

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



پردیس بین‌المللی خوارزمی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک

تحلیل سه بعدی جدار گودبرداری و مقایسه آن با رفتار دو بعدی

همراه با نرم افزار عددی

نگارنده : محمد میرمحمدمدی

استاد راهنما :

دکتر سید مهدی حسینی

شهریور ۱۳۹۵

تقدیم بہ مادر م و پدر م

آنان کہ تمام وجود خود را بہ چون شمعی بی بیج نئی برای روشنائی مسیر زندگی من صرف نمودند.....

تقدیر و تشکر

ضمن سپاس و ستایش به درگاه خداوند دانا و توانا که به من توانایی داد که این پژوهش را انجام دهم، بر خود لازم می‌بینم از استاد راهنما
که افتخار خویش، جناب آقای دکتر حسینی که در طول محارث این مجموعه راهنمایی‌های بجایشان مریاری نمودند، قدر دانی نمایم. همچنین
از دکتر قلی زاده و همچنین مهندس امیری که بنده را در گردآوری مطالب کمک نمودند کمال تشکر را دارم.

چکیده

خاک به عنوان مصالح ساختمانی در پروژه‌های مختلف و نیز به عنوان تکیه‌گاهی برای پی ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهندسین عمران همواره درصدد افزایش مقاومت خاک با استفاده از فرآیندهای مکانیکی نظیر اصلاح و تثبیت و یا استفاده از عناصر مسلح کننده بوده‌اند یکی از روش‌های بهبود مقاومت، تسلیح خاک می‌باشد. تاکنون مصالح مختلفی نظیر الیاف شیشه (فایبرگلاس) مورد استفاده قرار گرفته و در رزین پلی‌استر، فلزات بی‌اثر مانند آلومینیوم یا فولاد ضدزنگ، فولادهای روی اندود (گالوانیزه) و پلیمرها از قبیل ژئوتکستایل، ژئوگرید، ژئوکامپوزیت، الیاف پوشش‌دار، نوارهای پلاستیکی صلب و لاستیک‌های فرسوده برای این منظور استفاده شده است. برای پایداری سازی گودها از روش‌های متفاوتی استفاده می‌شود که از میان آن‌ها روش میخ‌کوبی کاربرد بیشتری دارد. در این پژوهش سعی شده تا با روش مذکور به یک مدل بهتر، ایمن‌تر و اقتصادی‌تر برای ایجاد سازه نگهبان گود رسید تا بتوان آن را جایگزین روش‌های قدیمی‌تر و غیر ایمن و غیراقتصادی نمود.

هدف این پژوهش تأمین پایداری لازم برای گود از طریق ایجاد یک سازه نگهبان بهینه هست که زاویه و طول و چیدمانی بهینه برای میخ‌خاک‌ها را بدهد. به نحوی که موجب گسیختگی و تغییر شکل مخرب در گود نشود، که به وسیله نرم افزار پلکسیس و فلک مدل سازی انجام می‌شود. برای این منظور ابتدا باید گود در نرم افزارهای عددی پلکسیس در حالت دو بعدی و نرم افزار فلک به صورت دو بعدی و سه بعدی میخ‌کوبی مدل سازی شود، سپس زمانی که نتایج مطلوب بدست آمد نتایج روش‌ها باهم مقایسه می‌شود.

در این پژوهش میزان تغییر شکل‌ها و پایداری سازه نگهبان در گودبرداری‌های به روش میخ-کوبی در عمق‌های ۹ و ۱۴ متری در شرایط خاک دو لایه و در حالت اجرای میخ‌خاک‌ها با زاویه ۱۰ درجه و با طول متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: گودبرداری، میخ کوبی، فلک، پلکسیس، آنالیز عددی، تحلیل سه بعدی، تحلیل دو

بعدی، جابجایی

فهرست

۱- فصل اول مقدمه و کلیات.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- روش تحقیق.....	۴
۳-۱- لزوم انجام تحقیق.....	۴
۴-۱- فصل بندی مطالب.....	۵
۷- فصل دوم.....	۷
۷- مطالعات انجام شده.....	۷
۱-۲- مقدمه.....	۸
۲-۲- پیشینه میخکوبی خاک.....	۹
۳-۲- مطالعات انجام شده در روش میخکوبی.....	۱۲
۴-۲- اجرای روش میخکوبی.....	۱۴
۱-۴-۲- گودبرداری.....	۱۶
۲-۴-۲- حفاری گود برای اجرای میخ.....	۱۷
۳-۴-۲- نصب میخ و دوغاب ریزی.....	۱۷
۴-۴-۲- ساخت پوشش شاتکریت موقت.....	۱۸
۵-۴-۲- ساخت دیواره میخکوبی شده تا عمق مورد نظر.....	۱۹
۶-۴-۲- ساخت پوشش دائمی و نهایی.....	۱۹
۷-۴-۲- مقاومت چسبندگی بین خاک و ملات در دیوارهای میخکوبی شده.....	۱۹
۸-۴-۲- تأثیر شرایط خاک بر مقاومت بیرون کشیدگی میخ.....	۲۰
۵-۲- شرایط مطلوب خاک برای میخکوبی.....	۲۱
۱-۵-۲- خاکهای ریزدانه سفت یا سخت.....	۲۲
۲-۵-۲- خاکهای دانه‌ای متراکم تا خیلی متراکم با کمی چسبندگی ظاهری.....	۲۳
۳-۵-۲- سنگ هوازده بدون هیچ‌گونه سطوح شکست.....	۲۳
۴-۵-۲- رسوبات یخچالی.....	۲۴
۶-۲- طراحی سازه نگهبان به وسیله روش حدی.....	۲۴
۷-۲- روش لیو و همکاران.....	۲۷
۸-۲- تحقیقات فان و لتو.....	۲۹
۹-۲- مطالعات انجام شده در روش مهاري.....	۲۹
۳۱- فصل سوم معرفی نرم افزار FLAC و PLAXIS	۳۱
۱-۳- مقدمه.....	۳۲
۱-۱-۳- صفحات.....	۳۸

۳۹.....	۲-۱-۳ فصل مشترک پلکسیس
۴۰.....	۳-۱-۳ مرز میدان آزاد FLAC
۴۱.....	۴-۱-۳ ایجاد شبکه
۴۲.....	۵-۱-۳ مدل رفتاری
۴۳.....	۶-۱-۳ مدل موهر – کولمب
۴۵.....	۶-۱-۳ مدل رفتاری حل مسایل در نرم افزار فلک ۳ بعدی
۴۷.....	فصل چهارم
۴۷.....	مدلسازی و تحلیل نتایج
۴۸.....	۱-۴ مقدمه
۴۸.....	۱-۱-۴ آشنایی با نرم افزار پلکسیس
۴۹.....	۱-۱-۴ قسمت INPUT
۵۴.....	۲-۱-۴ قسمت CALCULATIONS
۵۵.....	۳-۱-۴ قسمت OUTPUT
۵۶.....	۴-۱-۴ قسمت CURVES
۵۶.....	۲-۴ آشنایی با نرم افزار فلک
۶۲.....	۳-۴ مدلسازی دیواره های پروژه بصورت دو بعدی
۱۰۳.....	فصل پنجم نتیجه گیری و پیشنهادها
۱۰۴.....	۱-۵ نتیجه گیری
۱۰۵.....	۲-۵ پیشنهادها برای ادامه تحقیق
۱۰۶.....	منابع فارسی
۱۰۶.....	منابع لاتین

فهرست شکل ها

- شکل ۱-۲ : دیوار میخکوبی شده در ورسای ۱۱
- شکل ۲-۲ : مراحل اجرای میخکوبی ۱۶
- شکل ۳-۲ : مهره و صفحه سرمیخ یا مهار ۱۸
- شکل ۴-۲ : سطح گسیختگی و جزئیات در روش LuO و همکاران ۲۷
- شکل ۵-۲ : سازه نگهبان مهار شده با انکر ۳۰
- شکل ۱-۳ : ۳۶
- شکل ۱-۳ : کاربرد صفحات در مسائل ژئوتکنیکی ۳۸
- شکل ۲-۳ : موقعیت گره ها و نقاط تنش در یک جزء ۵ گره ای و ۳ گره ای تیر ۳۸
- شکل ۳-۳ : توزیع گره ها و نقاط تنشی در اجزای سطوح مشترک و ارتباط آن ها با اجزای خاک ۴۰
- شکل ۴-۳ : تعریف E0 و E50 نتایج آزمایش سه محوری زهکشی شده استاندارد ۴۴
- شکل ۱-۴ : صفحه Input برنامه پلکسیس ۵۰
- شکل ۲-۴ : ترتیب انجام محاسبات در نرم افزار FLAC ۵۸
- شکل ۳-۴ : روند کلی حل مساله در نرم افزار FLAC ۶۱
- شکل ۴-۴ : پنجره اصلی GIIC (graphically codes) ۶۲
- شکل ۱۲-۴ : جابجایی افقی دیواره شمالی در نرم افزار پلکسیس (برحسب متر) ۶۹
- شکل ۱۳-۴ : جابجایی افقی دیواره شمالی در نرم افزار فلک (برحسب متر) ۶۹
- شکل ۱۴-۴ : جابجایی قائم دیواره شمالی در نرم افزار پلکسیس (برحسب متر) ۷۰
- شکل ۱۵-۴ : جابجایی قائم دیواره شمالی در نرم افزار فلک (برحسب متر) ۷۰
- شکل ۱۶-۴ : جابجایی افقی دیواره جنوبی در نرم افزار پلکسیس (برحسب متر) ۷۱
- شکل ۱۷-۴ : جابجایی افقی دیواره جنوبی در نرم افزار پلکسیس (برحسب متر) ۷۲
- شکل ۱۸-۴ : جابجایی قائم دیواره جنوبی در نرم افزار پلکسیس (برحسب متر) ۷۲
- شکل ۱۹-۴ : جابجایی قائم دیواره جنوبی در نرم افزار فلک (برحسب متر) ۷۳
- شکل ۲۰-۴ : جابجایی افقی دیواره غربی در نرم افزار پلکسیس (برحسب متر) ۷۴
- شکل ۲۱-۴ : جابجایی افقی دیواره غربی در نرم افزار فلک (برحسب متر) ۷۵
- شکل ۲۲-۴ : جابجایی قائم دیواره غربی در نرم افزار پلکسیس (برحسب متر) ۷۵
- شکل ۲۳-۴ : جابجایی قائم دیواره غربی در نرم افزار فلک (برحسب متر) ۷۶
- شکل ۲۴-۴ : یک مدل در نرم افزار فلک ۳ بعدی همراه با اصطلاحات تخصصی ۷۸
- شکل ۲۵-۴ : مدل سازی هندسی در نرم افزار فلک ۳ بعدی ۸۱
- شکل ۲۶-۴ : نیروهای نامتعادل کننده گرهی در انتهای تحلیل ۸۲
- شکل ۲۷-۴ : مدل سازی هندسی در نرم افزار فلک ۳ بعدی ۸۳
- شکل ۲۸-۴ : مدل سازی هندسی در نرم افزار فلک ۳ بعدی ۸۴
- شکل ۲۹-۴ : مدل سازی هندسی در نرم افزار فلک ۳ بعدی ۸۵
- شکل ۳۰-۴ : مدل سازی هندسی در نرم افزار فلک ۳ بعدی ۸۶
- شکل ۳۱-۴ : مدل سازی هندسی در نرم افزار فلک ۳ بعدی ۸۷
- شکل ۳۲-۴ : نیروهای نامتعادل کننده گرهی در انتهای تحلیل ۸۹

شکل ۳-۳۳: مدل سازی هندسی در نرم افزار فلک ۳بعدی.....	۹۰
شکل ۳-۳۴: مدل سازی هندسی در نرم افزار فلک ۳بعدی.....	۹۱
شکل ۳-۳۵: مدل سازی هندسی در نرم افزار فلک ۳بعدی.....	۹۲
شکل ۳-۳۶: مدل سازی هندسی در نرم افزار فلک ۳بعدی.....	۹۲
شکل ۳-۳۷: مدل سازی هندسی در نرم افزار فلک ۳بعدی.....	۹۳
شکل ۳-۳۸: مدل سازی هندسی در نرم افزار فلک ۳بعدی.....	۹۴
شکل ۳-۳۹: پلات جابجایی در عمق ۲ متر (کف گود نشان داده نشده است).....	۹۵
شکل ۳-۴۰: پلات جابجایی در عمق ۴ متر (کف گود نشان داده نشده است).....	۹۵
شکل ۳-۴۱: پلات جابجایی در عمق ۶ متر (کف گود نشان داده نشده است).....	۹۶
شکل ۳-۴۲: پلات جابجایی در عمق ۸ متر (کف گود نشان داده نشده است).....	۹۶
شکل ۳-۴۳: پلات جابجایی در عمق ۹ متر (کف گود نشان داده شده است).....	۹۷
شکل ۳-۴۴:	۹۷
شکل ۳-۴۵: پلات جابجایی در عمق ۱ متر (کف گود نشان داده نشده است).....	۹۸
شکل ۳-۴۶: پلات جابجایی در عمق ۳ متر (کف گود نشان داده نشده است).....	۹۸
شکل ۳-۴۷: پلات جابجایی در عمق ۴ متر (کف گود نشان داده نشده است).....	۹۹
شکل ۳-۴۸: پلات جابجایی در عمق ۶ متر (کف گود نشان داده نشده است).....	۹۹
شکل ۳-۴۹: پلات جابجایی در عمق ۷ متر (کف گود نشان داده نشده است).....	۱۰۰
شکل ۳-۵۰: پلات جابجایی در عمق ۹ متر (کف گود نشان داده نشده است).....	۱۰۰
شکل ۳-۵۱: پلات جابجایی در عمق ۱۰ متر (کف گود نشان داده نشده است).....	۱۰۱
شکل ۳-۵۲: پلات جابجایی در عمق ۱۲ متر (کف گود نشان داده نشده است).....	۱۰۱
شکل ۳-۵۳: پلات جابجایی در عمق ۱۴ متر (کف گود نشان داده شده است).....	۱۰۱
شکل ۳-۵۴:	۱۰۲

فهرست جدول

جدول ۱-۲:	۲۲
جدول ۱-۳:	۳۷
جدول ۱-۳: انواع شبکه بندی در نرم افزار پلکسیس.....	۴۲
جدول ۱-۴- مشخصات ژئوتکنیکی لایه های خاک.....	۶۳
جدول ۲-۴: برای دیواره شمالی و جنوبی با در نظر گرفتن مشخصات نیل بصورت زیر می باشد.....	۶۴
جدول ۲-۴:	۶۵
برای دیواره شرقی و غربی نیز با در نظر گرفتن آرایش نیل ها بصورت زیر می باشد.....	۶۵
جدول ۳-۴:	۶۶

فصل اول

مقدمه و کلیات

امروزه با افزایش رشد شهرنشینی و ساخت سازه‌های بزرگ سبب انجام گودبرداری‌های عمیق جهت ایجاد پارکینگ و انباری و کاربردهای دیگر شده است. از مسائل مهم در گودبرداری‌ها طراحی سازه نگهبان مناسب و کنترل مقادیر جابه‌جایی‌های دیواره گود و خاک پشت گود است. روش‌های مختلفی در اجرای گودهای نیمه عمیق و عمیق مورد استفاده قرار می‌گیرد مسلح کننده‌ها را می‌توان از مواد دارای مقاومت کششی ساخت این مسلح کننده‌ها می‌توانند به صورت سیم، نوار، شبکه، پارچه، نمد و... باشند و از جنس فولاد، شیشه، پلاستیک و یا هر ماده دیگر باشند مشارکت این اجزاء، مصالح ویژه‌ای را ایجاد می‌نماید که امکان ساخت سازه‌های اقتصادی را فراهم نموده و دارای خواص کاملاً متفاوت از خواص تشکیل دهنده آنها است. اصول اساسی خاک مسلح در طبیعت به طور گسترده‌ای توسط جانوران و گیاهان بکار گرفته شده است. در طبیعت نمونه‌های زیادی از شیب‌های طبیعی را که توسط ریشه‌های گیاهان تسلیح شده‌اند می‌توان مشاهده کرد اولین کاربردهای خاک مسلح توسط انسان به چهار تا پنج هزار سال قبل از میلاد مسیح بر می‌گردد، که از کاه برای مسلح نمودن خاک رس و آجرهای رسی استفاده می‌کردند.

به طور کلی مسلح کننده‌ها در توده خاک آن است که این مسلح کننده‌ها المان‌های خاک را در جهت‌هایی خاص به هم بچسبانند، به عبارت دیگر آن را قادر سازند که در جهت معینی در مقابل نیروهای کششی و یا برشی مقاومت نمایند.

استفاده از المان‌های کششی مقاوم برای افزایش مقاومت و ظرفیت باربری خاک تاریخیچه طولانی دارد کاربرد وسیع المان‌های کششی در سازه‌های خاکی و اصلاح زمین، به خصوص به ۳۰ سال اخیر به گونه‌ای بوده است که امروزه بیش از ۷۰۰۰ سازه خاک مسلح در دنیا وجود دارد. افزایش عمق گودبرداری به‌ویژه در مناطق شهری در مجاورت ساختمان‌ها و معابر اهمیت ویژه‌ای دارد و تأمین

پایداری و کنترل جابه‌جایی‌های دیواره گود و پشت دیواره باید با دقت بررسی شود. در این شرایط بعضی از روش‌های پایدارسازی گود قابلیت اجرایی خود را از دست می‌دهند و بر اساس قوانین آئین-نامه‌ای گودبرداری عمیق در شرایطی مجاز است که ایمنی سازه‌های مجاور را به خطر نیندازد. روش مناسب گودبرداری و پایدارسازی با توجه به جنس خاک، شرایط آب زیرزمینی، عمق و طول گودبرداری، موقعیت و شرایط ساختمان‌های مجاور، جابه‌جایی دیواره گود، دائمی و یا موقت بودن سازه، مسئله زلزله، بار دینامیکی ناشی از حرکت خودروها در مجاورت گود و هزینه‌های اجرای پروژه انتخاب می‌گردد. 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 اصطکاک یا چسبندگی در ناحیه فصل مشترک خاک و مصالح تسلیح می‌باشد از مزایای اجرای این سیستم‌ها، امکان پایدارسازی دیوارهای خاک بزرگ، در زمان کوتاه و با مراحل اجرایی کمتر نسبت به سایر روش‌ها و با صرف کمترین هزینه می‌باشد. طراحی یک سازه نگهبان میخ‌کوبی بر اساس انتقال نیروی محرک توده خاک به میخ‌خاک‌ها و انتقال این نیروها به توده خاک ایمن است که به پارامترهای متعددی از جمله روش نصب و روش تزریق و مشخصات خاک و سازه نگهبان بستگی دارد که اساس کار روش میخ‌کوبی به این شکل است که میخ‌خاک‌ها اجرا شده و با خاک‌برداری عمق‌های بیشتر دیواره گود مقداری جابه‌جایی پیدا می‌کند که سبب فعال شدن عملکرد میخ‌خاک‌ها می‌شود.

با توجه به اهمیت کنترل تغییر شکل جانبی دیواره از نرم‌افزار تحلیل عددی باید استفاده شود که برای این منظور از نرم‌افزار 2D FLAC، 3D FLAC و plaxis استفاده شده است که نرم‌افزار بر اساس روش اجزا محدود و تفاضل محدود است. هر دو نرم‌افزار دارای قابلیت محاسبه فاکتور ایمنی و محاسبه نیروهای وارده بر سازه‌های نگهبان در حفاریات زیرزمینی و روباز را دارا می‌باشند. همچنین قابلیت در

نظر گرفتن مدل‌های رفتاری مختلف و پیچیده برای خاک می‌باشند. مدل رفتاری در نظر گرفته شده برای خاک‌های مختلف (در ترازهای مختلف) در پروژه مذکور مدل رفتاری موهر- کولمب می‌باشد. آئین‌نامه معتبر طراحی و بررسی پایداری و تغییر شکل در سازه میخ‌کوبی آئین‌نامه اداره فدرال راه امریکا است.

۱-۲- روش تحقیق

در این پژوهش به بررسی پارامترهای مؤثر بر روش میخ‌کوبی پرداخته می‌شود. بررسی اثر ارتفاع گود، انتخاب نرم افزار و حالت دو بعدی یا سه بعدی بودن طراحی در گودهای با عمق‌های مختلف و اثر هر یک از پارامترهای فوق بر روی جابه‌جایی و ضریب پایداری سازه نگهبان بررسی می‌گردد.

۱-۳- لزوم انجام تحقیق

میخ‌کوبی خاک روش جدیدی است که به دلیل اقتصادی بودن و مزایای منحصر به فرد خود، به عنوان راه حل بسیار مناسب در موارد مختلف از جمله پایداری شیب‌ها و شیروانی‌ها، افزایش ظرفیت باربری و محدود کردن تغییر شکل‌ها با ایجاد حداقل دست‌خوردگی در وضعیت طبیعی زمین کاربردهای فراوانی پیدا کرده است. لذا شناسایی و اجرای روش‌هایی که به کمک آن‌ها بتوان این مشکلات را تا حد امکان رفع نمود لازم و ضروری به نظر می‌رسد. در بعضی موارد کار ساخت نیازمند گودبرداری با شیب قائم است. نیاز به سیستم نگهداری موقتی دارد تا دیواره‌های گود را پایدار نگه دارد. سرعت و کیفیت ساخت پروژه را ارتقاء دهد و اطمینان حاصل دهد که آسیب‌های جانی و مالی محتمل رخ نمی‌دهد. قابل به ذکر است که نرم‌افزارهای محاسباتی زیادی وجود دارد که به قابلیت انجام محاسبات پایداری سازه‌های میخ‌کوبی شده را دارند. که از آن جمله می‌توان به flac,plaxis,abaques,geostdio,slide,... اشاره کرد. انتخاب آگاهانه نرم افزار مناسب به طراح کمک می‌کند تا مناسب ترین طراحی را انجام دهد.

۱-۴- فصل بندی مطالب

این پژوهش در ۵ فصل ارائه می گردد که عبارت اند از:

فصل اول به بیان اهداف و لزوم انجام پژوهش می پردازد.

فصل دوم مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه روش های مختلف پایدارسازی توسط روش میخ کوبی صورت گرفته است می پردازیم و کلیاتی از روش میخ کوبی ، موارد کاربرد، آشنایی با مراحل اجرا و نکات فنی و اجرایی پرداخته می شود.

در فصل سوم نرم افزار Plaxis 2d و flac3d را معرفی می کنیم و نحوه مدل سازی در آن ها را شرح می دهیم .

