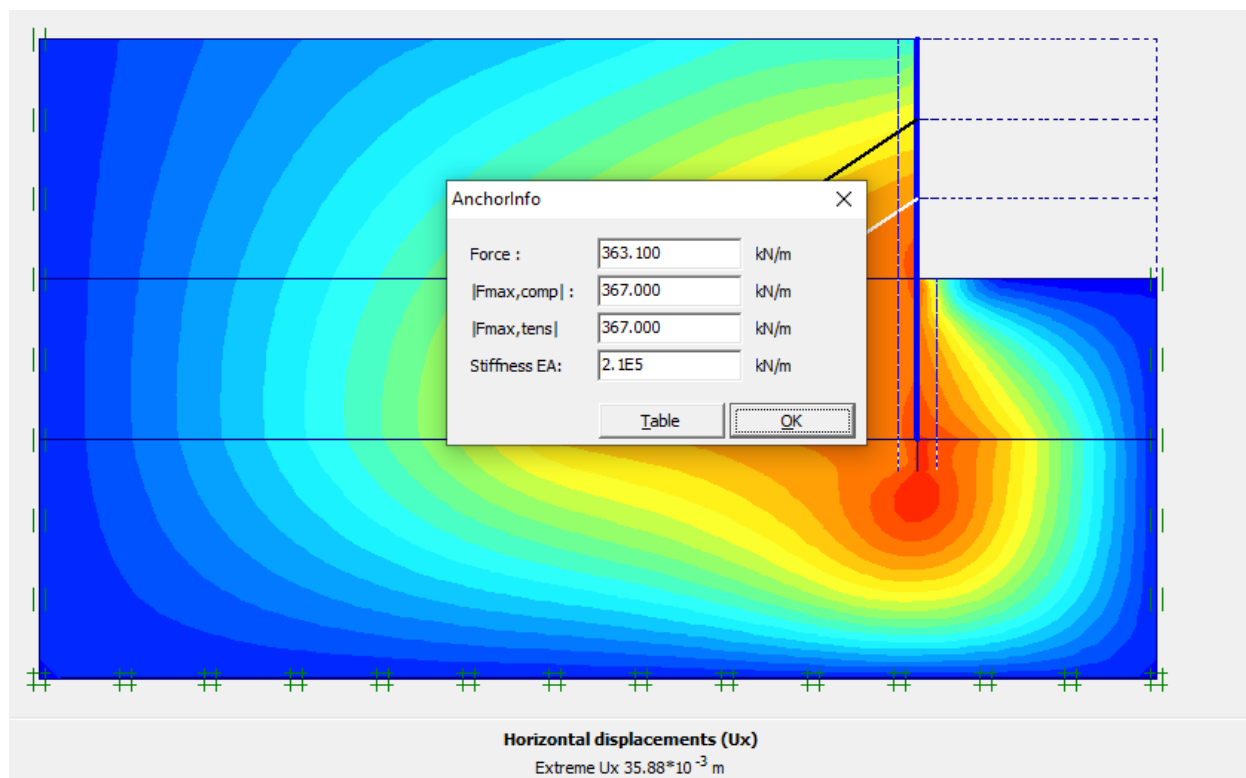
هم چنین اگر در زیربرنامه Output از سربرگ Deformation گزینه‌ی Vertical Displacement را انتخاب کنیم مشاهده خواهیم کرد در اثر کاهش تنش در کف گود بالازدگی اتفاق افتاده است.



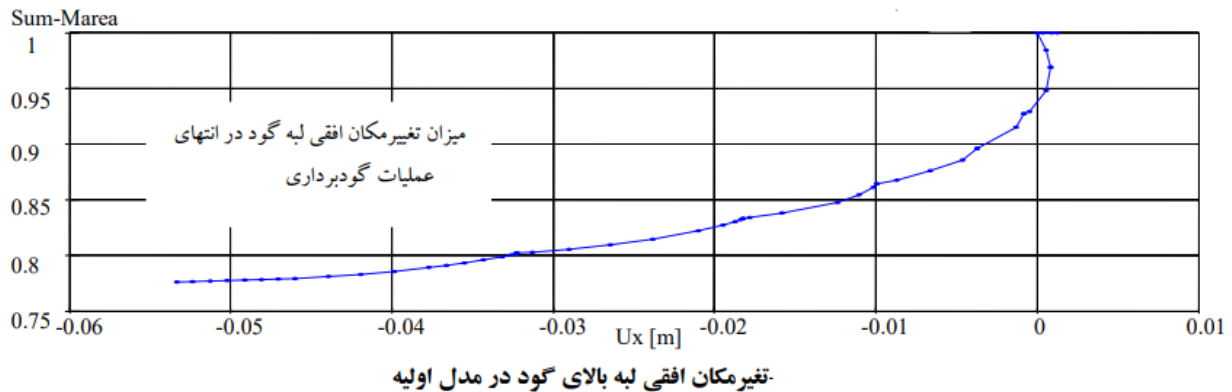
نمایش تغییر مکان افقی دیواره گود



نیروی ایجاد شده در انکرها



نیروی ایجاد شده در بخش مهار شده انکرها



در این تحقیق به آنالیز حساسیت تغییر مکان افقی دیواره ی گودی که با نیلینگ وانکراژ تقویت شده‌است پرداخته شد. در ابتدا مدل اولیه گود با PLAXIS دوبعدی تحلیل شد و تغییر مکان افقی لبه بالای گود استخراج گردید. سپس با تغییر ضریب چسبندگی و ضریب اصطکاک خاک نسبت به مدل اولیه در هر مرحله از تغییرات این پارامترها، میزان تغییر مکان افقی لبه بالای گود در هر مرحله از تحلیل استخراج گردید. پس از رسم نمودار ها و مقایسه شماتیک تغییرات، تدوین جداولی انجام پذیرفت که شدت اثر پارامترها در تغییر مکان افقی را نشان میداد و همانطور که مشاهده گردید پارامتر ضریب اصطکاک در هردو مدل اولیه و مدل با ۵ متر اضافه طول انکر حدود ۸ برابر ضریب چسبندگی روی تغییر مکان افقی موثر میباشد که نشان دهنده اهمیت بالای تعیین ضریب اصطکاک در مدلسازی و تحلیل گود های تقویت شده با نیلینگ وانکراژ میباشد.



پروژه دوم

میخ‌خاک‌ها یک المان سازه‌ای در داخل خاک یا سنگ می‌باشند که دارای عملکرد کششی بوده و در طول گیردار خود با مصالح اطراف درگیر می‌باشد. با توجه به مدل‌سازی دو بعدی، ناگزیر میخ-خاک‌ها به صورت المان‌های صفحه‌ای در نظر گرفته می‌شوند. به منظور رفع این مشکل لازم است خصوصیات هر میخ‌خاک با توجه به فاصله داری افقی آن معادل‌سازی گردد.

میخ‌خاک‌ها از جنس میلگرد معمولی آجدار AIII - $\phi 32$ با تنش تسلیم ۴۲۰ مگاپاسکال می‌باشد. قطر سوراخ حفاری ۱۰۰mm، مقاومت فشاری دوجاب آن برابر ۲۱۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می‌باشد. خصوصیات میلگرد میخ‌خاک‌ها در جدول (۳-۸) ارائه شده است.

مشخصات ورودی المان میخ‌خاک‌ها ($\phi 32$)

پارامتر	S_h	E	EA	A
مقدار	1/5	2×10^7	$1/69 \times 10^{-4}$	$8/04 \times 10^{-4}$
واحد	m	kN/m^2	kN	m^2

شمع منفرد

از پروفیل آهن IPE200 دابل در مدل استفاده شده است که مشخصات سولجر مورد استفاده در طراحی در جدول زیر ارائه شده است.



خصوصیات مصالح سولجر 2IPE200

پارامتر	S_h	2EA	2EI	I_x	A
مقدار	3	$3/99 \times 10^{-5}$	2716	1940	$2/85 \times 10^{-4}$
واحد	m	kN	$kN.m^2$	cm^4	m^2