در فصل چهارم بر اساس ضوابط آئین نامه ای تحلیل و طراحی سازه نگهبان میخ کوبی بیان می - گردد و نتایج مدل سازی ها در شرایط و تحت پارامترهای مختلف مقایسه و بررسی می گردد.

در فصل پنجم نتیجه گیری های حاصل از این پژوهش را بیان خواهیم کرد و پیشنهادهایی را برای سایر محققین بیان می کنیم .

فصل دوم

مطالعات انجام شده

با پیشرفت‌های به وجود آمده در راهسازی و راه‌آهن و عبور اینگونه راه‌ها از مناطق کوهستانی، مشکلات اجرایی زیادی برای مهندسان به وجود آمد که از جمله آنها، پایداری شیب‌های ناپایدار و ساخت دیوارهای حایل نگه‌دارنده در شرایط سخت محیطی و بر روی خاک‌های نرم بود. هزینه‌های بالای اجرای دیوارهای حایل صلب و به طور کلی روش‌های کلاسیک معمول، مهندسان طراح را به سمت استفاده از روش‌های دیگر پایدارسازی سوق داد به طوری که به تدریج، سیستم‌های انعطاف‌پذیر با نشست‌های نسبی نسبتاً بیشتری، جانشین روش‌های کلاسیک معمول شد. ساخت یک دیوار خاکی میخ‌کوبی شده شامل مسلح کردن خاک در حین انجام عملیات حفاری و گودبرداری، به وسیله یک سری میله است. این میله‌ها ذاتاً در کشش کار کرده و غالباً به موازات یکدیگر درون خاک کار گذاشته می‌شوند.

در طی دهه‌های گذشته، تجربه رفتار شیروانی‌ها و اغلب با گسیختگی آن‌ها، منجر به افزایش درک ما درباره شناسایی ضرورت‌ها و محدودیت‌های آزمایش‌های آزمایشگاهی و درجا برای ارزیابی مقاومت‌های خاک، توسعه انواع مؤثرتر و جدید ابزار گذاری برای مشاهده رفتار شیروانی‌ها، درک اصول مکانیک خاک که رفتار خاک را به پایداری شیروانی مرتبط می‌کنند، پروسه‌های تحلیلی اصلاح‌شده که با بررسی گسترده مکانیک آنالیزهای پایداری شیب تکمیل شده است، مقایسه جزئیات با رفتار صحرایی و استفاده از کامپیوترها برای انجام آنالیزهای کلی و دقیق شده است. باوجود فعالیت‌های کاهش‌دهنده ریسک ناپایداری که قبل از ساخت پروژه‌ها برنامه‌ریزی و طراحی می‌شود، بازهم عدم قطعیت‌ها به‌خصوص مرتبط با شناخت خاک وجود دارد. بنابراین اهمیت آنالیز پایداری شیروانی‌های موجود آشکار می‌شود. سیستم‌های مهار خاک و میخ‌کوبی خاک جهت پایدارسازی و نگهداری از سازه‌های طبیعی خاک طراحی می‌شوند، تا توسط المان‌های کششی، تغییر مکان‌های سازه را محدود نمایند. اساس طراحی بر مبنای انتقال بار از طریق اصطکاک یا چسبندگی خاک در ناحیه فصل مشترک خاک و مصالح تسلیح

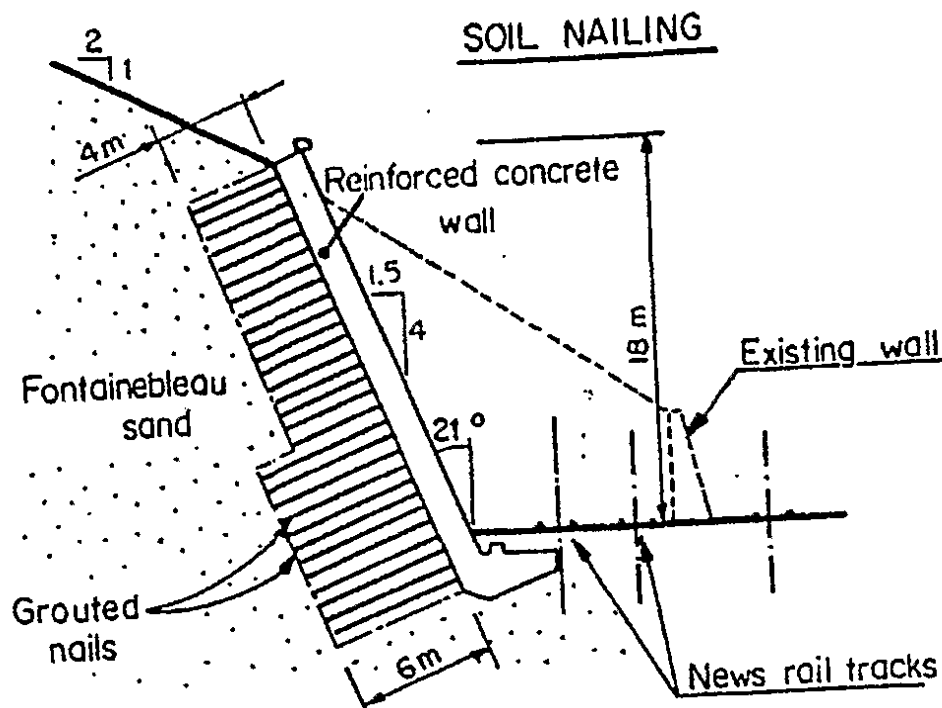
است. این سیستم‌ها، امکان به وجود آوردن سیستم‌های نگهداری افقی و قائم را به صورت در جا فراهم آورده است. از مزایای اجرای این سیستم‌ها، امکان پایدارسازی دیوارهای خاک بزرگ، در زمان کوتاه و با مراحل اجرایی کمتر نسبت به سایر روش‌ها و با صرف کمترین هزینه است. سه دهه اخیر در جهان به خصوص فرانسه، آلمان و اخیراً در آمریکا رایج شده است. فرضیه اصلی این نوع مقاوم‌سازی، مسلح کردن زمین به منظور افزایش مقاومت برشی خاک و مقید کردن جابه‌جایی آن است. قابل ذکر است که این سیستم، به مهندسان اجازه می‌دهد که از زمین برای ایجاد سازه‌های نگهبان نیز استفاده کنند. روش میخ‌کوبی از مزیت‌های زیادی نسبت به روش‌های معمول مقاوم‌سازی مانند دیوارهای حائل برخوردار است به علاوه دارای هزینه‌های کمتری نیز است لذا روزه‌به‌روز تقاضای مهندسين برای استفاده از این روش افزایش می‌یابد.

۲-۲- پیشینه میخ‌کوبی خاک

کاربردهای خاک مسلح در برج‌های بلند و چند طبقه هرمی شکل پلکان‌داری که به زیگورات مشهورند، همچنین در بخش‌هایی از دیوار چین مشاهده شده است، ساکنین آفریقا و جنوب آسیا با خاک مسلح آشنایی داشته و به طرق مختلف با استفاده از ورقه‌های بامبو، موی بز، کاه، نی و پوست درختانی مثل خرما خصوصیات بناهای خاکی خود را بهبود می‌بخشیدند. در ایران نیز ملات کاه‌گل نامی آشنا است که از دیرباز در ساختمان‌های روستایی مورد مصرف بوده است. مهندسان و معماران زیادی در طرح‌های خود از ایده خاک مسلح استفاده کرده‌اند اما روش‌های پیشنهادی مانستر، کوپنه و طرح ابتکاری هانری و یدال در فرانسه راه را برای ظهور سازه‌های خاک مسلح مدرن باز نمود.

مبدأ اصلی روش میخ‌کوبی خاک را می‌تواند سازه نگهبان بکار رفته در حفاری فضا‌های زیرزمینی که در روش تونل‌سازی اتریشی استفاده می‌شود دانست و تدبیر به کارگیری آرماتورهای فولادی غیرفعال و

شاتکریت در نگهداری شیب‌های سنگی به اوایل دهه ۱۹۶۰ برمی‌گردد. در سال ۱۹۶۳ یک مهندس فرانسوی بنام هانری وایدال روش تسلیح خاک را ارائه کرد که این روش به سرعت مراحل پیشرفت را طی کرد و فراگیر شد او دریافت وقتی مصالح دانه‌ای با مواد زبری که مقاومت کششی خوبی دارند ترکیب می‌شوند، ماده ترکیبی حاصل مقاوم‌تر از ماده اولیه خواهد بود. این ایده سبب توسعه سریع تسلیح خاک گردید و باعث شد موضوع تسلیح خاک فرم پیشرفته‌ای به خود بگیرد. این روش مقرون به صرفه و سریع‌تر (در بعضی موارد صرفه اقتصادی خاک مسلح نسبت به روش‌های کلاسیک به ۵۰ تا ۶۰ درصد می‌رسد، جدای از این مسأله که ریسک استفاده از شمع و تغییر مکان‌های زیاد و نهایتاً ناپایداری وجود ندارد.) از دیگر روش‌های نگهداری بود، به سرعت در فرانسه و دیگر کشورهای اروپایی به کار گرفته شد. اولین سازه خاک مسلح در بزرگراهی در سال‌های ۱۹۶۸ تا ۱۹۷۰ در جنوب فرانسه ساخته شد، همچنین اولین پروژه دیوار خاک میخکوبی شده در آمریکا در سال ۱۹۷۶ مورد بهره‌برداری قرار گرفت. در کشورهای پیشرفته، این روش به دلیل هزینه کمتر و سرعت اجرایی بالاتر به سرعت جایگزین روش‌های دیگر نگهداری خاک گردیده است. در اروپا دو مجموعه تحقیقاتی گسترده، درباره خاک میخکوبی شده ثبت شده است. اولین مورد آن در اواخر دهه ۱۹۷۰ در دانشگاه کارلس روهه آلمان و دومین مورد در دهه ۱۹۸۰ توسط دولت فرانسه است. در پروژه تحقیقاتی فرانسه، بر روی ۶ دیوار میخکوبی شده در مقیاس واقعی، آزمایش‌های لازم صورت گرفت، تا مبنایی برای تنظیم یک استاندارد در زمینه طراحی و اجرای این نوع سازه‌ها در فرانسه گردد نخستین دیوار میخکوبی شده در فرانسه طی سال‌های ۱۹۷۲-۱۹۷۳ در ورسای توسط شرکت‌های بویگوئس و سلتانس به منظور افزایش خطوط ریل راه‌آهن ساخته شد. این کار شامل یک دیوار موقتی به مساحت $1200 m^2$ و شیب ۷۰ درجه به ارتفاع ۱۸m در ماسه فونتین‌بلو بوده که توسط ۲۵۰۰۰ میلگرد فولادی به طول بیش از ۵ متر مسلح شده است.



شکل ۱-۲: دیوار میخ کوبی شده در ورسای

الیاس و یوران در سال ۱۹۹۰ اثر خزش^۱ درازمدت خاک را در کرنش دیوارهای میخکوبی شده بررسی کردند. تامسون و میلر در ۱۹۹۰ اثر ترکیبی میله‌های فولادی و دوغاب را در عملکرد دیوارهای میخکوبی شده به کمک ابزارهای کرنش‌سنج در پروژه‌ای در واشنگتن بررسی نمودند. بایرن در سال ۱۹۹۲ اندرکشن خاک-میله را بررسی کرد و مقدار بار حداکثر و محل کرنش ماکزیمم را در پیش‌بینی نمود. در سال ۱۹۹۶ سازمان بزرگراه‌های آمریکا مرجعی در ارتباط با طراحی و ساخت دیوارهای خاک میخکوبی شده منتشر کرد، که خلاصه‌ای از تحقیقات صورت گرفته در آلمان و فرانسه و آمریکا بود. در این مرجع، از روش تعادل حدی برای تحلیل استفاده می‌شود.

بریو و همکاران در سال ۱۹۹۷ مدل خاک مسلح شده در محل تکیه‌گاه‌های پل را شبیه‌سازی کرده و راهکارهایی را ارائه نمودند. ژانگ و همکاران در سال ۲۰۰۲ مدل‌سازی سه‌بعدی دیوارهای خاک

میخکوبی شده را به منظور پیش‌بینی حرکت خاک در مراحل مختلف اجرای دیوار انجام دادند که نتایج حاصله انطباق مناسبی با مقادیر اندازه‌گیری شده داشت.

چوک و همکاران در ۲۰۰۵ دیوارهای خاک میخکوبی شده در خاک‌های سست را که تحت اثر نفوذ آب‌های سطحی قرار دارند، مدل‌سازی نمودند و به این نتیجه رسیدند که اتصال انتهای میله‌ها به سطح دیوار نقش عمده‌ای در کاهش تغییر مکان دیوارهای خاک میخکوبی شده در زمینه‌ای سست دارد. چنگ و همکاران در سال ۲۰۰۸ به بررسی شیب بهینه برای سطح دیوارهای خاک میخکوبی شده پرداختند و رابطه بین شیب خاک‌ریز با شیب میله‌ها را در حالت بهینه به دست آوردند.

سیواکومار و همکاران در سال ۲۰۰۸، مدل‌سازی عددی دیوارهای خاک میخکوبی شده را در شرایط لرزه‌ای انجام دادند، که نتایج نشان داد که تسلیم خاک به کمک میله‌های فولادی موجب عملکرد بهتر گودبرداری در هنگام زلزله می‌گردد. وان‌هو و همکاران در سال ۲۰۰۸ مدل‌سازی دیوارهای خاک میخکوبی شده را به منظور بررسی رابطه بین نیروی بیرون کشیدگی در میله‌ها با اتساع خاک انجام دادند. لی و همکاران در سال ۲۰۰۹ اثر فشار سربار و زاویه اتساع خاک را بر مقاومت بیرون کشیدگی میله‌ها بررسی کرده و نشان دادند که مقاومت بیرون کشیدگی با افزایش زاویه اتساع خاک به‌طور عمده‌ای افزایش می‌یابد. وی و چنگ در ۲۰۱۰ روش‌های تعادل حدی و کاهش مقاومت را در مسائل مختلف مربوط به دیوارهای میخکوبی شده، مورد مقایسه قرار دادند.

۲-۳- مطالعات انجام‌شده در روش میخ‌کوبی

میخکوبی روش مسلح کردن درجای خاک است. مفهوم پایه‌ای میخکوبی شامل مسلح کردن زمین توسط المان‌های غیرفعال و نزدیک به هم، به منظور ایجاد سازه ثقلی منسجم است و بدین وسیله مقاومت برشی کلی خاک محل افزایش می‌یابد و جابجایی آن محدود می‌شود. سیستم میخکوبی برای کاربردهای

موقت و دائمی می تواند لحاظ شود. دیوار میخکوبی می تواند بارهای قائم استاتیکی و دینامیکی را، بدون متحمل شدن جابجایی های بیش از اندازه، تحمل کند. میخکوبی شامل میلگرد فولادی است که می تواند تنش های کششی، برشی و ممان خمشی را تحمل کند. رویه و نمای میخکوبی المان باربر قابل توجهی نیست اما نسبتاً، پایداری موضعی خاک بین لایه های مسلح را تأمین، و از فرسایش و هوازگی سطح جلوگیری می کند. این رویه عموماً شامل یک لایه نازک شاتکریت مسلح است.

فان و لئو در سال ۲۰۰۷ زاویه بهینه میخ برای شیروانی میخکوبی شده با انواع شرایط هندسی و اثر طول میخ بر ضریب اطمینان را مورد بررسی قرار داد. آن ها نتیجه گرفتند اگر L/H بزرگ تر از 1 باشد اثر طول میخ بر پایداری کلی تقریباً ناچیز است. همچنین نشان دادند که اثر طول میخ در $1/3$ پایینی شیب بر پایداری شیب بسیار مهم است. ساباتینی در سال ۱۹۹۵ نشان داد که مقدار کلی طول مورد نیاز میخ ها کاهش می یابد اگر میخ ها در قسمت پایینی شیب قرار گیرند. بر اساس آنالیز گود $4/5$ متری با شیب 70° درجه، پیشنهاد شد که میخ ها باید در قسمت میانی بلندتر باشند تا طول کلی مسلح کننده ها مینیمم شود. بعلاوه پیشنهاد کرد که قرارگیری افقی میخ ها بهینه ترین جهت است، به جز برای پایین ترین میخ ها که بر اساس تحلیل تعادل حدی انجام گرفت. شفیی در سال ۱۹۸۶ تحقیقاتی را در مورد اثر جهت یابی میخ ها بر تغییر شکل دیوارهای میخکوبی شده با استفاده از روش اجزاء محدود انجام داد. دیوارها با شیب میخ های 30° و 40° درجه نسبت به افق تحلیل شدند. تغییر شکل در نمای دیواری که میخ های 30° درجه نصب بودند بزرگ تر از میخ های افقی بود. جویل در سال ۱۹۸۰ یک سری آزمایش های برش مستقیم آزمایشگاهی برای بررسی اثر شیب میخ های انعطاف پذیر بر افزایش مقاومت برشی توده خاک در گسیختگی انجام داد. زاویه بهینه میخ ها نسبت به نرمال سطوح برش خورده به منظور بسیج کردن ماکزیمم مقاومت برشی در توده خاک حدود 30° درجه است. پائولو در سال ۲۰۰۵ نشان داد که اگر ردیف اول عمیق تر نصب شود خیز قابل توجهی رخ می دهد که جبران آن در ادامه ساخت مشکل است.

طول آزاد بلندتر مخصوصاً برای مهارى اول، منجر به خيز کمتر مى شود. وى اثر زاويه اصطكاك داخلى خاك، شيب و تراز مهارى، بر نيروى مهارى را موردبررسى قرارداد.

۲-۴- اجراى روش ميخ كوبي

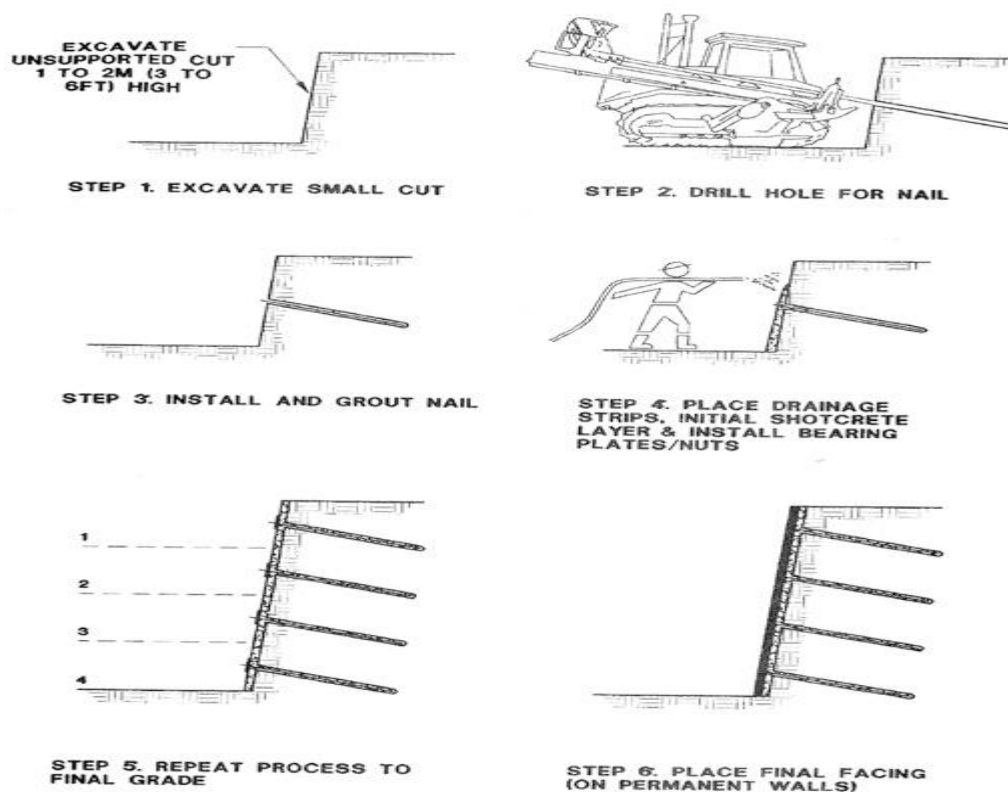
مصالح تسليح كننده در خاك باعث مى شود تا خاك بارى بيش از ظرفيت خاك غير مسلح را تحمل كند. وقتى بارهاى اعمالى ناشى از وزن خود توده خاك است مانند شيب خاكريز راه، بند يا سد خاكى، وجود مصالح تسليح كننده موجب افزايش شيب بند يا سد خاكى مى شود و وقتى بارهاى اعمالى ناشى از بارگذاري خارجى است مانند روسازى جاده يا يك سكوى كار، وجود مصالح تسليح كننده موجب مى شود تا خاك مسلح قادر به تحمل بارهاى خارجى باشد. اين بهبود در ويژگي هاى مكانيكى خاك ناشى از وجود نيروى كششى در تسليح كننده ها است بدین صورت كه در اثر تغيير شكل برشى خاك، در مصالح تسليح كننده نيروى كششى به وجود مى آيد و اين نيروى كششى در مصالح تسليح كننده موجب بهبود ويژگي هاى مكانيكى خاك مى گردد.

وقتى خاك در امتداد يك سطح گسيختگى تغيير شكل برشى مى دهد، کرنش هاى كششى و فشارى به وجود مى آيد. اگر مصالح تسليح كننده در جهت کرنش كششى خاك قرار داده شوند موثر واقع مى گردند. زيرا کرنش كششى ناشى از تغيير شكل برشى خاك موجب ايجاد نيروى كششى در مصالح تسليح كننده شده كه اين نيروى كششى به دو صورت موجب بهبود ويژگي هاى مكانيكى خاك مى شود. نخست، مولفه افقى اين نيرو به طور مستقيم با نيروى برشى ايجاد شده مقابله مى كند و دوم، مولفه عمودى آن موجب افزايش نيروى بر سطح برش مى شود و در نتيجه مقاومت برشى بيشترى در خاك به وجود مى آيد.

اگر فرض شود كه نيروى كششى موجود در تسليح كننده ها واقع بر يك سطح برشى در خاك P_r باشد. مولفه مماسى اين نيرو $P_r \sin \theta$ خواهد بود كه به طور مستقيم با بار برشى اعمالى بر توده

خاک مقابله می‌کند (سازوکار نخست) و مولفه عمودی آن برابر $P_r \cos \theta$ است که نیروی قائم بر سطح برش را افزایش می‌دهد و در نتیجه موجب تغییر مقاومت اصطکاکی بیشتری در خاک می‌گردد. (ساز و کار دوم) بنابراین مقاومت برشی یک خاک غیر مسلح که برابر با $P_s = P_v \tan \phi + c$ است به مقدار $P_s = P_v \tan \phi + P_r (\sin \theta + \cos \theta \cdot \tan \phi) + c$ در خاک مسلح افزایش می‌یابد.

به طوری که از مطالب گفته شده بالا مشخص است، اندازه و علامت نیرو در تسلیح کننده توسط اندازه و علامت کرنش‌ها در خاک اطراف آن کنترل می‌گردد و برای به دست آوردن حداکثر استفاده از مصالح تسلیح کننده باید آنها را در جهت کرنش‌های اصلی کششی در خاک قرار داد. اگر مصالح تسلیح کننده در جهت دیگری قرار گیرد، قابلیت آنها کاهش می‌یابد و چنانچه آنها را در جهت کرنش‌های صفر قرار دهند، وجود آنها نه تنها موجب افزایش توان باربری خاک نمی‌گردد، بلکه برعکس آن را کاهش می‌دهد. چون به طور معمول، اصطکاک سطحی آنها با خاک کمتر از خود خاک است. بنابراین با وجود این مصالح، سطوح لغزش ضعیف‌تری ایجاد می‌گردد. همچنین در صورت استفاده از یک یا تعداد محدودی مصالح تسلیح کننده، برای به دست آوردن بیشترین استفاده باید آنها را در جهت کرنش‌های کششی اصلی در نقاطی که دارای کرنش‌های حداکثر هستند، قرار داد تا نیروی کششی حداکثر در مصالح تسلیح کننده به وجود آید. از طرف دیگر مسلم است که نیروی کششی در مصالح تسلیح کننده توسط میزان پیوستگی میزان خاک و مصالح تسلیح کننده کنترل می‌گردد. این تنش پیوستگی که دارای ساز و کار اصطکاکی است وقتی دارای بزرگترین مقدار است که تنش فشاری حداکثر در خاک، عمود بر صفحه مصالح تسلیح کننده اثر نماید. از این نظر نیروی کششی حداکثر وقتی در مصالح تسلیح کننده به وجود می‌آید که این مصالح تسلیح کننده در جهت عمود بر تنش فشاری حداکثر قرار گیرند. چون خوشبختانه محورهای اصلی تنش و نمودارهای کرنش به طور تقریبی به هم نزدیک هستند، بنابراین هر دو جهت بهینه گفته شده در بالا یکی هستند.



شکل ۲-۲: مراحل اجرای میخ کوبی

۲-۴-۱- گودبرداری

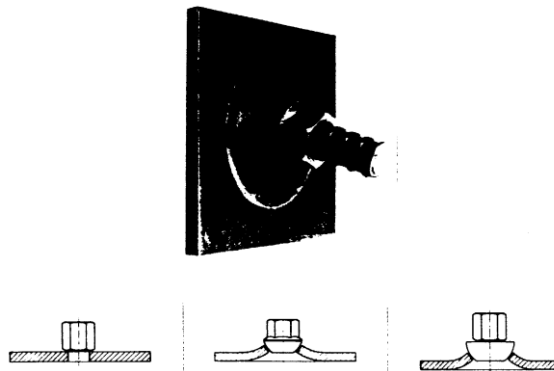
گودبرداری اولیه تا عمقی صورت می‌پذیرد که دیواره گودبرداری شده بتواند در مدت کوتاهی بین ۲۴ تا ۴۸ ساعت پایداری خود را حفظ کند. عمق گودبرداری جهت تأمین کوتاه‌مدت پایداری در بین ۱ تا ۲ متر است. عرض گودبرداری انجام‌شده حداقل باید به‌اندازه‌ای باشد که بتوان ابزارهای لازم را در محل مستقر کرد. عرض مش فولادی در تعیین عرض گودبرداری مؤثر است، درعین‌حال خاک‌برداری در عرض‌های بزرگ‌تر از ۱۲ متر موجب افزایش تغییرشکلهای افقی می‌گردد. پانل‌های خاک‌برداری، یک‌درمیان برداشت می‌شوند.

۲-۴-۲- حفاری گود برای اجرای میخ

گودهای موردنظر با طول، قطر و شیب مشخص اجرا می‌شوند و امتداد آن‌ها تقریباً افقی است. از سوراخ داخل میخ‌ها نه تنها برای تزریق آب یا هوا در حین حفاری، بلکه برای تزریق دوغاب بعد از حفاری نیز استفاده می‌شود. که شرکت (TITAN) از پیشگامان استفاده کننده از این میخ‌ها می‌باشد

۲-۴-۳- نصب میخ و دوغاب ریزی

در این مرحله میلگردهای فولادی (میخ‌ها) در چال‌های پیش حفاری شده کار گذاشته می‌شوند. میلگردهای به‌کاررفته شده اغلب تو پر هستند اما می‌توان از میلگردهای توخالی نیز مطابق به آیین‌نامه اجرایی وزارت راه آمریکا مربوط به میخکوبی با میلگردهای توخالی نیز استفاده کرد. جهت آنکه راستای میلگردها دقیقاً در امتداد محور استوانه چال‌های حفرشده باشد از ابزاری به نام مرکز کننده استفاده می‌شود که باعث می‌شود میلگرد دقیقاً در وسط گمانه قرار بگیرد و ضخامت دوغاب در اطراف آن یکسان شود. میلگردها در داخل مرکز کننده‌ها فرورفته و سپس در داخل چال، جاگذاری می‌شوند. در همین حال یک لوله دوغاب ریزی به انتهای چال رفته و فضای خالی باقی‌مانده را از انتها تا ابتدای چال دوغاب ریزی می‌کند. برای دوغاب از سیمان پرتلند با حداقل مقاومت 15000 psi استفاده می‌شود، به منظور پایین آوردن نسبت آب و همین‌طور افزایش میزان روانی دوغاب از مواد افزودنی استفاده می‌شود معمولاً نسبت آب به سیمان اولیه بین $0/36$ تا $0/44$ و برای دوغاب ثانویه در خاک‌های چسبنده $0/5$ می‌باشد. به منظور تزریق نیز از یک مخلوط‌کن ملایم و سیمان و سپس یک مخلوط‌کن سریع به منظور همگن شدن مایع دوغاب در حین تزریق و یک پمپ استفاده می‌شود و به منظور قرارگیری میلگرد در مرکز دوغاب از یک مرکزی‌ساز استفاده می‌شود این امر در تعیین مقدار لنگر پلاستیک بسیار موثر است.



شکل ۲-۳: مهره و صفحه سرمیخ یا مهار

۲-۴-۴- ساخت پوشش شاتکریت موقتی

قبل از آنکه مرحله بعدی گودبرداری شروع شود شاتکریت جهت یکپارچه‌سازی ابتدای میخ‌ها و کل سیستم بر روی سطح گود پاشیده می‌شود. نحوه متداول اجرا به این صورت است که از یک پوشش شاتکریت با تسلیح فولادی استفاده می‌شود. تسلیح فولادی اغلب شبکه مش بندی شده از سیم‌های به هم جوش خورده است. طول پانل‌های مش فولادی جوش خورده باید به اندازه‌ای باشد که هر پانل با پانل کنار تا اندازه‌ای همپوشانی داشته باشد. رخیوش بتن‌پاشی به ضخامت ۱۰-۲۵cm برای اکثر سازه‌های نگهبان موقتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نوع رخیوش یک لایه سطحی پیوسته و انعطاف‌پذیر به وجود آورده که می‌تواند حفره‌ها و ترک‌های سطح گودبرداری شده را پر نماید. بتن‌پاشی معمولاً توسط شبکه‌های فلزی جوش داده شده، مسلح شده و ضخامت نهایی مورد نیاز، با لایه‌های متوالی بتن‌پاشی (ضخامت هر لایه ۹ تا ۱۲ سانتیمتر) تأمین می‌شود این تکنیک نسبتاً ساده و ارزان است، ولی ممکن است زیبایی و کیفیت مورد نیاز برای سازه‌های دائمی را تأمین ننماید دوام رخیوش بتن‌پاشی تحت تأثیر آب زیرزمینی، تراوش و عوامل محیطی مانند تغییرات آب و هوایی (مثل یخ‌زدگی که باعث ایجاد ترک‌خوردگی می‌شود) قرار دارد. از این رو در استفاده از بتن‌پاشی، ایجاد زهکش در سطح مشترک خاک و بتن پاشی مشکل می‌باشد.

۲-۴-۵ - ساخت دیواره میخ‌کوبی شده تا عمق موردنظر

پس از به عمل آمدن توجیه‌پذیری اقتصادی و فنی میخ‌کوبی در مقابل سایر راه‌حل‌ها، با یکی از روش‌های موجود طراحی، به طراحی میخ‌های پرداخته می‌شود و مشخصات مورد نیاز برای اجرای از جمله سطوح مقطع و طول میخ‌ها، فواصل قائم و افقی آنها و زاویه تمایل آنها نسبت به افق تعیین و سپس عملیات اجرایی آغاز می‌گردد. برای کنترل تغییر شکل‌ها و رفتار سیستم میخ‌کوبی راه‌حل‌های متفاوتی وجود دارد که عبارتند از تعیین یک نقطه ثابت با فاصله مناسب از دیواره به عنوان پیچ مارک و قرائت تغییر شکل‌گیری سازه در طی اجراء و همچنین نصب کرنش‌سنج‌ها در کناره میخ (در زیر یا روی میخ به دلیل به وجود آمدن تغییر شکل‌های خمشی مقادیر کرنش‌ها غیر واقعی هستند) در برخی از موارد نیز از ابزارهای قائم‌سنج که مقدار کج‌شدگی دیواره را نشان می‌دهد استفاده می‌شود. در حین اجراء نیز چند میخ انجام تست کشش نصب می‌شوند و بایستی باری برابر ۲ تا ۳ برابر حالت سرویس را تحمل نمایند پس از حصول اطمینان از تمامی موارد میخ‌ها به مقدار کمی کشیده می‌شوند و بتن پاشی نهایی بر روی آنها انجام می‌گیرد.

۲-۴-۶ - ساخت پوشش دائمی و نهایی

وقتی گودبرداری تا عمق موردنظر ادامه یافت، سیستم میخ‌کوبی شده در تمام سطح دیوار نصب شد و نیز آزمایش‌های لازم جهت اطمینان از عدم رخداد هر نوع گسیختگی انجام گرفت، ممکن است پوشش نهایی و دائمی ساخته شود. همان‌طور که گفته شد از پوشش دائمی در شرایطی استفاده می‌شود که از دیوار میخ‌کوبی جهت سیستم پایدارسازی دائمی گود بهره گرفته‌شده باشد. برای پوشش‌های دائمی ممکن است از بتن مسلح درجا، شاتکریت مسلح و یا پانل‌های پیش‌ساخته استفاده شود.

۲-۴-۷ - مقاومت چسبندگی بین خاک و ملات در دیوارهای میخ‌کوبی شده

ظرفیت بیرون کشیدگی میخ یک عامل مهم در تحلیل و طراحی دیوارهای میخکوبی شده است، که به دو عامل اصلی اندازه مجموعه میخ و مقاومت چسبندگی بین خاک و ملات بستگی دارد. از بین این دو عامل اندازه مجموعه میخ با توجه به فرضیات طراحی مشخص بوده ولی به دلیل عدم شناخت کافی در مورد رفتار اندرکنشی بین خاک و ملات در طول میخ نمی‌توان مقدار دقیقی برای این پارامتر مشخص کرد، و از طرفی یک فرآیند استاندارد آزمایشگاهی خاص نیز برای آن وجود ندارد. بنابراین در مرحله طراحی این پارامتر اغلب توسط مهندس طراح فرض می‌گردد (با توجه به شرایط میدانی و شرایط خاک) و سپس به وسیله آزمایش بیرون کشیدگی در طی ساخت اصلاح می‌شود.

۸-۴-۲- تأثیر شرایط خاک بر مقاومت بیرون کشیدگی میخ

ویژگی‌هایی از خاک که روی مقاومت بیرون کشیدگی اثر می‌گذارند شامل مقاومت، اندازه ذرات، اتساع و درجه اشباع خاک می‌باشند. یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر مقاومت بیرون کشیدگی میخ، خاک اطراف میخ است. برای مثال، اگر یک میخ با روش یکسان در رس سیلتی، ماسه و شن ماسه دار نصب شود، ممکن است مقادیر مقاومت بیرون کشیدگی حدود ۴۰-۸۰ کیلو پاسکال، ۱۰۰ کیلو پاسکال و ۲۰۰ کیلو پاسکال حاصل شود. اندازه و شکل ذرات که بستگی به اتساع خاک دارند، به‌طور عمده روی رفتار بیرون کشیدگی و مقاومت بیرون کشیدگی مؤثرند. برای خاک‌هایی که دارای ذرات بزرگ‌تر و یکنواخت‌تر با اشکال نامنظم هستند، هنگام بیرون کشیدن میخ ذرات چرخیده و تغییر آرایش داده که منجر به اتساع خاک می‌شود. اگر اتساع خاک محدود شود، افزایش تنش قائم نتیجه می‌شود که آن نیز منجر به افزایش مقاومت بیرون کشیدگی می‌شود. به مطالعه تأثیر اتساع روی مقاومت بیرون کشیدگی پرداخت.

۲-۵- شرایط مطلوب خاک برای میخ‌کوبی

در تمامی دیوارهای میخ‌کوبی شده دائمی و برخی مواقع در دیوارهای موقت، لازم است تا قدرت خوردندگی خاک ارزیابی گردد. به طور کلی خاک‌های با پتانسیل زیاد مانعی برای استفاده از میخ‌کوبی نمی‌باشد، مشروط به اینکه در زمان طراحی، نوع سازه و نحوه محافظت از میله‌های میخ در مقابل زنگ‌زدگی مورد توجه قرار گیرد. پتانسیل خوردندگی بیشتر در خاک‌های خورنده مطرح است و بر اساس خواص زیر سنجیده می‌شود:

- PH خاک (میزان یون هیدروژن)

- مقاومت الکتریکی

- میزان کلراید

- میزان سولفات

- وجود جریان‌های سرگردان

محافظت در برابر خوردندگی می‌تواند به صورت فیزیکی یا شیمیایی و یا ترکیبی از هر دو تامین گردد. محافظ‌های فیزیکی نظیر روکش‌های پلاستیکی، مانعی در برابر خوردگی بر روی قطعات فولادی ایجاد می‌کنند. محافظ شیمیایی نیز به کمک یک ماده قربانی انجام می‌شود و یا با استفاده از یک ماده نارسا از ورود جریان الکتریکی جلوگیری می‌شود. علاوه بر موارد گفته شده زمانی که شدت جریان الکتریکی زیاد باشد عایق‌بندی الکتریکی میخ‌ها ضرورت پیدا می‌کند. روش‌های گوناگونی برای حفاظت میخ‌ها در برابر خوردگی وجود دارد که می‌توان از روش‌های محافظت دوغاب، روکش رزینی و دوغاب، روکش گالوانیزه و دوغاب و ایزوله‌سازی (حفاظت مضاعف) به عنوان نمونه‌ای از آن‌ها نام برد.

معیار به کار رفته برای پتانسیل خوردندگی زمین در ارائه شده است. در صورتیکه هر یک از شرایط گفته شده از حد مجاز عنوان شده بیشتر باشد، خاک در دسته خورنده قرار خواهد گرفت.

همچنین اگر تمامی شرایط مذکور دارای مقادیر رضایت بخش باشند، زمین جزء دسته بی خطر (یا کم خطر) از نظر خوردگی قرار دارد.

Test	Units	Strong Corrosion Potential/Aggressive	Mild to no Corrosion Potential/Non-Aggressive	ASTM Standard	AASHTO Test Method
PH	–	< 4.5, > 10	5.5 < pH < 10	G51	T 289-91
Resistivity	ohm-cm	< 2,000	Greater than 5,000	G57	T 288-91
Sulfates	ppm ⁽¹⁾	> 200	Less than 200	D516	T 290-91
Chlorides	ppm	> 100	Less than 100	D512	T 291-91
Stray current	–	Present	–	–	–

Note: (1) ppm = parts per million.

جدول ۱-۲ :

درواقع شرایط خاک هنگامی برای ساخت SNW مطلوب فرض می شود که نتایج آزمون های محلی، صلاحیت خاک را تأیید نمایند. آزمون نفوذ استاندارد (SPT) که عدد SPT-N را به دست می دهد، می تواند برای تعیین شرایط مطلوب خاک اعتمادپذیری لازم را داشته باشد.

بر اساس معیارهای عمومی فوق الذکر، تقسیم بندی خاک های مطلوب برای ساخت SNW ها به صورت ذیل است.

۲-۵-۱- خاک های ریزدانه سفت یا سخت

خاک های ریزدانه (یا چسبنده) ممکن است شامل رس های سفت یا سخت، سیلت های رس دار، رس های لای دار، رس های ماسه دار، لای های ماسه دار و ترکیبی از آنها باشد. این گونه خاک های ریزدانه به طور تجربی می تواند شامل خاک های سفت باشد که عدد SPT-N آنها لااقل ۹ ضربه به ازای ۳۰۰ میلی متر است. باین حال برای تعیین مشخصات استقامتی خاک های ریزدانه، نباید منحصرأ به مقادیر SPT-N تکیه شود. در عوض، مشخصات استقامتی (مقاومت برشی) باید به وسیله دیگر

آزمایش‌های محلی یا آزمایشگاهی تهیه شود. برای به حداقل رساندن جابجایی‌های افقی درازمدت SNWها، خاک‌های ریزدانه باید خاصیت خمیری نسبتاً کمی داشته باشند یعنی به‌طور کلی $(PI < 15)$

۲-۵-۲- خاک‌های دانه‌ای متراکم تا خیلی متراکم با کمی چسبندگی ظاهری

این‌گونه خاک‌ها شامل ماسه و شن می‌باشند و اعداد SPT-N بزرگ‌تر از ۳۰ را نتیجه می‌دهند و با مقداری ریزدانه (معمولاً نه بیشتر از ۱۰ تا ۱۵ درصد) یا باسیمان طبیعی برای تأمین چسبندگی همراه هستند. نیروهای موئینگی در ماسه‌های ریز ممکن است یک چسبندگی ظاهری ایجاد نماید؛ در کل، چسبندگی ظاهری برای این خاک‌ها باید بزرگ‌تر از ۵ کیلو پاسکال باشد تا زمان خود پایداری معقولی را تضمین نماید. برای جلوگیری از قطع شدید نیروهای موئینگی و به‌واسطه آن کاهش در چسبندگی ظاهری، لازم است جریان آب به سمت سطح گودبرداری به حداقل برسد که این عمل می‌تواند از طریق تغییر جهت دادن مسیر جریان آب انجام شود.

۲-۵-۳- سنگ هوازده بدون هیچ‌گونه سطوح شکست

سنگ هوازده به شرطی می‌تواند یک تکیه‌گاه مناسب برای میخ‌ها تأمین نماید که سطوح شکست در جهت‌های نامطلوب غالب نباشد. همچنین مطلوب است که درجه هوازده‌گی در کل سنگ تقریباً یکنواخت باشد که در این حالت تنها کافی است یک روش حفاری و نصب میخ اتخاذ گردد؛ برعکس تغییرات زیاد در هوازده‌گی سنگ در یک سایت ممکن است گروه مجری را مجبور به تعویض تجهیزات حفاری و یا تغییر روش‌های نصب نماید و به‌واسطه آن اجرای SNW را پرهزینه سازد.

این گونه خاک‌ها معمولاً برای کاربرد SNW مناسب هستند به دلیل آنکه معمولاً متراکم، خوب دانه‌بندی شده یا با مقدار محدودی ریزدانه همراه هستند.

۲-۶- طراحی سازه نگهبان به وسیله روش حدی

میخ‌کوبی خاک یک روش در جای تسلیح خاک است که در دو دهه اخیر در کشورهای مختلف جهت پایدارسازی گودبرداری‌های عمیق و همچنین پایدارسازی شیب‌های طبیعی، کاربرد وسیعی پیدا کرده است. همچنین آئین‌نامه تونل‌اتریش این روش را جهت تسلیح تونل‌ها، به عنوان یک نگه‌دارنده انعطاف‌پذیر در حفاری‌های زیرزمینی پیشنهاد داده است. از این روش در جهت پایدارسازی ترانشه‌های راه‌آهن و بزرگراه‌ها، لغزش زمین، مدخل تونل‌ها جهت پایدارسازی خاک‌های لایه‌ای ضعیف و ناپایدار و دیگر پروژه‌های عمرانی، استفاده شده است. اساس این سیستم بر مبنای کاربرد مصالح تسلیح کششی در ناحیه مقاوم خاک است که در فاصله کمی نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند. سیستم‌های میخ‌کوبی شده قابلیت تحمل بارهای قائم استاتیکی و دینامیکی را دارا می‌باشند. از این رو می‌توان از این سیستم جهت ساخت کوله پل‌ها استفاده نمود. همچنین می‌توان از این سیستم جهت پایدارسازی و تعمیر سازه‌های خاکی موجود نیز بهره برد. در سیستم‌های میخ‌کوبی شده، مصالح تسلیح عموماً از میلگردهای فولادی که قابلیت تحمل نیروهای کشش و تاندازه‌ای برشی را دارند تشکیل شده است. این مصالح را می‌توان در داخل سوراخ‌های از قبل حفاری شده قرارداد و سپس عملیات تزریق را در اطراف آن‌ها انجام داد. یا اینکه میخ‌ها، بدون عملیات حفاری، در زمین کوبیده شوند. میخ‌ها از نوع پیش کشیده شده نیستند اما دارای فاصله کمی نسبت به یکدیگر می‌باشند. سطح سازه میخ‌کوبی شده از نظر باربری نقش عمده‌ای ندارد اما می‌تواند به عنوان یک محافظ در برابر فرسایش و خوردگی عمل نماید. این سطح عموماً از یک لایه بتن تشکیل شده است که این بتن بر روی یک شبکه توری فلزی پاشیده می‌شود. از جمله مزایای روش‌های مهار و میخ‌کوبی خاک، می‌توان به امکان ایجاد یک پایدارسازی اولیه و موقت در حین عملیات

خاک‌برداری، کاهش مقدار حفاری و کارهای بتنی در پی‌سازی، حذف خاک‌ریز پشت دیوارها، امکان اجرای سریع میخ‌کوبی در داخل خاک با توجه به اینکه میخ‌ها، پیش کشیده نیستند و امکان اجرای سریع و ارزان دیوار نما که معمولاً بتن پاشی می‌شود، استفاده از مصالح ارزان‌تر، انعطاف‌پذیری و اجرایی بودن اشاره نمود. سازه‌های میخ‌کوبی شده دارای انعطاف‌پذیری سازه‌ای بیشتری نسبت به سایر روش‌های تسلیح و دیوارهای بتنی مسلح می‌باشند. این سازه‌ها دارای امکان نشست‌پذیری نهایی و نسبی بیشتری می‌باشند بنابراین در مناطق فعال از نظر زلزله، مناسب‌تر می‌باشند.