شاتکریت

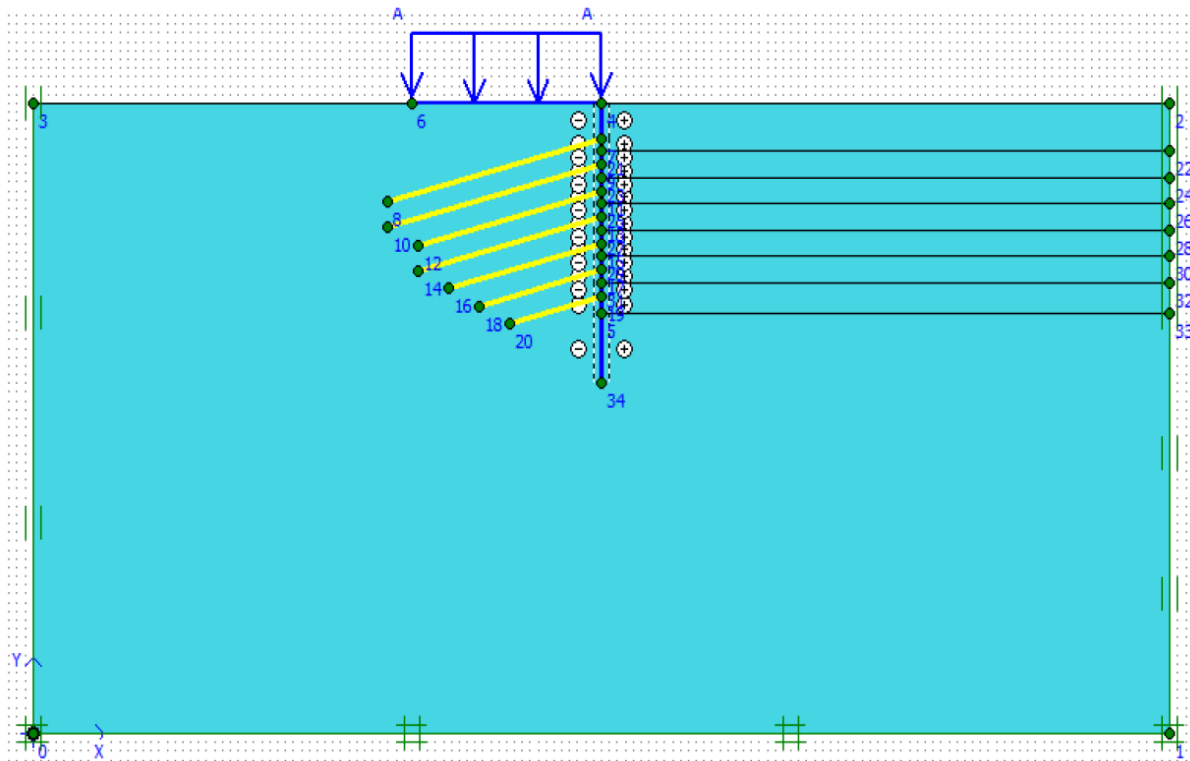
شاتکریت به عنوان یک نمای دائمی برای دیوارها، جهت ایجاد پایداری موضعی در میان دیوار و همچنین برای محافظت از سطح گود در برابر هوازدهی و اثرات زیست محیطی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقاومت فشاری بتن شاتکریت ۲۰۰ مگا پاسکال می‌باشد. ضخامت شاتکریت ۱۵cm می‌باشد.

خصوصیات مصالح شاتکریت

پارامتر	I_x	EI	EA	A
مقدار	28125	5906	$3/15 \times 10^{-6}$	0/15
واحد	cm^4	$kN.m^2$	kN/m^2	m^2

مشخثات ورودی المان میخ خاک‌ها (ϕ32) در plaxis

پارامتر	S_h	EA	Material model
مقدار	1/5	$1/12 \times 10^5$	Elastic
واحد	m	kN/m	-



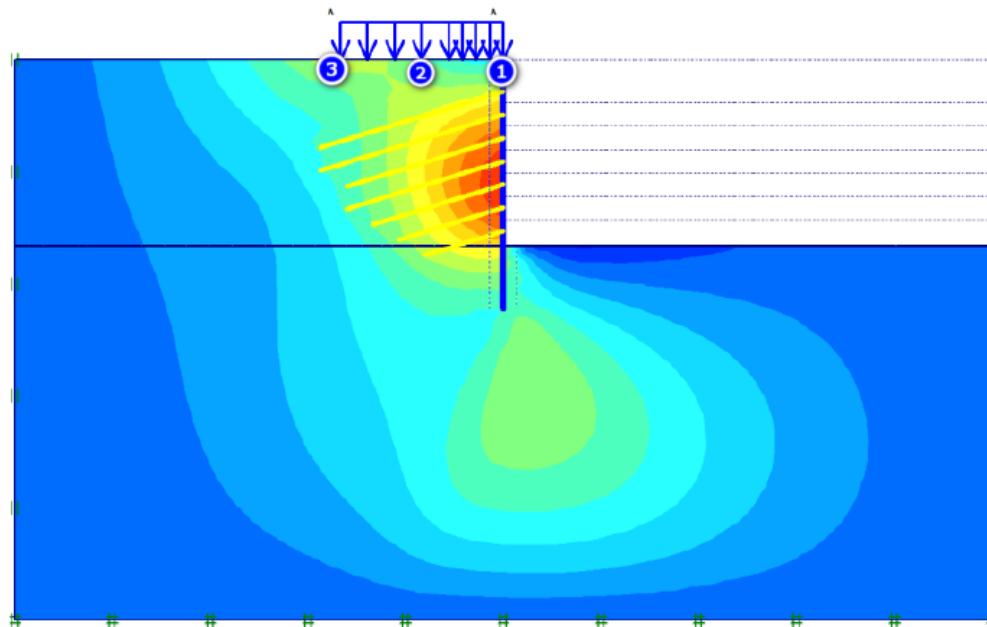
مشخصات هندسی و سیستم پایدار سازی میخ کوبی در plaxis