از معایب و محدودیت‌های عمده میخ‌کوبی می‌توان به مشکل بودن ساخت سیستم‌های زهکشی مناسب در خاک‌های ریزدانه، نقش خزش در رس‌های پلاستیک در پایداری درازمدت سازه و تغییر مکان‌های جانبی عدم بسیج ظرفیت از جادرآمدگی مصالح تسلیح به‌طور کامل در خاک‌های چسبنده نرم، امکان خوردگی مصالح در محیط‌های مخرب اشاره نمود.

همچنین این نکته قابل‌ذکر است که برای اینکه یک سیستم میخ‌کوبی شده به‌طور کامل کار کند، بایستی خاک تغییر مکان جانبی داشته باشد تا در میخ‌ها نیروی کششی به وجود آید، لذا در مناطق شهری، بایستی فاصله موردنیاز بین توده میخ‌کوبی شده و سازه مجاور آن حفظ شود تا از به وجود آمدن بارهای اضافه بر سازه مجاور جلوگیری شود.

رفتار یک سیستم خاک مسلح بستگی به پارامترهای مختلفی نظیر هندسه سازه، مراحل اجرا، دانسیته و مشخصات مکانیکی خاک، دانسیته مصالح تسلیح، تغییرشکل طولی آن‌ها، سختی خمشی مصالح تسلیح، زاویه مصالح تسلیح نسبت به سطح گسیختگی و ... دارد. در مکانیزم اندرکنش بین خاک و مصالح تسلیح، چه در خاک مسلح و چه در سیستم میخ‌کوبی، تنش اصطکاکی بسیج شده در طول مصالح تسلیح، از تغییرشکل جانبی سازه جلوگیری می‌کند. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی مدل‌های حقیقی خاک مسلح و خاک میخ‌کوبی شده نشان می‌دهند که این دو سیستم از نظر موقعیت

حداکثر نیروی کششی به وجود آمده در مصالح تسلیح، قابل مقایسه می‌باشند. گسیختگی در یک توده مسلح می‌تواند بر اثر گسیختگی مصالح تسلیح، از جادرآمدگی مصالح تسلیح از داخل خاک رخ دهد.

تحقیقات انجام‌شده بر روی مدل‌های حقیقی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که تغییر مکان نسبی جانبی لازم جهت بسیج شدن نیروهای کششی در داخل مصالح تسلیح در هر دو سیستم خاک مسلح و میخ‌کوبی خاک، در حد میلی‌متر می‌باشند. این تحقیقات نشان می‌دهند که حداکثر این تغییر مکان‌ها در حدود ۵/۰٪ ارتفاع دیوار می‌باشند.

تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهند که در خاک‌های دانه‌ای کوبیده شده اصطکاک خاک-مصالح تسلیح بستگی کامل به رفتار اتساعی خاک دارد. تحت تنش‌های برشی بسیج شده در ناحیه فصل مشترک، خاک دانه‌ای که در نزدیکی ناحیه تسلیح قرار دارد، تمایل به اتساع خواهد داشت. اما این اتساع توسط توده خاک اطراف و بالای آن محدود می‌شود. این اثر محدودکننده به علت تمرکز تنش‌های قائم وارد بر ناحیه تسلیح است که تابعی از تنش‌های قائم بکار رفته است و نه فقط وزن خاک بالای خاک مسلح.

یکی از عمده‌ترین مسائل در طراحی میخ‌ها در سیستم خاک میخ‌کوبی شده تعیین نیروی به وجود آمده در میخ‌ها است. روش‌های مختلفی جهت تعیین این نیرو وجود دارد. به‌طور کلی این روش‌ها را می‌توان به ۵ دسته کلی زیر طبقه‌بندی کرد:

۱- استفاده از نمودارهای تجربی فشار جانبی خاک

۲- روش نیرو-جابجایی ($p-y$)

۳- تحلیل المان‌های محدود

۴- روش‌های معادلات حدی

بررسی تحقیقات و مطالعات گذشته نشان می‌دهد که تعادل نیروها اساس کار تقریباً کلیه روش‌های طراحی میخکوبی خاک است. سطح بحرانی لغزش در اکثر روش‌های قبلی صفحه بوده و برنامه‌های رایانه‌ای موجود که برای پیش‌بینی رفتار و طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرند چنین سطوحی را بررسی می‌کنند. بنابراین به نظر می‌رسد که با توجه به رفتار واقعی شیب‌های میخکوبی شده در نظر گرفتن سطوح غیر صفحه‌ای منجر به دقت بیشتری در بررسی این گونه شیب‌ها می‌گردد.

در طراحی سازه‌های خاکی میخکوبی شده بایستی همواره توجه به قسمت میانی دیواره منعطف گردد. روش‌های معمول طراحی تقریباً همگی پایداری کلی توده میخکوبی شده را در نظر می‌گیرند در حالی که در این روش ابتدا نیروهای به وجود آمده در میخ‌ها به دست آمده و سپس با توجه به این نیروها طول لازم جهت هر میخ در هر سطح به گونه‌ای به دست می‌آید تا پایداری موضعی میخ تأمین شود. محاسبات نشان می‌دهند که حتی با در نظر گرفتن ضریب اطمینان پایداری موضعی برابر یک، ضریب اطمینان کلی سازه بالاتر از ۲ خواهد بود و این مسئله اهمیت تأمین پایداری موضعی سازه میخکوبی شده را نشان می‌دهد. سازه خاکی را با زاویه منفی برای میخکوبی می‌توان طراحی نمود تا اولاً از تعدادی از میخ‌ها به عنوان زهکش استفاده کرد و سطح ایستایی آب را پایین برد و ثانیاً کارایی میخ را بالا برد. بنابراین زمینه برای استفاده از سیستم میخکوبی در خاک‌های ریزدانه اشباع بیشتر فراهم می‌گردد.

هرچند بکار بردن سیستم‌های میخکوبی و مهاربندی خاک در خاک‌های ریزدانه چسبنده توصیه نشده است، اما انجام تحقیقات بعدی بر روی سیستم گسیختگی خاک و همچنین بررسی اندرکنش این گونه خاک‌ها با مصالح ضروری به نظر می‌رسد.

۲-۸- تحقیقات فان و لئو

عملکرد شیروانی‌های میخکوبی شده توسط پایداری و تغییر شکل آن‌ها بیان می‌شود. تغییر شکل‌های شیروانی‌های می‌تواند به سازه‌های مجاور، تأسیسات و خیابان‌های اطراف آسیب برساند. پایداری و تغییر شکل‌های شیروانی‌های به فاکتورهایی، وابسته می‌باشند. تجربه نشان داده است که پیش‌بینی میزان تغییر شکل‌ها بسیار پیچیده و فرایندی وقت‌گیر است. فان و لئو بر اساس مدل‌سازی‌های عددی که انجام دادند نشان دادند که با افزایش زاویه شیب شیروانی میخکوبی شده با ثابت بودن زاویه شیب خاک‌ریز بالای آن، زاویه بهینه نیلینگ کاهش می‌یابد. حداکثر نیرو کششی در میخ‌خاک‌ها که در تراز پایین‌تر نسبت به تاج شیروانی اجرا شده‌اند، نسبت به میخ‌خاک‌های که در تراز بالاترند، بیشتر است. حداکثر نیرو کششی در میخ‌خاک‌های که در تراز یک‌سوم از پنجه شیروانی اجرا شده، ایجاد می‌گردد.

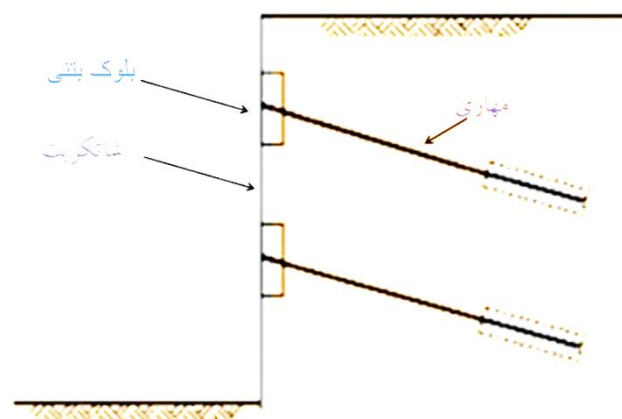
۲-۹- مطالعات انجام‌شده در روش مهار

یکی از روش‌های مناسب جهت نگهداری گودبرداری‌های عمیق، استفاده از سیستم شمع‌های نگهبان همراه با مهار (دیوار برلنی) است. دیوارهای برلنی متشکل از شمع‌های بتنی یا فولادی می‌باشند که در فواصل معین از هم قرار گرفته‌اند و بین آن‌ها از پوشش‌های با ضخامت کم استفاده می‌شود. در نهایت، کل مجموعه به وسیله المان‌های افقی یا مایل و یا با استفاده از میخ‌کوبی یا میل مهار، مهار می‌شوند. مطالعات وسیعی روی سازه‌های نگهبان و پارامترهای طراحی آن صورت گرفته است.

ورمر و راس و پانلر در سال ۲۰۰۱ در مقاله‌ای به بررسی اثر قوس زدگی پشت دیوار برلنی پرداختند. آن‌ها با مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی پروژه‌های اجرا شده یافتند که پوش توزیع مثلی فشار خاک پشت دیوار در نواحی نزدیک شمع‌ها بسیار کمتر از واقعیت و در مناطق میانی پوشش، کمی بیش از مقادیر اندازه‌گیری شده است. همچنین در مدل‌سازی سه‌بعدی به دلیل در نظر گرفتن اثر قوس زدگی، تغییر شکل‌های دیوار کاهش یافت و به مقادیر اندازه‌گیری شده بسیار نزدیک‌تر گردید. هانگ

ولیب و یانگ در سال ۲۰۰۲ با بررسی و مدل سازی دوبعدی و سه بعدی گوده های مهار شده با دیوار برلنی نشان دادند که آنالیز دوبعدی نمی تواند اثرات تورم و در نتیجه نرم شدن خاک را دقیقاً پشت پوشش چوبی مدل کند. آن ها همچنین دریافتند که با افزایش فاصله بین شمع ها ، تأثیر معایب مدل سازی دوبعدی افزایش می یابد. آن ها تفاوت در مدل سازی دوبعدی و سه بعدی را ناشی از عدم یکنواختی سختی دیوار و در واقع طبیعت گسسته دیوار بیان کردند. در حالی که نتایج تحلیل دوبعدی و سه بعدی با فرض سختی یکنواخت برای شمع و پوشش (کل دیوار) یکسان است.

جینگ و شن و ژو در مقاله ای به بررسی اثر روش تحلیل در پیش بینی تغییر شکل های دیوار مهار شده به وسیله المان های افقی پرداختند . آن ها تحلیل المان های مجزا را با نتایج تحلیل اختلاف محدود مقایسه نمودند. در تحلیل اختلاف محدود از مدل های رفتاری مور کولمب و دراگر -پراگر استفاده گردید. آن ها دریافتند که تحلیل اختلاف محدود، تغییر شکل های زمین و نیروهای داخلی دیوار را کمتر از نتایج حاصل از پیش بینی می کند. این امر به دلیل عدم توانایی تحلیل اختلاف محدود و مدل های جهت مدل سازی رفتار مکانیکی خاک های دانه ای تحت شرایط پیچیده تنش در گودبرداری است.



شکل ۲-۵ : سازه نگهبان مهار شده با انکر.

فصل سوم

معرفی نرم افزار **flac, PLAXIS**

برنامه FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua)، یک برنامه تفاضل محدود صریح برای محاسبات مکانیکی مهندسی است. این برنامه توانایی شبیه سازی رفتار سازه های خاکی، سنگی و... را دارد. در این نرم افزار ساخت مصالح توسط نواحی ایجاد شده در شبکه صورت می گیرد که این وظیفه (ایجاد مدل) به عهده کاربر است. هر جزء مطابق قانون تنش- کرنش خطی یا غیر خطی که برای آن تعریف شده است در مقابل نیروها و قیدهای مرزی، عکس العمل نشان می دهد. در صورتی که حالت تنش در یک عضو شرایط حدی را ارضا کند، عضو مورد نظر به حد تسلیم رسیده و رفتار غیر خطی از خود نشان می دهد. پلکسیس مجهز به امکاناتی جهت بررسی جنبه های مختلف سازه های ژئوتکنیکی پیچیده است. ورودی لایه های خاک، سازه ها، مراحل ساخت، شرایط بارگذاری و مرزی بر اساس دستورالعمل رسم ساده اتوکد که امکان مدل سازی با جزئیات هندسه مقطع عرضی را فراهم می کند. از این هندسه مدل، مش بندی اجزاء محدود دوبعدی به سادگی ایجاد می گردد. در نرم افزار FLAC از المان cable برای مدل کردن نیلینگ و انکر و المان Beam برای مدل کردن پوشش شاتکریت استفاده شده است.

در روش المان محدود، زمین اصولاً به صورت پیوسته مدل می شود و ناپیوستگی ها می تواند جداگانه مدل شود. محیط مسئله به تعداد محدودی المان تقسیم می شود که در نقاط گرهی به هم متصل هستند. هر المان محدود است، یعنی هندسه مشخص و اندازه محدودی دارد. رابطه تنش-کرنش زمین با یک قانون رفتاری مناسب بیان می شود. تنش، کرنش و تغییر شکل با تغییر در شرایط زمین به وجود می آید. تنش، کرنش و تغییر شکل ایجاد شده در یک المان بر رفتار المان های مجاورش تأثیر دارد. رابطه پیچیده بین المان های متصل به هم مسئله بسیار پیچیده ریاضی را ایجاد می کند. سیستم معادلاتی که مقادیر مجهول را به مقادیر معلوم مرتبط می کند برحسب یک ماتریس سختی بیان

می‌شود. مدل‌سازی در نرم‌افزار پلکسیس ایجاد یک مدل اجزاء محدود، با ایجاد یک مدل هندسی که جایگزین مسئله مطلوب است، آغاز می‌گردد و یک مدل هندسی از نقاط، خطوط دسته‌ها و مجموعه‌ها تشکیل شده است. نقاط و خطوط توسط کاربر وارد می‌شوند. درحالی‌که دسته‌ها و مجموعه‌ها توسط برنامه ایجاد می‌شوند. علاوه بر این می‌توان مؤلفه‌های اساسی موضوعات سازه‌ای را جهت شبیه‌سازی پوشش تونل، دیواره‌ها به مدل هندسی اختصاص داد. پس‌ازاینکه مؤلفه‌های مدل هندسی ایجاد شد، باید مجموعه داده‌هایی را برای مدل‌سازی مصالح بسته به مدل رفتاری انتخاب‌شده برای تحلیل اجزاء محدود در نرم‌افزار وارد نمود. برنامه FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua)، یک برنامه تفاضل محدود صریح برای محاسبات مکانیکی مهندسی است. این برنامه توانایی شبیه‌سازی رفتار سازه‌های خاکی، سنگی و... را دارد.

در این نرم‌افزار ساخت مصالح توسط نواحی ایجاد شده در شبکه صورت می‌گیرد که این وظیفه (ایجاد مدل) به عهده کاربر است. هر جزء مطابق قانون تنش- کرنش خطی یا غیر خطی که برای آن تعریف شده است در مقابل نیروها و قیدهای مرزی عکس‌العمل نشان می‌دهد. در صورتی که حالت تنش در یک عضو شرایط حدی را ارضا کند، عضو مورد نظر به حد تسلیم رسیده و رفتار غیر خطی از خود نشان می‌دهد. در برنامه FLAC معادلات با روش تفاضل محدود یا FDM (Finite Difference Method) حل می‌شوند. روش مورد استفاده در این برنامه با روش معمول اجزاء محدود یا FEM (Finite Element Method) برای مدل‌سازی عددی مقایسه می‌شود. در هر دو روش یک نوع دستگاه معادلات دیفرانسیل برای هر عضو تعیین می‌شود که به نیروهای وارد بر گره‌ها و جابجایی‌های ایجاد شده در آن‌ها بستگی دارد. در روش تفاضل محدود هر مشتق در معادلات حاکم، مستقیماً توسط یک عبارت جبری که تابع متغیرهای میدان (تنش یا تغییر مکان در نقاط دلخواه فضا) است، جایگزین می‌شود. در روش اجزاء محدود، مقادیر پارامترهای میدان (تنش و تغییر مکان) را در هر عضو با بهره‌گیری از توابع ویژه‌ای به نام توابع شکل (Shape Function) که توسط پارامترهای خاصی

کنترل می‌شوند، تغییر می‌دهد. فرمول بندی روش اجزاء محدود براساس مینیمم کردن انرژی کل است.

روش تفاضل محدود از قدیمی‌ترین روش‌های حل معادلات دیفرانسیل با مقادیر اولیه و مقادیر مرزی است. در روش تفاضل محدود هر مشتق در معادلات حاکم، مستقیماً در عبارت جبری که تابع متغیرهای میدان تنش یا تغییر مکان در فضا است، جایگزین می‌شود. هر دو روش اجزای محدود و تفاضل محدود مجموعه‌ای از معادلات جبری را تولید می‌کنند. می‌توان نشان داد که در حقیقت هر دو روش از یک فرم ضعیف شده مشابه، ولی با توابع وزنی مختلف به دست می‌آیند. برنامه‌های اجزای محدود اغلب ماتریس اجزا را ترکیب کرده و یک ماتریس سختی کل را می‌سازند، در حالی که در روش تفاضل محدود به طور معمول این عمل انجام نمی‌گیرد و قابلیت نسبی برای تولید دوباره معادله‌های تفاضل محدود در هر گام وجود دارد. این برنامه از روش پیشرفت زمانی مستقیم برای حل معادله‌های جبری استفاده می‌کند اما در روش اجزای محدود، معمولاً روش‌های حل ماتریسی (غیر مستقیم) به کار می‌روند.

بنابراین بعد از تعیین فاکتور ایمنی این آرایشها باید مقدار جابجایی حاصل از این آرایش ها مورد بررسی قرار گیرد که به منظور بررسی سه بعدی مسئله از نرم افزار فلک ۳ استفاده شده است.

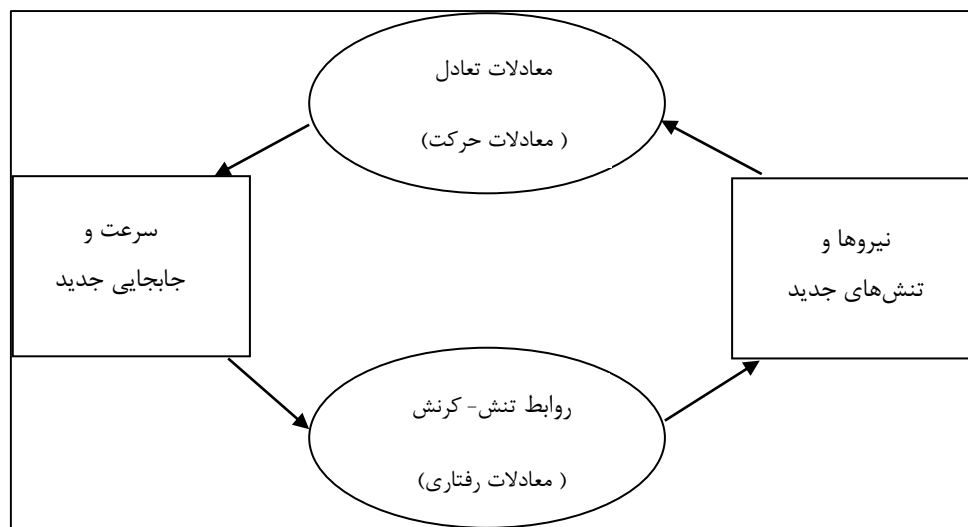
برنامه FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions)، یک برنامه تفاضل محدود صریح سه بعدی برای محاسبات مکانیکی مهندسی است. این برنامه توانایی شبیه سازی سه بعدی رفتار سازه‌های خاکی، سنگی و... را دارد. این نرم‌افزار محصول شرکت ایتاسکا (ITASCA) می‌باشد و توانایی تحلیل مدل‌های هیدرومکانیکی با مدل‌های رفتاری مختلف می‌باشد. این برنامه رفتار ساختارهای خاک، سنگ و یا دیگر مواد را که ممکن است هنگام نزدیک شدن به محدوده شکست، رفتارهای گوناگون از خود نشان دهند را مدلسازی می‌کند.

اساس این برنامه برپایه فرمول‌های استفاده شده در برنامه دوبعدی FLAC است. در این نرم‌افزار ساخت مصالح توسط نواحی ایجاد شده در شبکه صورت می‌گیرد که این وظیفه (ایجاد مدل) به عهده کاربر است. هر جزء مطابق قانون تنش- کرنش خطی یا غیر خطی که برای آن تعریف شده است در مقابل نیروها و قیدهای مرزی عکس العمل نشان می‌دهد. در صورتیکه حالت تنش در یک عضو شرایط حدی را ارضاء کند، عضو مورد نظر به حد تسلیم رسیده و رفتار غیر خطی از خود نشان می‌دهد. محاسبات روی مدل‌های سه بعدی مورد استفاده در کارهای ژئوتکنیکی در مدت زمان قابل توجهی انجام می‌شود. در برنامه FLAC3D معادلات باروش تفاضل محدودی (Finite Difference Method) FDM حل می‌شوند. روش مورد استفاده در این برنامه باروش معمول اجزاء محدودی (Finite Element Method) FEM برای مدل‌سازی عددی مقایسه می‌شود. در هر دو روش یک نوع دستگاه معادلات دیفرانسیل برای هر عضو تعیین می‌شود که به نیروهای وارد بر گره‌ها و جابجایی‌های ایجاد شده در آن‌ها بستگی دارد. در روش تفاضل محدود هر مشتق در معادلات حاکم، مستقیماً توسط یک عبارت جبری که تابع متغیرهای میدان (تنش یا تغییر مکان در نقاط دلخواه فضا) است، جایگزین می‌شود. در روش اجزاء محدود، مقادیر پارامترهای میدان (تنش و تغییر مکان) را در هر عضو با بهره‌گیری از توابع ویژه‌ای به نام توابع شکل (Shape Function) که توسط پارامترهای خاصی کنترل می‌شوند، تغییر می‌دهد. فرمول بندی روش اجزاء محدود بر اساس مینیمم کردن انرژی کل است.

روش تفاضل محدود از قدیمی‌ترین روش‌های حل معادلات دیفرانسیل با مقادیر اولیه و مقادیر مرزی است. در روش تفاضل محدود هر مشتق در معادلات حاکم، مستقیماً در عبارت جبری که تابع متغیرهای میدان تنش یا تغییر مکان در فضا است، جایگزین می‌شود. هر دو روش اجزای محدود و تفاضل محدود مجموعه‌ای از معادلات جبری را تولید می‌کنند. می‌توان نشان داد که در حقیقت هر دو روش از یک فرم ضعیف شده مشابه، ولی با توابع وزنی مختلف به دست می‌آیند. برنامه‌های اجزای محدود اغلب ماتریس اجزا را ترکیب کرده و یک ماتریس سختی کل را می‌سازند، در حالی که در

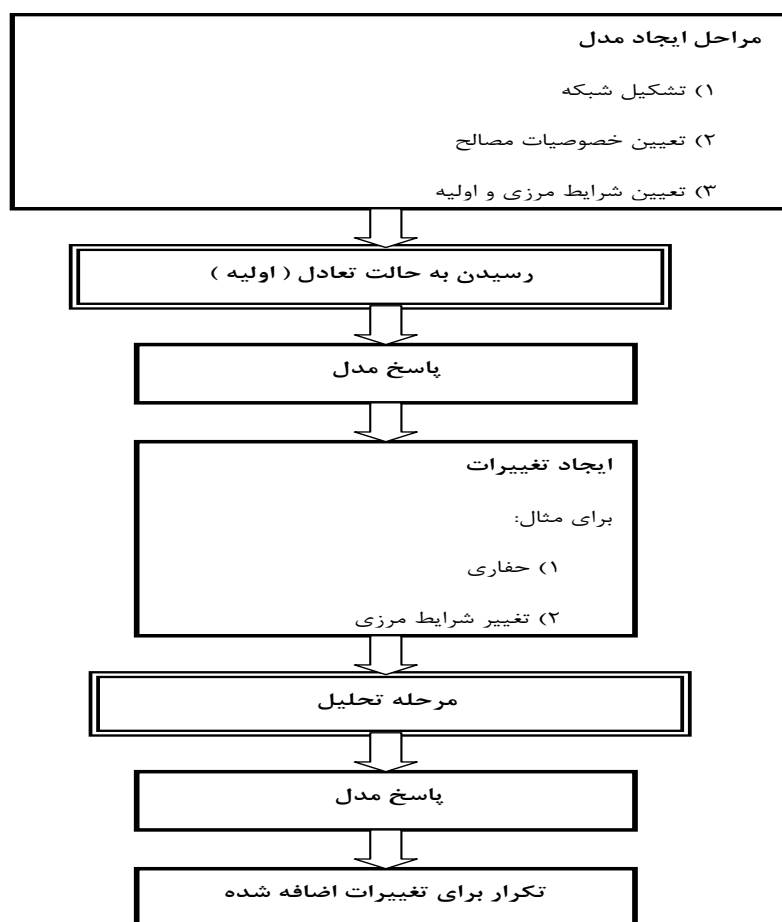
روش تفاضل محدود به طور معمول این عمل انجام نمی‌گیرد و قابلیت نسبی برای تولید دوباره معادله‌های تفاضل محدود در هر گام وجود دارد. این برنامه از روش پیشرفت زمانی مستقیم برای حل معادله‌های جبری استفاده می‌کند اما در روش اجزای محدود، معمولاً روش‌های حل ماتریسی (غیر مستقیم) به کار می‌روند.

ترتیب انجام محاسبات در برنامه FLAC3D به صورت شکل زیر می‌باشد.



شکل ۳-۱ :

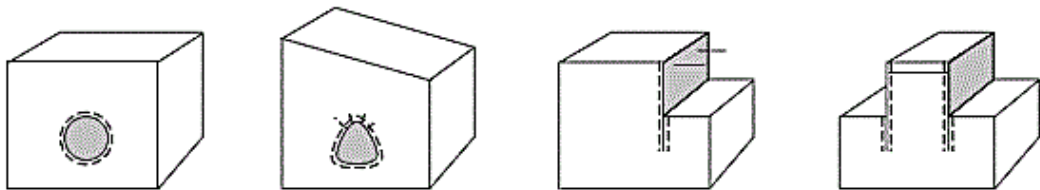
در این فرآیند ابتدا از معادلات حرکت استفاده می‌شود و پس از آن سرعت‌ها و تغییر مکان‌های جدید از تنش‌ها و نیروهای گرهی به دست می‌آیند، سپس نرخ کرنش از سرعت‌های گرهی جدید در هر جزء به دست می‌آید. هر گردش حول حلقه شکل بالا را، یک گام زمانی (timestep) می‌گویند. برای انجام تحلیل‌های استاتیکی، در ابتدا باید مدل هندسی مسئله را ایجاد کرد. این کار بوسیله دستورهایی خاصی که برای رسم شبکه‌های مخصوصی می‌باشد، انجام می‌شود. بعد از آن نوبت به تعیین مشخصات مصالح و شرایط مرزی و اولیه می‌باشد. روند کلی حل مساله با استفاده از FLAC3D در شکل زیر نشان داده شده است.



جدول ۱-۳ :

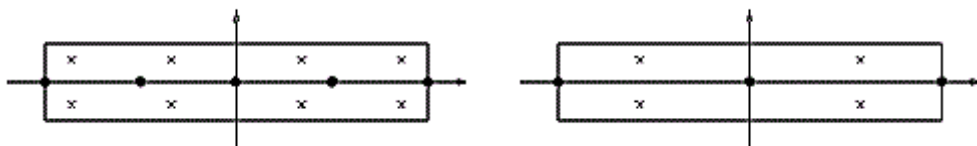
پلکسیس یک برنامه اجزا محدود است که به طور خاصی جهت تحلیل تغییرشکل و پایداری در پروژه‌های مهندسی ژئوتکنیک توسعه یافته است. روند وارد نمودن داده‌ها به صورت گرافیکی ساده این امکان را به وجود می‌آورد که نمونه‌های پیچیده اجزا محدود به راحتی و در کمترین زمان تولید و تحلیل شوند. انجام محاسبات به صورت خودکار و بر اساس روش قدرتمند اجزاء محدود است. در حقیقت در نرم‌افزار پلکسیس امکان مدل‌سازی مسائل پیچیده ژئوتکنیک نظیر اندرکنش خاک و سازه وجود دارد.

صفحات اجزای سازه‌ای هستند که جهت مدل‌سازی سازه‌های دارای سختی خمشی و سختی محوری به کار می‌روند. صفحات را می‌توان جهت شبیه‌سازی تأثیر دیوارها، صفحات، پوسته‌ها و یا پوشش‌هایی که در راستای Z امتداد یافته‌اند، به کاربرد. در مواردی از کاربرد صفحات در مدل‌سازی مسائل ژئوتکنیکی نمایش داده شده است.



شکل ۳-۱: کاربرد صفحات در مسائل ژئوتکنیکی.

صفحات در مدل اجزاء محدود دوبعدی از اجزاء تیر با سه درجه آزادی در هر گره تشکیل شده‌اند که شامل دو درجه آزادی انتقالی و یک درجه آزادی دورانی است. هنگامی که اجزاء ۶ گره ای خاک به کار گرفته می‌شود، آنگاه هر جزء تیر با ۳ گره تعریف می‌شود. درحالی که اجزاء ۵ گره ای تیر با اجزاء ۱۵ گره ای خاک، باهم به کار می‌روند.



شکل ۳-۲: موقعیت گره‌ها و نقاط تنش در یک جزء ۵ گره ای و ۳ گره ای تیر.

اجزاء تیر بر اساس نظریه میندلین پایه‌ریزی شده است. این نظریه تغییرشکل‌های ناشی از برش را همانند خمش مجاز می‌داند. به‌علاوه، اجزای تیر می‌توانند هنگامی که نیروی محوری به کار می‌رود، تغییر طول بدهند و اگر گشتاور خمشی بیشینه یا نیروی محوری بیشینه به یک مقدار تعریف‌شده معیار برسند، آنگاه اجزاء تیر می‌توانند پلاستیک شوند.

ضخامت معادل برای مدل‌سازی ضخامت عضو سازه‌ای نظیر سازه نگهبان در نظر گرفته می‌شود. این ضخامت وابسته به نسبت EI/EA است. رابطه ۰ برای محاسبه ضخامت معادل در نرم‌افزار پلکسیس استفاده می‌شود.

(۱-۳)

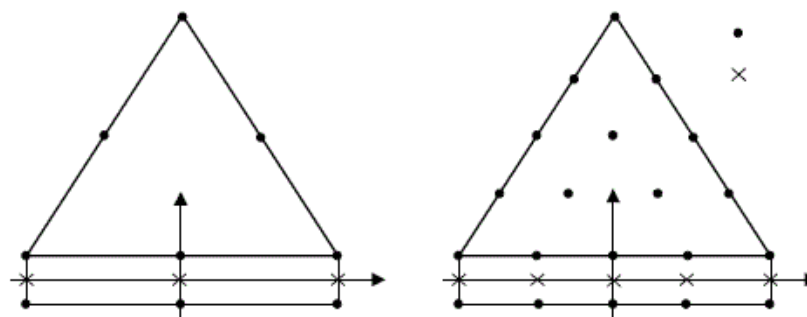
$$d_{eq} = \sqrt{\frac{12EI}{EA}}$$

۳-۱-۲- فصل مشترک پلکسیس

در حالت کلی اجزای سطح مشترک برای ایجاد جابجایی‌ها و تغییرات کشسانی کوچک در محل تماس دو مصالح مختلف نظیر خاک و بتن در نظر گرفته می‌شوند. برای هر سطح مشترک یک ضخامت مجازی در نظر گرفته می‌شود که آن دارای ابعاد مجازی است و برای تعیین خواص مصالح سطح مشترک مورد استفاده قرار می‌گیرد. ضخامت مجازی باید کوچک باشد و از طرف دیگر اگر ضخامت مجازی خیلی کوچک شود، شرایط غیرعادی در تحلیل عددی اتفاق می‌افتد. ضخامت مجازی برحسب عامل ضخامت مجازی در اندازه متوسط اجزاء محاسبه می‌شود. اندازه متوسط اجزاء به‌وسیله

درشتی کلی که در ایجاد شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد، تعیین خواهد شد. مقدار پیش‌فرض در نرم‌افزار مقدار ۰/۱ است که توصیه راهنمای نرم‌افزار پلکسیس بر عدم تغییر مقدار پیش‌فرض است.

سطوح مشترک از اجزای سطح مشترک ساخته شده‌اند. * چگونگی اتصال اجزاء سطح مشترک به خاک را نشان می‌دهد. هنگامی که المان ۱۵ گره ای برای مدل‌سازی خاک استفاده می‌شود، اجزاء متناظر با ۵ جفت گره مشخص می‌شود که برای ۶ نقطه از اجزاء خاک، اجزاء سطح مشترک آن‌ها به وسیله ۳ جفت گره مشخص می‌شود.



شکل ۳-۳: توزیع گره‌ها و نقاط تنشی در اجزای سطوح مشترک و ارتباط آن‌ها با اجزای خاک

۳-۱-۳- مرز میدان آزاد flac

تحلیل عددی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های سطحی همانند سد نیاز به تعیین و مشخص کردن منطقه‌ای از مصالح موجود در نزدیکی پی در مدل است. عموماً در این مسایل، ورودی لرزه‌ای به صورت انتشار امواج تخت از مصالح زیرین به سمت بالای مدل می‌باشد. در چنین مسایلی، شرایط مرزی موجود در کناره‌های مدل باید شرایط مربوط به میدان آزاد (ارتعاشات محیط اطراف صرفنظر از وجود سازه) را ارضا کند. این مرزها باید در یک فاصله مناسبی از سازه قرار گیرند تا هم انعکاس امواج حداقل گردد و

نیز شرایط میدان آزاد در کناره‌ها را ایجاد گردد. برای مصالحی با میرایی بالا، در یک فاصله نسبتاً کم از سازه این شرایط ایجاد خواهد شد، ولی در مصالح با میرایی کم، فاصله مناسب برای ارضا شرایط بالا زیاد خواهد بود و در نتیجه نمی‌توان از چنین مش بندی بزرگی در مدل واقعی استفاده کرد. در چنین حالاتی از نوعی مرز با عنوان مرز میدان آزاد استفاده می‌شود که در آن حرکت میدان آزاد را در شبکه میدان آزاد ایجاد و به شبکه اصلی تحمیل می‌شود بطوریکه مرزها مشخصات غیر منعکس کنندگی خود را حفظ کنند. مرزهای جانبی شبکه اصلی بوسیله میراگرهای ویسکوز به شبکه میدان آزاد متصل می‌شود نیروهای نامتعادل در شبکه میدان آزاد به مرز شبکه اصلی اعمال می‌شود. شبکه میدان آزاد فقط در مرزهای جانبی ایجاد می‌شود و یک تناظر یک به یک بین گره‌ها در شبکه اصلی و شبکه میدان آزاد وجود دارد. در این حالت امواج تخت منتشر شونده به سمت بالای مدل، در قسمت‌های مرزی متحمل اغتشاش نمی‌شوند، چرا که شرایط مرزی میدان آزاد، شرایط مشابه حالت مدل نامتناهی را در مرزها فراهم می‌کند.

۳-۱-۴ - ایجاد شبکه

هنگامی که مدل هندسی کاملاً مشخص و خواص مصالح در تمام دسته‌ها و اجسام ساختاری تعیین شوند، مدل هندسی برای اجرای محاسبات عناصر اجزاء محدود به المان‌های کوچکی تقسیم می‌شود. ترکیب این عناصر محدود شبکه نامیده می‌شود. نوع پایه عنصر در یک شبکه و در نرم‌افزار پلکسیس، المان‌های ۶ و ۱۵ گرهی مثلثی است.

نرم‌افزار پلکسیس حاوی یک تولیدکننده شبکه است که به‌طور کاملاً خودکار شبکه‌بندی اجزای محدود را انجام می‌دهد. تولیدکننده شبکه احتیاج به یک پارامتر شبکه‌بندی عمومی دارد تا اندازه‌ی متوسط اجزا را نشان دهد. این پارامتر در نرم‌افزار پلکسیس از ابعاد هندسی بیرونی (X_{max} , X_{min} , Y_{max} و Y_{min}) طبق رابطه‌ی ۰ محاسبه می‌شود.

$$L_e = \sqrt{\frac{(X_{max} - X_{min})(Y_{max} - Y_{min})}{n_c}}$$

(۲-۳)

درشتی کلی در پنج سطح طبقه‌بندی می‌شود که عبارت‌اند از: خیلی درشت، درشت، متوسط، ریز و خیلی ریز. به‌عنوان پیش‌فرض، درشتی کلی در سطح درشت تنظیم می‌گردد. متوسط اندازه‌ی اجزا و تعداد اجزای ایجادشده به تنظیم درشتی کلی بستگی دارد.

درشتی کلی	تعداد حدودی اجزاء	n_c
خیلی درشت	۵۰	۲۵
درشت	۱۰۰	۵۰
متوسط	۲۵۰	۱۰۰
ریز	۵۰۰	۲۰۰
خیلی ریز	۱۰۰۰	۴۰۰

جدول ۳-۱: انواع شبکه‌بندی در نرم‌افزار پلکسیس

۳-۱-۵- مدل رفتاری

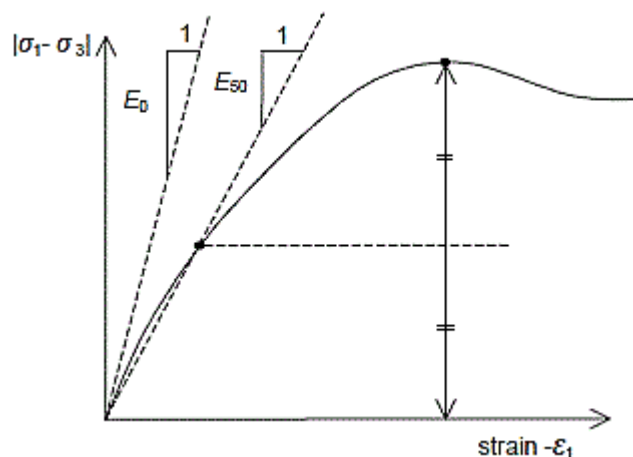
در پلاستیسیته خاک‌ها، تعریف تابع تسلیم که بیانگر ارتباط بین متغیر تنش و متغیر کرنش خمیری را بیان کند، ضروری است. در اثر جریان خمیری، ماده افزایش کرنش خمیری معادل در سه جهت اصلی خواهد داد، حال اگر جهت بردار افزایش کرنش خمیری، هم‌جهت با بردار عمود بر رویه تسلیم باشد شرایط تعامد برقرارشده و به این وضعیت قانون جریان همراه گفته می‌شود و اگر جهت بردار افزایش کرنش خمیری بر سطح تسلیم عمود نباشد، قانون جریان ناهمراه برقرار خواهد بود.

انتخاب مدل رفتاری مناسب برای مدل سازی مصالح در تحلیل های عددی، یکی از مهم ترین عوامل تأثیرگذار بر نتایج خواهد بود. در ادامه، مبانی تئوری مدل رفتاری موهر – کولمب ارائه شده است.

۳-۱-۶- مدل موهر – کولمب

حالت پلاستیک با توسعه کرنش های برگشتناپذیر همراه است؛ به عبارت دیگر برای ارزیابی رویداد حالت پلاستیک در محاسبات یا عدم رویداد آن یک تابع تسلیم،^f به عنوان یک تابع تنش و کرنش وارد می شود. یک تابع تسلیم اغلب به عنوان یک سطح در فضای تنش های اصلی ارائه می شود. مدل کاملاً پلاستیک، یک مدل اصلی با یک سطح تسلیم ثابت است، یعنی یک سطح تسلیم که کاملاً به وسیله پارامترهای مدل تعیین می شود و به وسیله کرنش های پلاستیک تغییر نمی کند. برای حالت های تنش ارائه شده به وسیله نقاط موجود در سطح تسلیم، رفتار کاملاً کشسان است و تمام کرنش ها برگشت پذیرند.

پلکسیس از مدول یانگ به عنوان مدول سختی اصلی در مدل کشسان و مدل موهر – کولمب استفاده می کند. مقادیر پارامتر سختی اختیار شده در محاسبات نیازمند توجه خاصی هستند چون اغلب مصالح خاکی از ابتدای بارگذاری یک رفتار غیرخطی از خود نشان می دهند. در مکانیک خاک، شیب اولیه معمولاً با E_0 و مدول سکانت در ۵۰٪ مقاومت با E_{50} نشان داده می شود. برای مصالح با یک محدوده کشسان خطی بزرگ، استفاده از E_0 به واقعیت نزدیک تر است، اما برای بارگذاری خاک ها معمولاً از E_{50} استفاده می شود. در مسائل باربرداری همچون خاک برداری ها و تونل زنی، لازم است کاربر به جای E_{50} از E_{ur} استفاده نماید.



شکل ۳-۴: تعریف E_0 و E_{50} نتایج آزمایش سه محوری زهکشی شده استاندارد.

در خاک‌ها هر دو مدول باربرداری، E_{ur} و مدول بارگذاری اولیه E_{50} با فشار محدودکننده افزایش می‌یابند. از این‌رو سختی لایه‌های عمیق خاک از لایه‌های سطحی بیشتر است. علاوه بر این سختی مشاهده‌شده به مسیر تنش بستگی دارد. سختی نظیر باربرداری و بارگذاری مجدد خیلی بیشتر از سختی نظیر بارگذاری اولیه است. همچنین سختی خاک مشاهده‌شده برحسب مدول یانگ ممکن است برای فشردگی (زهکشی شده) پایین‌تر از برش باشد. از این‌رو وقتی برای معرفی رفتار خاک از یک مدول سختی ثابت استفاده می‌شود، باید این مدول طوری انتخاب شود که با تراز تنش و توسعه مسیر تنش سازگار باشد.

۳-۱-۶- مدل رفتاری حل مسایل در نرم افزار فلک ۳ بعدی

این برنامه توانایی شبیه سازی ساختاری خاک، سنگ یا دیگر مواردی که ممکن است تحت جریان پلاستیک قرار بگیرند، دارا می باشد. مواد با المان ها یا زونهایشان که به فرم شبکه می باشند، مشخص می شوند. ایجاد مدل بر عهده ی کاربر می باشد، هر المان مطابق قانون تنش- کرنش خطی یا غیر خطی که برایش تعریف می شود در مقابل نیروها یا قید و مرزها عکس العمل نشان می دهد، در صورتیکه حالت تنش در یک عضو شرایط حدی را راضا کند، مواد به نقطه ی تسلیم رسیده و می توانند جریان یابند و در این صورت باعث تغییر شکل شبکه خواهد شد. کتابخانه این نرم افزار شامل مدل های رفتاری مختلف که توانایی مدل کردن رفتار الاستیک و الاستوپلاستیک سنگ و خاک می باشد را دارا می باشد. که مهمترین این مدل ها شامل موارد ذیل می باشد :

الف) مدل نول:

کاربرد این مدل برای چاله ها و حفاری ها می باشد.

ب) مدل الاستیک:

این مدل در محیط های همگن، ایزوتروپیک و محیط هایی که رفتار تنش - فشار در آنها به صورت خطی می باشد، حاکما ست.

ج) مدل دراگر- پراگر:

این معیار که در محیط های پلاستیک حاکماست کاربرد محدودی دارد و بیشتر در رس های نرم با اصطکاک کم کاربرد دارد. این مدل، مدل رایجی برای مقایسه در روش های المان محدود می باشد.

د) مدل مور- کولمب:

این معیار در محیط های الاستیک و پلاستیک حاکم است. این معیار در مباحث مکانیک سنگ و مکانیک خاک به ویژه حفاریات زیرزمینی کاربرد فراوانی دارد. این مدل از ساده ترین و کاربردی ترین

مدل‌ها در مبحث ژئوتکنیک می‌باشد که با توجه به سادگی استفاده از آن و پارامترهای مورد نیاز آن کاربرد بسیاری در تحلیل‌های عددی ژئوتکنیکی دارد.