بررسی اثر گودبرداری بر ناحیه تسلیم خاک

به دلیل اینکه خاک نقطه تسلیم واضحی ندارد، مرزی برای تشخیص الاستیک از هایپوالاستیک نداریم. بنابراین اساس حالت الاستوپلاستیک را برای مصالح مورد استفاده در مدلسازی در نظر گرفتیم که کرنش کل را ترکیبی از کرنش الاستیک و پلاستیک می‌داند. الاستوپلاستیک یعنی مصالحی که دارای حد تسلیم هستند و دچار تغییر شکل‌های پلاستیک می‌گردند. این مدل رفتاری مصالح از نظریه خمیری پیروی می‌کند. در ابتدا مصالح در محدوده الاستیک و بدون تغییر شکل پایدار هستند اما با پیشروی گودبرداری و تغییرات تنش، مصالح وارد ناحیه پلاستیک شده تا به



به جهت بررسی و مطالعه در خصوص نشست پی‌مجاور گودبرداری، در حالت‌های با دیوار سپری و میخ‌کوبی سه نقطه در زیر فونداسیون طبق شکل انتخاب و استخراج گردید.



نقاط مشخص شده برای نتایج نشست

نتیجه گیری

با توجه به عمق زیاد گودبرداری و عدم امکان گودبرداری به صورت مایل و پله‌ای و استفاده بهینه از زمین و همچنین انجام عملیات گودبرداری در کوتاهترین زمان ممکن، استفاده از روش نیلینگ (میخکوبی خاک) الزامی است. نیلینگ روش جدیدی است که به دلیل اقتصادی بودن و مزایای منحصر به فرد خود، به عنوان راه حل بسیار مناسبی در موارد مختلف از جمله پایدارسازی شیب‌ها و شیروانی‌ها و افزایش ظرفیت باربری و محدود کردن تغییر شکل‌ها با ایجاد حداقل دست خوردگی در وضعیت طبیعی زمین خصوصاً در مناطق شهری که فضای کافی برای انجام سایر عملیات‌ها در دسترس نیست، کاربردهای فراوانی دارد.



در این روش پس از خاکبرداری پله اول (خاک محل باید قابلیت پایداری تا عمق حدود ۵/۱ متر را داشته باشد). اولین ردیف میخ‌ها اجرا و سپس رویه بتنی نازکی تحت عنوان شاتکیرت اجرا می‌شود و در انتها صفحه سر و مهره مربوطه بسته می‌شود. این روند تا رسیدن به تراز نهایی گودبرداری و طی پله‌های خاکبرداری باقیمانده ادامه خواهد یافت.

استفاده از روش نیلینگ به عنوان یک سیستم حفاظت جداره ترانشه و گود در مناطق شهری و فضاهای محدود بسیار کارا بوده و بدلیل امکان همزمانی اجرا در چند جبهه کاری از سرعت خوبی برخوردار است. با توجه به درجه پایداری، امکان اجرای گود قائم وجود داشته و همچنین در انواع شرایط خاک، اجرای آن امکان پذیر بوده و مهمترین ویژگی این روش محسوب می‌شود. برای سازه‌های زیر زمینی بخصوص در فضاهای محدود شهری مانند ایستگاه‌های مترو مناسب است.

این روش یک روش مطمئن برای گودبرداری بوده که در پروژه‌های بزرگ و حائز اهمیت، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد و با توجه به امکان مدلسازی در نرم افزارهایی نظیر پلکسیس با استقبال خوبی مواجه بوده و استفاده از این سیستم را در گودبرداری‌ها با اطمینان بیشتری همراه کرده است.