فصل چهارم

مدل سازی و تحلیل نتایج

۴-۱- مقدمه

پس از توضیح در مورد نحوه عملکرد سیستم نیلینگ و روش‌های مختلف طراحی دیوارهای میخ‌کوبی شده که در فصل گذشته بیان شد، در این فصل با توجه به روش‌های عددی المان محدود (با نرم‌افزار عددی پلکسیس) و تفاضل محدود (با نرم‌افزار عددی فلک) بصورت دو بعدی و سه بعدی به طراحی دیواره‌های گود ۹ متری ۱۲ متری پرداخته می‌شود. در ابتدای این فصل توضیح مختصری در مورد روش مدل‌سازی و تحلیل در نرم‌افزارهای پلکسیس و فلک داده می‌شود.

۴-۱-۱- آشنایی با نرم‌افزار پلکسیس

پلکسیس (PLAXIS ver 8.5) یک برنامه کامپیوتری المان محدود با هدف بخصوصی است که برای انجام آنالیز پایداری و تغییر شکل در کاربردهای مختلف ژئوتکنیکی استفاده می‌شود. این برنامه شامل چهار زیر برنامه است :

Input (۱)

Calculations (۲)

Output (۳)

Curves (۴)

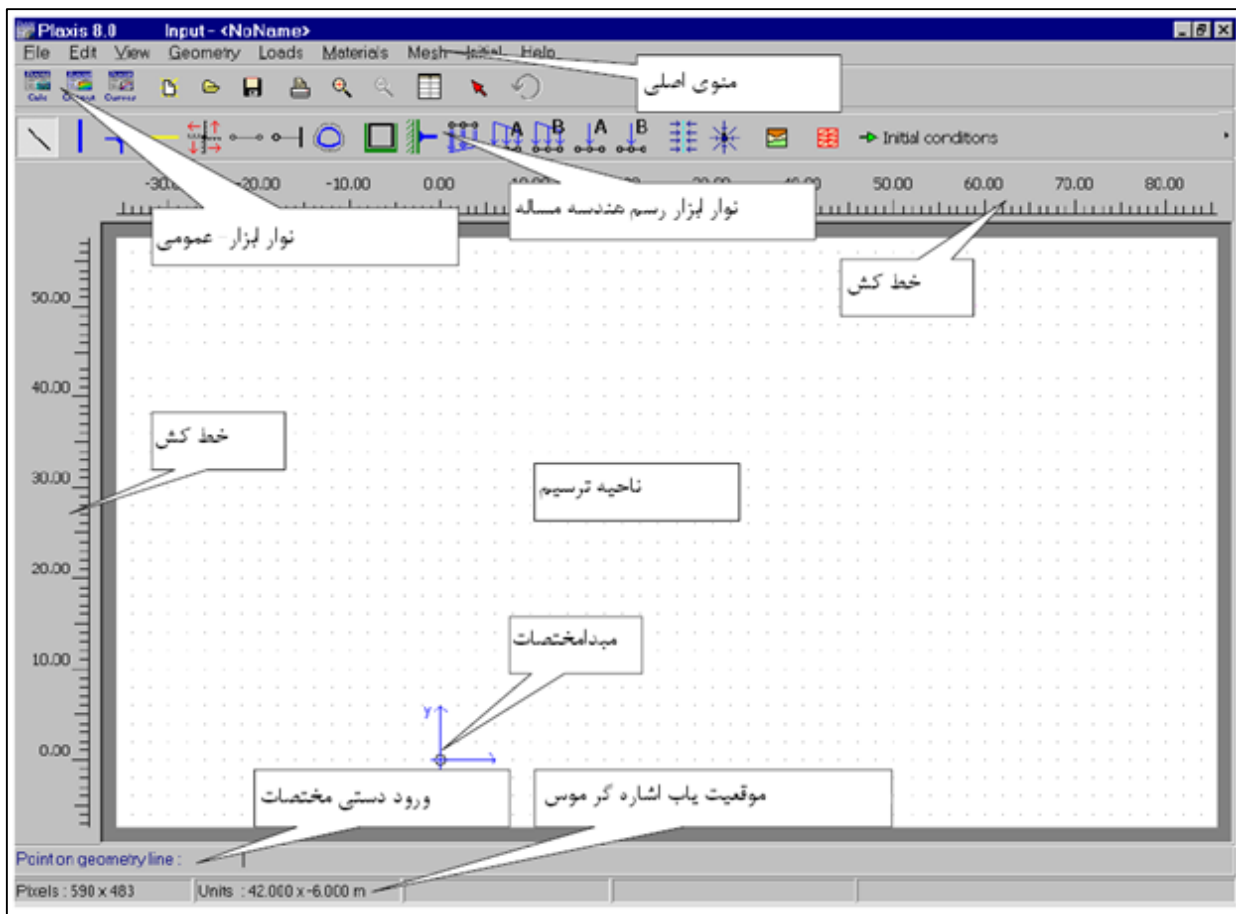
برای انجام آنالیز المان محدود به وسیله این نرم افزار ، کاربر باید یک مدل المان محدود ایجاد نماید و مشخصات مصالح و نیز شرایط مرزی را مشخص نماید. این کارها به وسیله برنامه Input انجام می‌شود. برای آغاز کردن مدل ، کاربر باید یک مدل هندسی دو بعدی که شامل نقاط ، خطوط و سایر اجزا می باشد را در صفحه X-Y ایجاد نماید. برای رسم یک مش بندی المان محدود مناسب و نیز رسم شرایط مرزی و مشخصات در روی سطح اجزاء ، برنامه PLAXIS قادر است به طور خودکار به وسیله ایجاد کننده مش این کار را انجام دهد. کاربران همچنین قادر هستند که شبکه (مش) بندی

المان محدود را به منظور افزایش کارایی مطلوب به دلخواه تهیه نمایند. قسمت نهایی اطلاعات ورودی ، ایجاد فشارهای آب و تنش موثر اولیه برای نشان دادن وضعیت اولیه می باشد.

وقتی یک مدل هندسی در برنامه Input ایجاد شد، برنامه پیشنهاد می دهد که آیتم های ورودی مختلف به ترتیب نوار ابزارهای ثانویه (از چپ به راست) انتخاب شود. در آغاز طرح هندسی رسم شود، سپس لایه های خاک افزوده شود بعد اجزاء ساختاری اضافه شود ، بعد ساختن لایه ها و سپس شرایط مرزی و بعد از آن بارگذاری اعمال شود. نوار ابزار ثانویه به عنوان یک راهنما در برنامه Input و مطمئن شدن به اینکه آیا تمام آیتم های داده های ورودی اعمال شده است یا نه، عمل می نماید. البته عموماً همه عملیات ورودی برای هر آنالیزی لازم نمی باشد. برنامه PLAXIS وقتی که بعضی از داده های ورودی لازم مشخص نگردد، خطا می دهد.

۴-۱-۱-۱ قسمت Input

قسمت Input شامل تمام قابلیت های مربوط به رسم و تغییر مدل هندسی، رسم مش بندی المان محدود متناظر آن و ایجاد شرایط اولیه می باشد همانطور که در شکل ۴-۱ نشان داده شده است. ایجاد شرایط اولیه در یک مد جداگانه ای در برنامه Input انجام می شود. در آغاز برنامه Input یک جعبه گفتگویی باز می شود، مبنی بر اینکه باید یکی از پروژه های موجود و یا پروژه جدید را انتخاب نماییم. منوی اصلی در برنامه Input دارای تمام زیر منو هایی است که عملیات مربوط به فایل، انتقال داده ها، مشاهده تصاویر، رسم هندسه مدل و نیز رسم



شکل ۴-۱- صفحه Input برنامه پلکسیس

مش بندی المان و بطور عموم ورود داده ها را شامل می شود. باید بین مد رسم هندسه مدل و مد شرایط اولیه تفاوت قائل شد.

مدل المان محدود می تواند بصورت کرنش صفحه ای و یا تقارن محوری باشد. مدل کرنش صفحه ای در جاهایی بکار می رود که هندسه مدل دارای مقطع عرضی یکنواخت (کمتر یا بیشتر) باشد و حالت تنش وابسته به آن و آرایش و ترتیب بارگذاری آن بر روی طول یکنواخت عمود بر مقطع عرضی (جهت Z) باشد. مدل تقارن محوری برای ساختارهای دایره وار با مقطع عرضی شعاعی یکنواخت (کمتر یا بیشتر) باشد استفاده می شود و در این حالت ترتیب بارگذاری پیرامون محور مرکزی می باشد.

برای مدل کردن لایه‌های خاکی و سایر حجم‌های انبوه باید یکی از اجزاء مثلثی ۱۵ گره‌ای و یا ۶ گره‌ای را انتخاب کرد. مثلث ۱۵ گره‌ای المان پیش فرض می‌باشد، که از درون‌یابی مرتبه چهار از تغییر مکان و انتگرال‌گیری عددی از ۱۲ نقطه گاوس (نقاط تنش) بدست می‌آید. مثلث ۶ گره‌ای از درون‌یابی مرتبه دوم و انتگرال‌گیری عددی از ۳ نقطه گاوس (نقاط تنش) بدست می‌آید. نوع المان‌ها برای المان‌های سازه و سطوح مشترک، بطور اتوماتیک سازگار با نوع المان در نظر گرفته می‌شود که در اینجا انتخاب می‌شود. مثلث ۱۵ گره‌ای المان بسیار دقیقی است که نتایج تنش بهتری را برای مسائل مشکل ارائه می‌دهد. استفاده از این المان حافظه بالایی را می‌طلبد و نسبتاً کارایی عملیات و محاسبات به آرامی انجام می‌پذیرد.

برای ایجاد مدل المان محدود باید ابتدا هندسه مدل رسم شود. هندسه مدل شامل نقاط، خطوط و توده‌ها می‌باشد. خطوط و نقاط توسط کاربر وارد می‌شوند در حالیکه توده‌ها توسط برنامه ترسیم می‌شوند. همچنین علاوه بر اجزاء اصلی، اجزاء سازه‌ای و شرایط ویژه برای شبیه سازی پوشش تونل‌ها، جدارها، صفحات و اندرکنش خاک-سازه و یا بارگذاری می‌تواند برای هندسه مدل تخصیص داده شود. وقتی که هندسه مدل ترسیم شد، کاربر باید داده‌های مربوط به پارامترهای مصالح را تعریف نماید. وقتی که کل هندسه مدل ترسیم شد و تمام مولفه‌های هندسه و ویژگی‌های اولیه مربوط به آن تعریف شد مش‌بندی المان محدود ایجاد می‌شود. آیتم ورودی اصلی برای رسم شکل مدل، خط هندسی (Geometry line) می‌باشد. این آیتم می‌تواند از زیر منوی Geometry و یا از نوار ابزار مربوطه انتخاب شود. وقتی این گزینه انتخاب می‌شود کاربر می‌تواند خط و نقطه را در ناحیه رسم با ماوس (ورودی گرافیکی) و یا با نوشتن مختصات به وسیله صفحه کلید (ورودی دستی) رسم نماید. بوسیله کلید سمت چپ ماوس و کلیک کردن بر ناحیه رسم یک نقطه جدید ایجاد می‌شود. بعد از عمل رسم، برنامه توده‌ها را تعیین می‌نماید. توده‌ها، خطوط متفاوت حلقه‌وار نزدیک به هم هستند. به بیان دیگر توده‌ها ناحیه‌ای با خطوط نزدیک به هم هستند. توده‌ها همانند حاشیه روشن هستند. هر توده یک

ویژگی مصالح دقیق مینی بر شبیه سازی رفتار خاک در قسمتی از شکل مدل را می‌دهد. توده‌ها به المان‌های خاک در مدت ایجاد مش بندی تقسیم می‌شوند.

صفحات (Plate) یکی از اجزاء سازه‌ای هستند که برای مدل کردن سازه‌های لاغر در زمین با صلبیت خمشی کافی (مقاومت خمشی) و مقاومت عمودی بکار گرفته می‌شوند. صفحات برای شبیه سازی اثر دیوارها، صفحات، پوسته‌ها و پوشش‌ها که در امتداد محور Z گسترش یافته‌اند بکار می‌رود. در مدل هندسی صفحات فعال با خطوط آبی نشان داده می‌شوند.

گزینه تونل برای رسم مقاطع عرضی تونل مدور و یا غیر مدور که در هندسه مدل موجود است می‌باشد. مقطع عرضی یک تونل شامل خطوط و منحنی‌ها که به اختیار توسط سطح مشترک و یا پوشش (لاینینگ) تامین می‌شوند می‌باشند. وقتی گزینه تونل انتخاب شود آنگاه پنجره Tunnel designer input ظاهر می‌شود که شامل آیتم‌هایی برای باز کردن و ذخیره کردن تونل و تعیین کردن ویژگی‌های تونل می‌باشد. در این پنجره نوع تونل را هم باید انتخاب کرد که شامل تونل حفر شده، تونل NATM و هیچکدام می‌باشد. پوشش تونل هموژن و پیوسته در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه تعیین کردن داده‌های مصالح و فعال و یا غیر فعال کردن پوسته در قاب بندی اجرای مرحله‌ای فقط در پوشش تمام می‌توان انجام داد.

شرایط مرزی و بارها از زیر منوی Loads شامل گزینه‌هایی برای اختصاص دادن بارگسترده، بارخطی، و بار نقطه‌ای و تغییر مکان‌های مقرر شده (توصیه شده) به هندسه مدل می‌باشد. در روی خطوط هندسی، جاییکه بارها و تغییر مکان‌های توصیه شده بکار می‌روند، تغییر مکان‌های توصیه شده بر نیروها در محاسبات تقدم دارند مگر اینکه این تغییر مکان‌ها غیر فعال باشند. برای بارهای گسترده و نقطه‌ای برای هر یک دو سیستم بار (A , B) برای ترکیب بارهای نقطه‌ای و یا بار گسترده وجود دارد. این دو سیستم به طور مستقل می‌تواند فعال و یا غیر فعال شوند.

گیرداری‌ها تغییر مکان‌های توصیه شده برابر صفر می‌باشند. این شرایط می‌توانند همانند نقاط هندسی در خطوط هندسی بکار برده شوند. گیرداری‌ها می‌توانند از زیر منوی Loads انتخاب شوند. در

مدل هندسی می‌توان گیرداری‌های افقی ($U_x=0$) و گیرداری‌های عمودی ($U_y=0$) را از هم تمییز داد. برای ایجاد گیرداری در مرزهای قایم و افقی بطور همزمان می‌توان از Standard Fixities استفاده کرد.

در PLAXIS پارامترهای خاک و مشخصات مصالح سازه‌ها در مجموعه داده‌های مصالح ذخیره می‌شوند. چهار نوع مجموعه مصالح مختلف وجود دارد: اطلاعات خاک وسطوح مشترک، صفحات، ژئوگریدها، مهارها. که در این مرحله، تمام مشخصات و مدل رفتاری را برای مصالح و اجزاء سازه‌ای (صفحات، ژئوگریدها، مهارها) تعریف می‌شود. مجموعه داده‌های مصالح می‌تواند با استفاده از یکی از گزینه‌های زیرمنوی Material و یا با کلیک کردن بر آیکون Material sets در نوار ابزار فعال شوند. در این مرحله باید همچنین نوع مصالح که شامل زهکشی شده، زهکشی نشده و غیر متخلخل می‌باشد را نیز تعریف کرد. وقتی که مدل هندسی بطور کامل رسم، و مشخصات مصالح به توده‌ها و اجزاء سازه‌ای تخصیص داده شد، هندسه مدل باید به المان‌های محدود به منظور انجام محاسبات المان محدود، تقسیم شود. ترکیب المان‌های محدود را مشخص می‌گویند. این مشخصات نامرتب به نظر می‌رسد اما عملکرد عددی آن از عملکرد مشخص‌بندی منظم بهتر می‌باشد. ایجاد مشخص‌بندی از کلیک کردن بر روی کلید ایجاد مشخص‌بندی در نوار ابزار و یا با انتخاب گزینه Generate از زیر منوی Mesh شروع می‌شود. بعد از اینکه ایجاد مشخص‌بندی برنامه Output شروع شد طرح مشخص‌بندی نشان داده می‌شود. که در این مرحله می‌توان اندازه المان‌ها در هر منطقه‌ای به اندازه دلخواه اصلاح کرد و از دوباره مشخص‌بندی را ایجاد کرد.

هرگاه هندسه مدل رسم و مشخص‌بندی المان محدود ایجاد گردید. حالت تنش اولیه و وضعیت اولیه باید مشخص شود. این عمل به وسیله قسمت شرایط اولیه در برنامه Input قابل انجام است. شرایط اولیه شامل دو مد مختلف است. یک مد برای ایجاد فشار آب اولیه (مد شرایط آب) و دیگری مدی برای مشخص کردن نمای هندسه اولیه و تولید میدان تنش موثر اولیه می‌باشد. عوض کردن بین دو

مد به وسیله آیکون switch در نوار ابزار انجام می‌شود. در مد شرایط آب می‌توان فشار حفره‌ای و فشار موثر و سطح ایستابی را تعیین کرد. در مد هندسه اولیه می‌توان برای فعال یا غیرفعال (حفاری) بارها و اجزاء هندسی استفاده کرد. در پروژهای که مخزن و سازه ساخته می‌شود. هندسه اولیه مدل حاوی اجزاء مختلف (مانند بارها، صفحات، ژئوتکستایل، مهارها، سطوح مشترک و یا توده‌های خاک بالای زمین اولیه) بوده و در ابتدا فعال نمی‌باشند. PLAXIS به طور اتوماتیک تمام بارها و اجزاء سازه‌ای را در منوی هندسه اولیه غیرفعال می‌کند. فعال یا غیرفعال کردن اجزاء هندسی را می‌توان با یکبار کلیک کردن بر روی اجزاء هندسه مدل انجام داد. بعد از تعیین کردن شرایط آب و هندسه اولیه باید تنش اولیه در کالبد خاک متأثر از وزن مصالح ایجاد شود. این حالت تنش معمولاً به صورت تنش موثر عمودی اولیه مشخص می‌شود. تنش موثر افقی اولیه، با تنش موثر عمودی اولیه به وسیله ضریب فشار افقی زمین در ارتباط است. بعد از ایجاد تنش اولیه، ایجاد موقعیت اولیه مدل المان محدود کامل می‌شود. بعد از ذخیره کردن فایل، برنامه Input بسته می‌شود و برنامه Calculations شروع می‌شود.

۴-۱-۱-۲ قسمت Calculations

بعد از ایجاد مدل المان محدود، محاسبات المان محدود واقعی را می‌توان انجام داد. بنابراین لازم است که نوع محاسباتی را که باید انجام شود و نیز نوع بارگذاری و مراحل ساخت که در محاسبات باید فعال شوند مشخص شوند. در عملیات مهندسی، یک پروژه به چند فاز پروژه تقسیم می‌شود. به طور مشابه یک عمل محاسبه در PLAXIS نیز به چند فاز محاسبه تقسیم می‌شود، که لیست فازهای محاسباتی در قسمت پایین پنجره اصلی برنامه Calculations ارائه شده است. فاز محاسباتی که برای اجرا انتخاب شده است بوسیله پیکان آبی رنگ در جلوی خط نشان داده می‌شود. فاز محاسباتی که بطور موفقیت آمیز به پایان رسیده باشد به وسیله یک چک مارک سبز رنگ نشان داده می‌شود. منوی اصلی برنامه Calculations شامل زیرمنوهایی است که بسیاری از قابلیت‌ها برای عملیات فایل‌ها، تعریف فازهای محاسباتی، انجام دادن محاسبات را در بردارد. بعد از ایجاد فاز محاسباتی جدید، فاز

باید تعریف شود. این عمل با استفاده از برچسب‌های General ، Parameters و Multipliers که در قسمت بالای پنجره اصلی قرار دارد انجام می‌شود. انواع محاسبات شامل محاسبات پلاستیک، آنالیز تحکیم، آنالیز ایمنی و محاسبات دینامیکی می‌باشد، که باید در این بخش معین شود. یک نوع خیلی مهم از ورودی بارگذاری Staged construction می‌باشد. در این حالت این امکان وجود دارد که پیکربندی هندسه و بار را با غیرفعال و یا دوباره فعال کردن بارها، توده‌های حجمی یا اجزاء سازه‌ای تغییر داده شود. ساخت مرحله‌ای قادر است تا شبیه سازی دقیق و واقع‌گرایانه بارگذاری مختلف فرآیندهای ساخت و حفاری را انجام دهد. پنجره Staged construction همانند پنجره شرایط اولیه می‌باشد و شامل دو حالت مختلف پیکربندی هندسه و حالت شرایط آب می‌باشد. حالت پیکربندی هندسه می‌تواند برای فعال و یا غیرفعال کردن بارگذاری‌ها، توده‌های خاک و اجزاء سازه‌ای و دوباره تعیین کردن اطلاعات مصالح برای توده‌ها و اجزاء سازه‌ای استفاده شود. بعد از مشخص کردن توده‌ها و اجزاء سازه‌ای که باید در فاز محاسباتی فعال باشند و انتخاب کردن نقاط برای ایجاد منحنی‌های بار-تغییر مکان یا دیاگرام تنش - کرنش، محاسبات شروع می‌شود، و فازهای تعیین شده به ترتیب محاسبه می‌شوند. بعد از پایان محاسبات می‌توان نتایج آنالیز را در برنامه Output مشاهده کرد.

۴-۱-۱-۳ قسمت Output

کمیت‌های خروجی اصلی محاسبه المان محدود، تغییر مکان در گره‌ها و تنش‌ها در نقاط تنش می‌باشند. وقتی که مدل المان محدود شامل المان‌های سازه‌ای باشد نیروهای سازه‌ای در این المان محاسبه می‌شوند. برنامه Output شامل تمام تسهیلات برای دیدن لیست نتایج ایجاد شده از اطلاعات ورودی و محاسبات المان محدود می‌باشد. برای رسم منحنی‌های بار-تغییر مکان و تنش-کرنش باید وارد برنامه Curves شد.

۴-۱-۱-۴ قسمت Curves

این قسمت برای رسم منحنی‌های بار-تغییر مکان، زمان-تغییر مکان، تنش- کرنش و یا مسیرهای تنش یا کرنش در نقاط از قبل مشخص شده استفاده می‌شود.

۴-۲- آشنایی با نرم‌افزار فلک

برنامه FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua)، یک برنامه تفاضل محدود صریح دو بعدی برای محاسبات مکانیکی مهندسی است. این برنامه توانایی شبیه سازی دو بعدی رفتار سازه‌های خاکی، سنگی و... را دارد. این برنامه رفتار ساختارهای خاک، سنگ و یا دیگر مواد را که ممکن است هنگام نزدیک شدن به محدوده شکست، رفتارهای گوناگون از خود نشان دهند را مدل سازی می‌کند که مواد به صورت اجزا یا مناطق نشان داده می‌شوند. این اجزا شبکه‌ای را که کاربر برای مدلسازی موضوع مورد نظر طراحی کرده است را تشکیل می‌دهند. اجزا می‌توانند بر طبق خواص داده شده، شکسته شوند یا جریان یابند و شبکه می‌تواند تغییر شکل دهد و یا جابجا شود. اگرچه FLAC در اصل برای کاربردهای مهندسی عمران و معدن طراحی شده است، اما قابلیت زیادی برای حل مسائل مکانیک نیز دارد. ساختارهای متعددی در این برنامه وجود دارند که مدل سازی موادی را که رفتارشان بسیار غیر خطی می‌باشد را ممکن می‌سازد. علاوه بر این FLAC امکانات خاص دیگری نیز دارد:

(۱) طرح های تنش و کرنش صفحه ای و مدل های هندسی

(۲) مدل المانهای ساختاری برای مدلسازی نگهداری

(۳) امکان رسم پلات و مشاهده چشمی تغییرات

(۴) امکان آنالیزهای دینامیکی

(۵) امکان مدلسازی خزش و رفتار ویسکو الاستیک

(۶) امکان مدل کردن تاثیر تغییرات حرارتی

۷) امکان مدل کردن جریان آب زیر زمینی و توزیع فشار آن

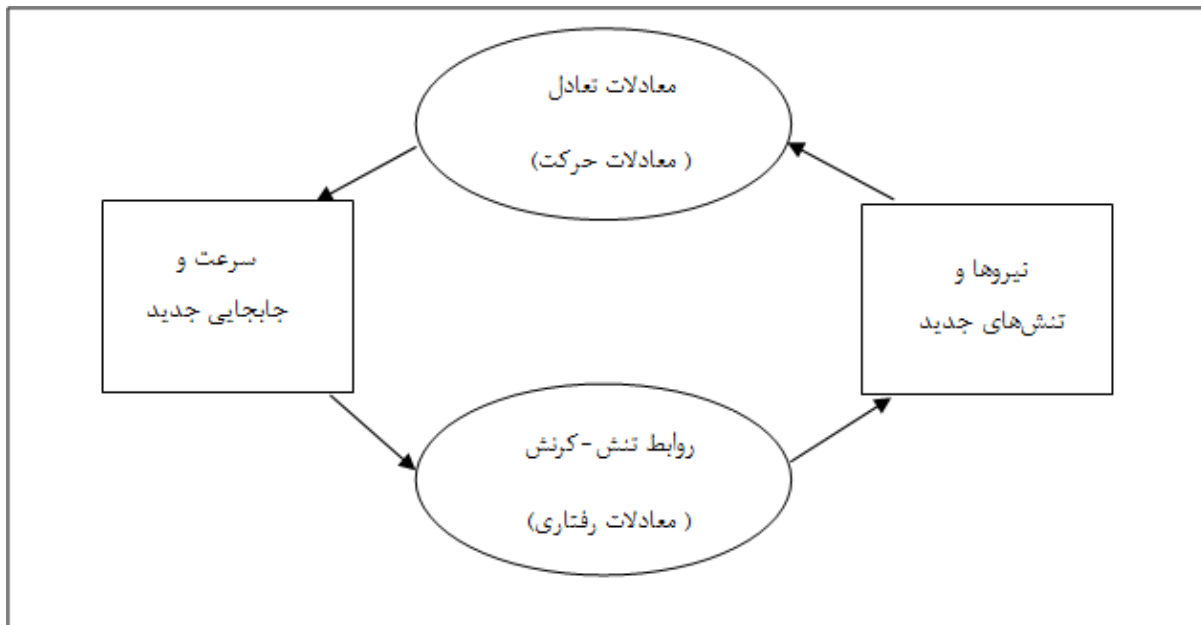
۸) امکان افزودن امکانات جدید مورد نظر کاربر با زبان C توسط کاربر.

دکتر پیتز کاندال در سال ۱۹۸۶ نرم افزار FLAC را برای تحلیل برخی مسائل بر روی یک میکرو کامپیوتر IMB طراحی کرد. این نرم افزار برای محاسبات سریع مدل هایی که المانهای بسیار دارند طراحی شده است. با افزایش سرعت محاسبات کامپیوتر و امکان نصب RAM بالا با قیمت ارزان، مسائل بزرگتر و مشکل تری با FLAC قابل حل خواهد بود. این برنامه در سال های اخیر گسترش زیادی یافته است که توسط شرکت مشاوره Itasca انجام گرفته است.

FLAC می تواند به دو صورت مورد استفاده قرار گیرد: وارد کردن دستورات در خط فرمان و استفاده از رابط گرافیکی. رابط گرافیکی شرایط اجرای سریعتر فرمان ها را فراهم می کند. در حالت استفاده از خط فرمان، کاربر به اطلاعات بیشتری در مورد FLAC نیاز دارد که برای کاربران مبتدی می تواند مشکل ساز باشد. زبان ورودی خط فرمان بر اساس کلمات قابل فهم است که درک عمل آن را برای کاربر آسان می نماید. هنگامی که از رابط گرافیکی برای مدلسازی استفاده می شود، متن دستورات در قسمت برنامه نویسی آن ثبت و ذخیره می شود. مرسوم است که در مرتبه نخست اجرای یک پروژه از دستورات گرافیکی به علت سهولت کار با آن استفاده شده و در مراحل بعدی که نیاز به دقت بیشتر در انجام عملیات می باشد، از بخش دستوری کمک گرفته می شود. اطلاعات یک فایل FLAC به آسانی از طریق تغییر متن آن تغییر می یابد و چند فایل را نیز می توان برای اجرای مراحل مختلف یک تحلیل به یکدیگر مرتبط ساخت. این کار برای مطالعات دقیق مناسب است.

علاوه بر موارد کاربردی که در بالا ذکر شد، این برنامه از قابلیت های دیگری نیز برخوردار می باشد که عمده ترین کاربرد آن در مسائل ژئوتکنیک می باشد. از این برنامه همچنین برای تحلیل و طراحی در مهندسی معدن و ساختارهای زیرزمینی مورد استفاده قرار می گیرد. این برنامه روش حل معادلات جابجایی، امکان تحلیل شکست و ریزش را که پدیده مهمی در معدنکاری می باشد فراهم می سازد.

ترتیب انجام محاسبات در برنامه FLAC به صورت شکل زیر است. در این فرآیند ابتدا از معادلات حرکت استفاده می‌شود و پس از آن سرعت‌ها و تغییر مکان‌های جدید از تنش‌ها و نیروهای گرهی به دست می‌آیند، سپس نرخ کرنش از سرعت‌های گرهی جدید در هر جزء به دست می‌آید. هر گردش حول حلقه شکل بالا را، یک گام زمانی می‌گویند.



شکل ۴-۲- ترتیب انجام محاسبات در نرم افزار FLAC

FLAC یک برنامه‌ی تفاضل محدود صریح دو بعدی برای محاسبات مکانیکی مهندسی می‌باشد. این برنامه توانایی شبیه سازی ساختاری خاک، سنگ یا دیگر مواردی که ممکن است تحت جریان پلاستیک قرار بگیرند، دارا می‌باشد. مواد با المانها یا زونهایشان که به فرم شبکه می‌باشند، مشخص می‌شوند. ایجاد مدل بر عهده ی کاربر می‌باشد، هر المان مطابق قانون تنش-کرنش خطی یا غیر خطی که برایش تعریف می‌شود در مقابل نیروها یا قید و مرزها عکس العمل نشان می‌دهد، مواد به نقطه‌ی تسلیم رسیده و می‌توانند جریان یابند و در این صورت باعث تغییر شکل شبکه خواهد شد.

ویژگی های مختلف این برنامه بدین صورت است :

- وجود المانهای فصل مشترک برای مدل سازی صفحات محدود بین شکاف ها و جداشدگی ها.
- کرنش و تنش صفحه ای و مدل های هندسی با تقارن محوری.
- مدل سازی آب های زیرزمینی و تحکیم به کمک محاسبات سطحی و به صورت خودکار.
- مدل سازی المانهای ساختاری برای شبیه سازی نگهدارنده های ساختاری (بعنوان مثال پوشش های تونل، پیچ سنگ ها و پایه های فونداسیون)
- توانایی تحلیل دینامیکی به صورتی انتخابی
- مدل سازی انتخابی ویسکوالاستیک و ویسکو پلاستیک (خزش)
- توانایی مدل سازی تنش های خالص و تنش های حرارتی-دینامیکی.
- مدل سازی جریان به صورت دوفازی برای شبیه سازی جریان دو مایع غیرقابل اختلاط (مانند آب و روغن) در یک محیط متخلخل
- قابلیت اضافه کردن مدل های ترکیبی که توسط کاربر تعریف شده و در برنامه ی ++c یا برنامه نویسی پیوندی دینامیک DLLS نوشته شده، که در صورت نیاز می توان اجرا نمود.
- FLAC همچنین شامل یک زبان برنامه نویسی داخلی بنام FISH می باشد که برای تعریف توابع و متغیر های جدید بکار برده می شود. این توابع برای تعریف موارد جدید و توسعه ی کاستی های موجود در این برنامه بکار می رود.
- FLAC دارای ۱۰ مدل رفتاری داخلی شامل مدل NULL که نشانگر حفاری ها در شبکه است، مدل الاستیک همسانگرد، مدل الاستیک همسانگرد TRANSVERSELY و ۷ مدل پلاستیک شامل (مدل

دراگر-پراگر، موهر-کولمب، درزه های همیشگی، سخت شدگی و نرم شدگی کرنش، درزه های موجود با سخت شدگی و نرم شدگی کرنش دوسویه، تسلیم شدگی مضاعف و تعمیم یافته (cam-clay)

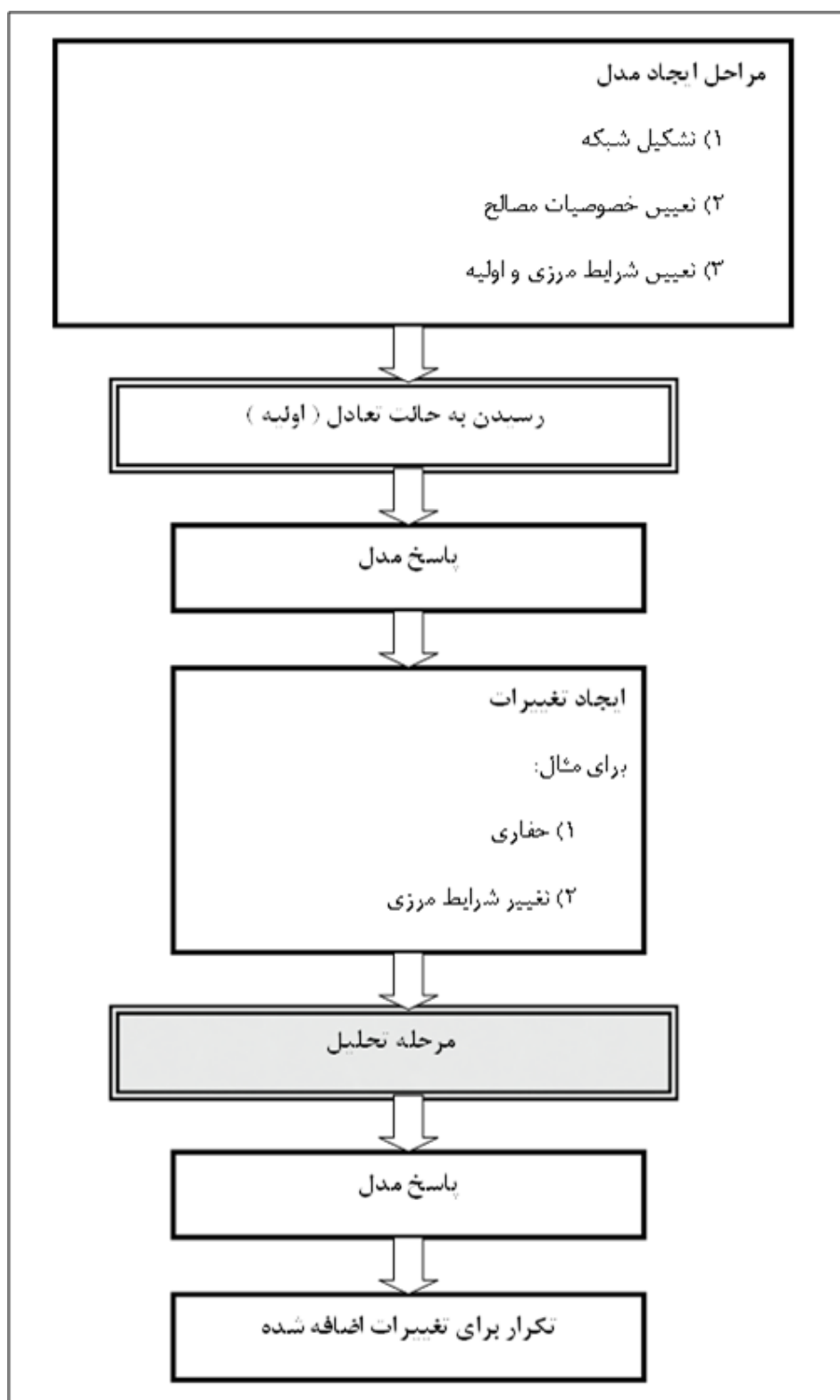
همچنین می توان هر مدل ساختاری مورد نظر را نیز به کمک زبان برنامه نویسی FISH مدل سازی کرد. هر زون در شبکه FLAC ممکن است دارای مدل های رفتاری متفاوت یا خصوصیات متفاوتی باشد. فرمول بندی FLAC برای مدل کرنش صفحه ای می باشد.

FLAC هر دستور را هنگامیکه کلید <Enter> فشرده شود اجرا خواهد کرد. اگر یک خطا ایجاد شود یک پیام خطا در صفحه نمایش نوشته خواهد شد.

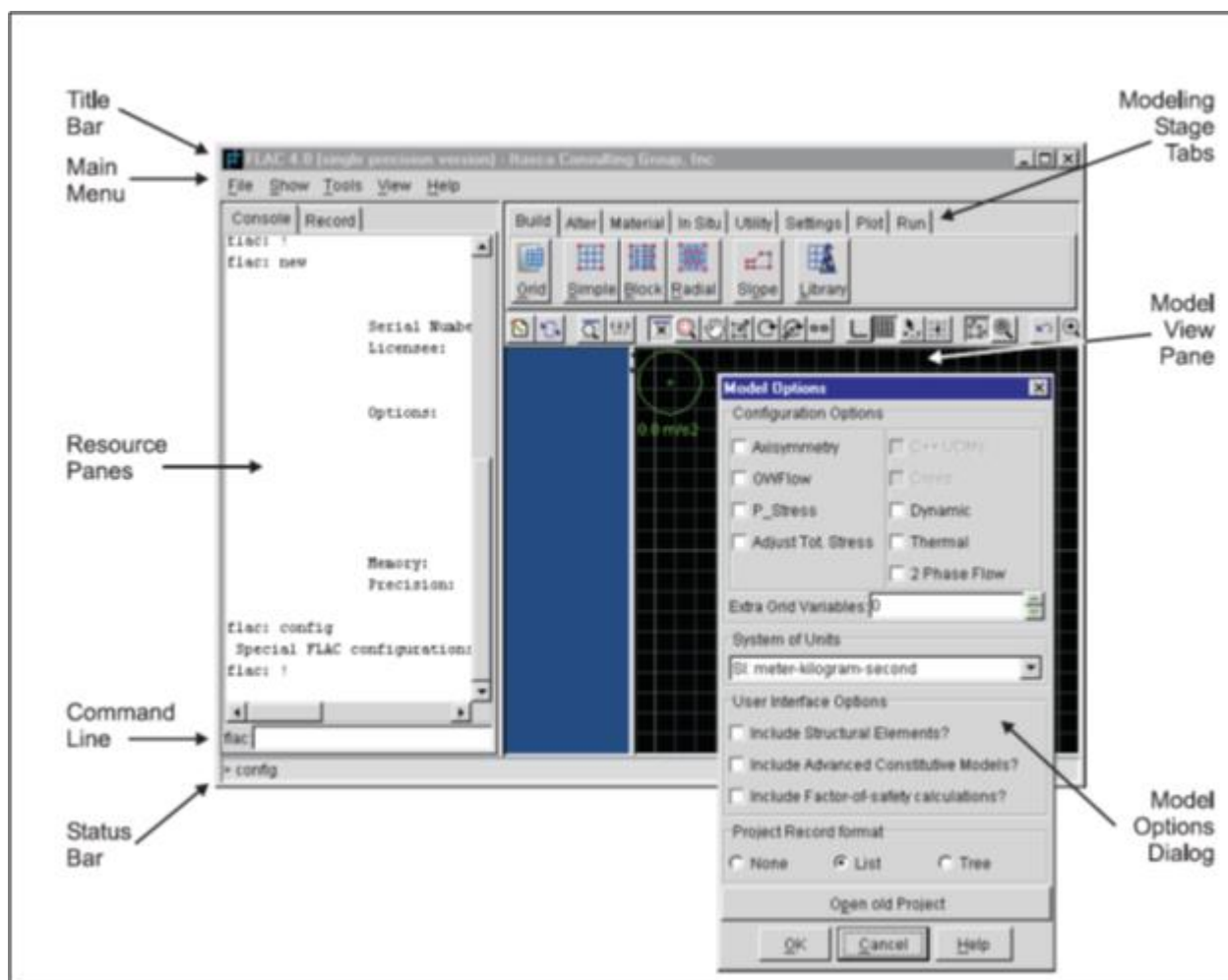
برای انجام تحلیل های استاتیکی، در ابتدا باید مدل هندسی مسئله را ایجاد کرد. این کار بوسیله دستورهای خاصی که هریک برای رسم شبکه های مخصوصی می باشد، انجام می شود. بعد از آن نوبت به تعیین مشخصات مصالح و شرایط مرزی و اولیه می باشد. روند کلی حل مساله با استفاده از FLAC در شکل ۳-۴ نشان داده شده است.

این برنامه به دو صورت command driven و graphically codes می باشد. در هر دو حالت از نرم افزار برای انجام مراحل مدلسازی که در شکل ۳-۴ نشان داده شده است برای هر مرحله، احتیاج به یک دستور (command) می باشد که باید این دستور بطور دقیق وارد شود.

وقتی نرم افزار بصورت graphically codes اجرا شود پنجره اصلی نرم افزار که در شکل ۴-۴ نشان داده شده است نمایش داده می شود. که در این حالت نیز باید مراحل کار بصورتی که بیان شده است اجرا شود.



شکل ۴-۳- روند کلی حل مساله در نرم افزار FLAC



شکل ۴-۴- پنجره اصلی GIIC (graphically codes)

۴-۳- مدل سازی دیواره های پروژه بصورت دو بعدی

با توجه به آیین نامه FHWA مقدار فاکتور ایمنی حداقل مورد نیاز برای سیستم سازه نگهبان نیلینگ ۱/۳۵ می باشد و حداکثر جابجایی مجاز دیواره برای خاکهای دانه ای ۰/۰۰۲ ارتفاع و برای خاکهای چسبنده ۰/۰۰۳ ارتفاع می باشد. با توجه به مطالعات ژئوتکنیکی، محدوده مورد نظر از دو لایه با مشخصات جدول ۴-۱ تشکیل شده است.

پارامتر خاک	ضخامت لایه (متر)	چگالی (kg / m^3)	مدول یانگ (Mpa)	چسبندگی (Kpa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
خاک دستی با تراکم متوسط	۶ متر	۱۷۰۰	۳۰	۱۰	۲۵
خاک با تراکم بالاتر	تا عمق ۳۵ متری	۱۹۰۰	۵۰	۲۰	۳۰

جدول ۴-۱- مشخصات ژئوتکنیکی لایه های خاک

مشخصات سازه نگهبان پیشنهادی برای دیواره‌های شمالی، جنوبی و نشان داده شده است. سیستم نیلینگ در دیواره شمالی با فاصله افقی ۱/۶ متر و برای دیواره جنوبی و غربی با فاصله افقی ۲ متر می‌باشد.

شاتکریت دارای ضخامت ۱۰ سانتی‌متر و مقاومت مشخصه $f'_c = 250 kg / cm^2$ می‌باشد. میلگردهای استفاده شده به عنوان نیلینگ یا انکر از نوع *AIII* با تنش جاری شدن $f_y = 4200 kg / cm^2$ و مقدار ظرفیت کششی مجاز $0.6 f_y$ می‌باشد. قطر تزریق نیز با توجه تزریق تحت فشار بین ۴-۶ بار، حداقل برابر با ۱۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.

برای مدلسازی شاتکریت در نرم افزار فلک از المان *Beam* و در نرم افزار پلکسیس از المان پلیت استفاده می شود. همچنین برای مدلسازی نیل در نرم افزار فلک از المان کابل و در نرم افزار پلکسیس از المان ژئوگرید استفاده می شود.

جدول ۴-۲: برای دیواره شمالی و جنوبی با در نظر گرفتن مشخصات نیل بصورت زیر می باشد

زاویه نصب	قطر نیل (میلی متر)	فاصله از لبه ترانشه (m)	فاصله عمودی (m)	فاصله افقی (m)	طول نیل (m)	ردیف
۱۰	۲۸	۱	۱	۲	۸	۱
۱۰	۲۸	۳	۲	۲	۸	۲
۱۰	۲۸	۵	۲	۲	۶	۳
"	۲۸	۷	۲	۲	۵	۴
"	۲۸	۸	۱	۲	۵	۵

مقدار سربار ناشی از بار ترافیک در ضلع شمال برابر با $10KPa$ و مقدار سربار ناشی از ساختمان دو طبقه $20KPa$ و مقدار سربار ضلع جنوب نیز $10KPa$ در نظر گرفته شده است.

جدول ۴-۲:

برای دیواره شرقی و غربی نیز با در نظر گرفتن آرایش نیل ها بصورت زیر می باشد..