منابع

- [1] Rabejac, S., Toudic, P. (4791); "Construction d'un Mur de Soutenement entre Versailles Chantiers et Versaille-Matelots". Revue Generale des Chemins de Far, 79e Annee April, 292-299.
- [2] Stocker, M. F., G. W., Gassler, G. and Gudehus, G. (4797) "Soil Nailing," C.R. Coll. Int Reinforcement des soils, Paris, 4797, 167-191.
- [3] Clouterre, (4774), "Soil Nailing Recommendations-4774 for Designing, Calculating, Constructing and Inspecting Earth Support Systems Using Soil Nailing", French National Research Project CLOUTERRE.; Federal Highway Administration, Washington, DC.
- [4] Fan, C.-C., & Luo, J.-H. (2002). Numerical study on the optimum layout of soil-nailed slopes Computers and Geotechnics, 93, 323-377.
- [5] Rodriguez, T. and Ortiz, J.M. (2014). "Influence of Strut and Anchor Stiffness on the Behavior of Diaphragm Walls", Proceedings of the Thirteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.13, No.4, pp.1709-1712.
- [6] Ho, D., Smith, I. P4/6 Modelling of reinforced soil wall: construction by a 3-D finite element method, Performance of reinforced soil structures, pp. 335-340: Thomas Telford Publishing, Published Online: June 19, 2015.
- [7] Liew, S.S., Khoo. C.M. Soil nail stabilization for a 14.5 m Deep excavation at uncontrolled fill ground. In: Proceedings of 10th International Conference on Piling and Deep Foundations, Amsterdam, The Netherlands, 2006.
- [8] Babu, G.S., Singh, V.P. Numerical analysis of performance of soil nail walls in seismic conditions, ISET Journal of Earthquake Technology, vol. 45, no. 1-2, pp. 31-40, 2008.
- [9] Su, L.J., Yin, J.H., Zhou, W.H. Influences of overburden pressure and soil dilation on soil nail pull-out resistance, Computers and Geotechnics, vol. 37, no. 4, pp. 555-564, 2010.
- [۱۰] حسینی سید محمدرضا، حمیدرضا صبا، فریدون قدیمی و محمد حسین مشایخی، ۱۳۹۲ بررسی تاثیر پارامترهای هندسی بر روی دیوارهای گودبرداری مسلح شده با روش ترکیبی استفاده از میخکوبی و ریز شمع، اولین کنفرانس ملی مهندس ژئوتکنیک، اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی.
- [۱۱] مظفری، وحید ۱۳۹۴، ارزیابی پایداری دیوارهای حائل بتنی طره‌ای تحت اثر بارهای لرزه‌ای دومین کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و توسعه اقتصاد شهری شیراز موسسه آموزشی مدیران خبره نارون.
- [۱۲] جاوید، بهرنگ و سید مجتبی موحدی فر ۱۳۹۴ بهینه سازی سازه‌های نگهبان ترکیبی از نوع دیوارهای مرکب میخ کوبی و مسلح شده مکانیکی» کنفرانس بین‌المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در مهندسی عمران. معماری و شهرسازی. تهران. موسسه آموزش عالی نیکان، دانشگاه تهران
- [۱۳] س. توکلی، م. ح. امین فر، م. عدالتی، بررسی اثرات تغییر مکان ناشی از گودبرداری بر سازه مجاور در مناطق شهری مطالعه موردی شهر ایلام، نشری ه مهندسی عمران و محیط زیست، ۱۳۹۶.
- [۱۴] حسنیپور، ف. فرخ زاد، م. ج. شعبانی، تحلیل عددی عملکرد ساختمان مجاور گود با در نظر گرفتن اندرکنش گودبرداری



و سازه، چهارمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، معماری و شهرسازی، ۲۰۱۶.

[15] He, S., Ouyang, C., & Luo, Y. (2012). Seismic stability analysis of soil nail reinforced slope using kinematic approach of limit analysis. *Environmental Earth Sciences*, 66(1), 319-326.

[16] Farrokhzad, F., MotahariTabari, S., Abdolghafoorkashani, H., & Tavakoli, H. (2021). Seismic Behaviour of Excavations Reinforced with Soil-Nailing Method. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1-21.

[17] Sahoo, S., Manna, B., & Sharma, K. G. (2021). Shaking Table Tests to Evaluate the Seismic Performance of Soil Nailing Stabilized Embankments. *International Journal of Geomechanics*, 21(4), 04021036.

[18] Mohammad Zaki, M. F., Wan Ahmad, W. A. A., Ayob, A., & Ying, T. K. (2015). Analysis of soil nailing under earthquake loading in malaysia using finite element method. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 695, pp. 526-529). Trans Tech Publications Ltd.

[۱۹] ضوی قزلجه، حسین و صدیق، حمید، ۱۳۹۷، تحلیل لرزه ای پایداری شیروانی خاکی به روش ترکیبی انکراژ و شمع های بتنی، کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و مدیریت توسعه شهری در ایران، تهران.