ردیف	طول نیل (m)	فاصله افقی (m)	فاصله عمودی (m)	فاصله از لبه ترانشه (m)	قطر نیل (میلی متر) (زاویه نصب
۱	۱۲	۱/۵	۰/۵	۰/۵	۳۲	۱۰
۲	۱۲	۱/۵	۱/۵	۲	۳۲	۱۰
۳	۱۲	۱/۵	۱/۵	۳/۵	۳۲	۱۰
۴	۱۰	۱/۵	۱/۵	۵	۳۲	"
۵	۱۰	۱/۵	۱/۵	۶/۵	۳۲	"
۶	۹	۱/۵	۱/۵	۸	۳۲	"
۷	۹	۱/۵	۱/۵	۹/۵	۳۲	۱۰
۸	۸	۱/۵	۱/۵	۱۱	۳۲	۱۰
۹	۷	۱/۵	۱/۵	۱۲/۵	۳۲	۱۰

ردیف	طول نیل (m)	فاصله افقی (m)	فاصله عمودی (m)	فاصله از لبه ترانشه (m)	قطر نیل (میلی متر)	زاویه نصب
۱	۸	۱/۵	۱	۱	۲۸	۱۰
۲	۸	۱/۵	۲	۳	۲۸	۱۰
۳	۶	۱/۵	۲	۵	۲۸	۱۰
۴	۵	۱/۵	۲	۷	۲۸	"
۵	۵	۱/۵	۱	۸	۲۸	"

جدول ۳-۴ :

برای دیواره شمالی و جنوبی با در نظر گرفتن مشخصات نیل بصورت زیر، فاکتور ایمنی بیشتر از مقدار مجاز ۱/۳۵ می باشد.

برای دیواره شرقی و غربی نیز با در نظر گرفتن آرایش نیل ها بصورت زیر ، فاکتور ایمنی تعادل حدی آن بصورت بیشتر از مقدار مجاز ۱/۳۵ می باشد

ردیف	طول نیل (m)	فاصله افقی (m)	فاصله عمودی (m)	فاصله از لبه ترانشه (m)	قطر نیل (میلی متر)	زاویه نصب
۱	۱۴	۱/۵	۰/۵	۰/۵	۳۲	۱۰
۲	۱۴	۱/۵	۱/۵	۲	۳۲	۱۰
۳	۱۴	۱/۵	۱/۵	۳/۵	۳۲	۱۰
۴	۱۲	۱/۵	۱/۵	۵	۳۲	"
۵	۱۰	۱/۵	۱/۵	۶/۵	۳۲	"
۶	۹	۱/۵	۱/۵	۸	۳۲	"
۷	۹	۱/۵	۱/۵	۹/۵	۳۲	۱۰
۸	۸	۱/۵	۱/۵	۱۱	۳۲	۱۰
۹	۷	۱/۵	۱/۵	۱۲/۵	۳۲	۱۰

با توجه به هندسه سه دیواره و اعمال شرایط اولیه مدلسازی عددی این دیواره‌ها در نرم‌افزارهای پلکسیس و فلک قابل اجرا می‌باشد. مرزهای جانبی در فاصله ۲۵ متری از ناحیه گودبرداری در نظر گرفته شده است. بعد مشخص کردن هندسه دو لایه و مشخصات پارامترهای موهر=کلمب نوبت به مشخص کردن شرایط مرزی و اولیه می‌باشد. گره مرزهای جانبی در جهت عمود بر مرز ثابت شده‌اند و در این جهت اجازه حرکت ندارند و از حرکت گره‌های المان‌ها در این جهت جلوگیری می‌شود. در نرم‌افزار پلکسیس برای این منظور از دستورات Standard fixities در منو Loads و در نرم‌افزار فلک از دستور FIX استفاده می‌شود. اگر در نرم‌افزار پلکسیس دقت شود در دو مرز قائم جانبی، دو خط سبز کوچک موازی کشیده شده است که نشان دهنده این مطلب است که این گره‌ها فقط می‌تواند در

جهت قائم جابجا شوند و در مرز پایینی نیز چهار خط کوچک سبز متقاطع رسم شده است که نشان دهنده این مطلب است که این گره‌های مرزی در هر دو جهت قادر به حرکت نمی‌باشند و در نرم افزار فلک جهتی که در مرز ثابت شده است با جهت محور مختصات X ، Y یا B (هر دو جهت) مشخص شده است. در انتها باید شرایط اولیه آب و تنش‌های اولیه مشخص می‌شود. محیط در نظر گرفته شده خشک می‌باشد و در این ستون خاک، بعلت وزن طبقات خاک تنش‌های افقی و قائمی قبل از حفر گود وجود دارد، که این حالت تعادل اولیه، در زمان حفر گود از بین می‌رود و دچار اغتشاش خواهد شد. مقدار تنش قائم براساس فشار حاصل از وزن طبقات خاکی، و مقدار تنشهای افقی در دو جهت برابر فرض شده و مقدار آن نیز با توجه به ضریب فشار جانبی خاک فرمول جکی به دست می‌آید :

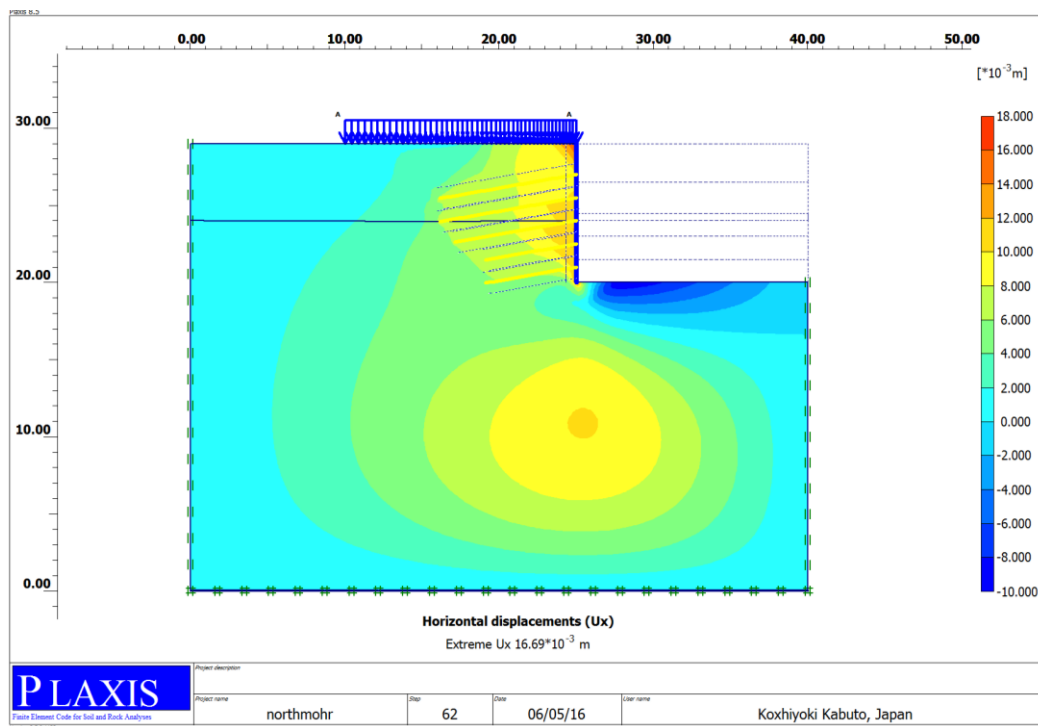
$$\sigma_{zz} = \rho gh$$

$$k = 1 - \sin(\phi) \Rightarrow \sigma_{xx} = \sigma_{yy} = k \sigma_{zz}$$

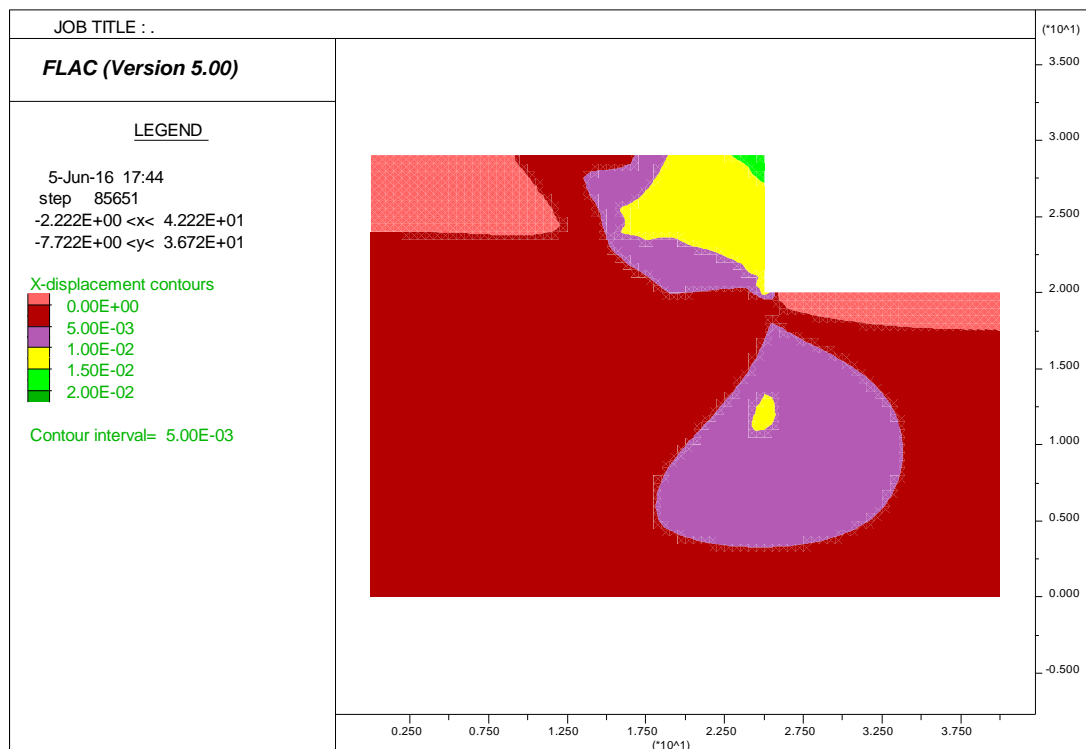
بعد از مشخص کردن شرایط مرزی و اولیه باید شرایط تعادل اولیه قبل از حفر گود ایجاد شود و بعد از ایجاد شرایط تعادل اولیه، حفاری گود با گام‌های ۱/۵ متری و نصب سیستم نیلینگ در هر گام آغاز می‌شود و تاثیر سیستم سازه نگهبان در جابجایی افقی و قائم دیواره‌ها با نرم‌افزارهای فلک و پلکسیس مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جابجایی افقی دیواره شمالی در نرم‌افزار پلکسیس و فلک به ترتیب در شکل‌های ۱۲-۴ و ۱۳-۴ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است ماگزیمم جابجایی افقی در نرم افزار پلکسیس حدود ۱۷ میلی‌متر و در نرم‌افزار فلک حدود ۲۰ میلی‌متر می‌باشد.

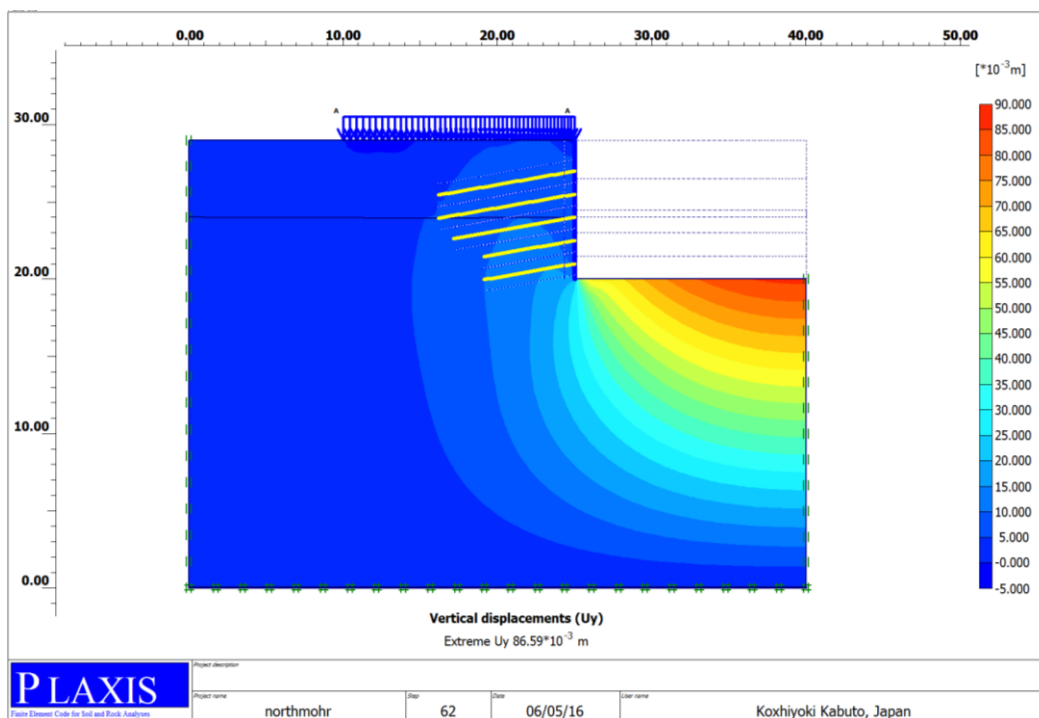
جابجایی قائم (نشست) دیواره شمالی در نرم‌افزار پلکسیس و فلک به ترتیب در شکل‌های ۱۴-۴ و ۱۵-۴ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است ماگزیمم جابجایی نشست در نرم افزار پلکسیس حدود ۵ میلی‌متر و در نرم‌افزار فلک حدود ۱۰ میلی‌متر می‌باشد و بالاآمدگی کف نیز در پلکسیس حدود ۹۰ میلی‌متر و در فلک حدود ۸۰ میلی‌متر می‌باشد.



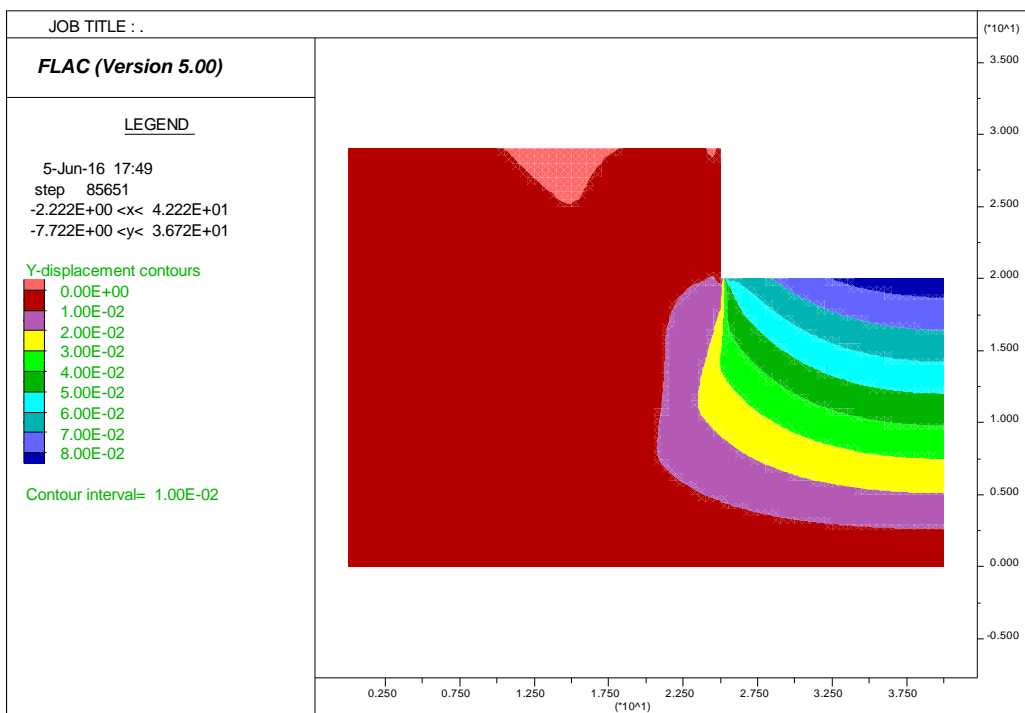
شکل ۴-۱۲- جابجایی افقی دیواره شمالی در نرم افزار پلکسیس (بر حسب متر)



شکل ۴-۱۳- جابجایی افقی دیواره شمالی در نرم افزار فلک (بر حسب متر)



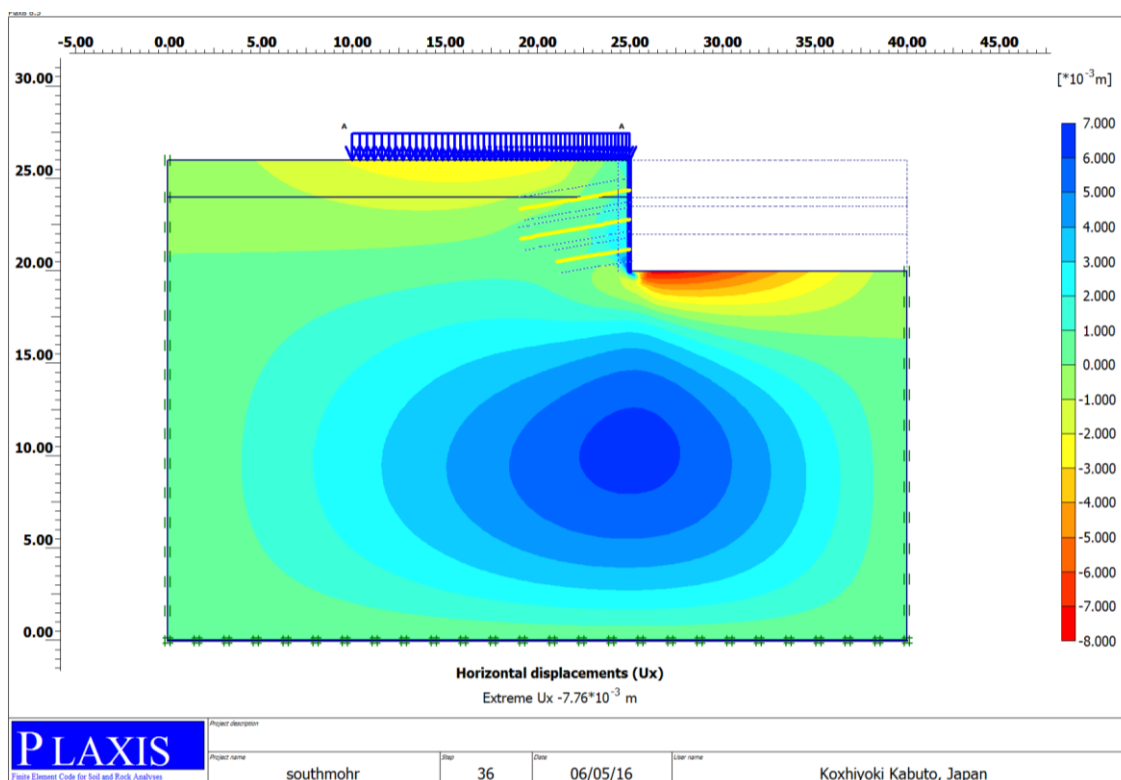
شکل ۴-۱۴ - جابجایی قائم دیواره شمالی در نرم افزار پلکسیس (بر حسب متر)



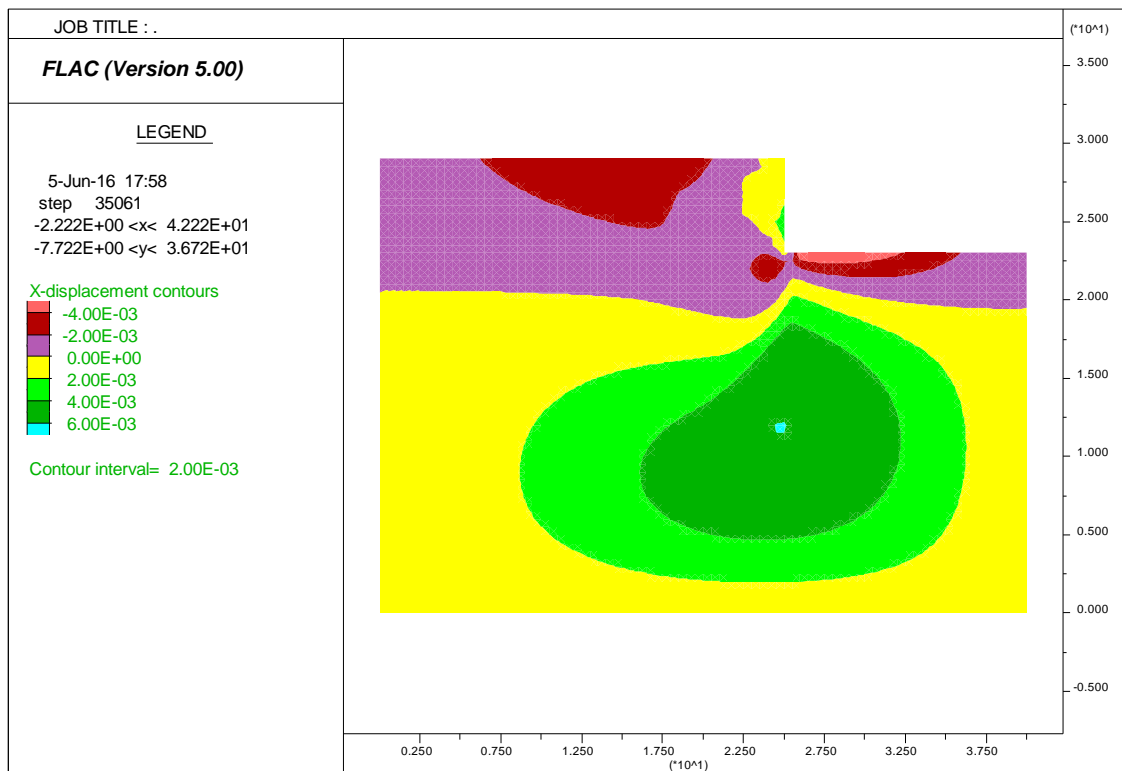
شکل ۴-۱۵ - جابجایی قائم دیواره شمالی در نرم افزار فلک (بر حسب متر)

جابجایی افقی دیواره جنوبی در نرم افزار پلکسیس و فلک به ترتیب در شکل های ۱۶-۴ و ۱۷-۴ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است ماگزیمم جابجایی افقی در نرم افزار پلکسیس حدود ۲ میلی متر و در نرم افزار فلک حدود ۲ میلی متر می باشد.

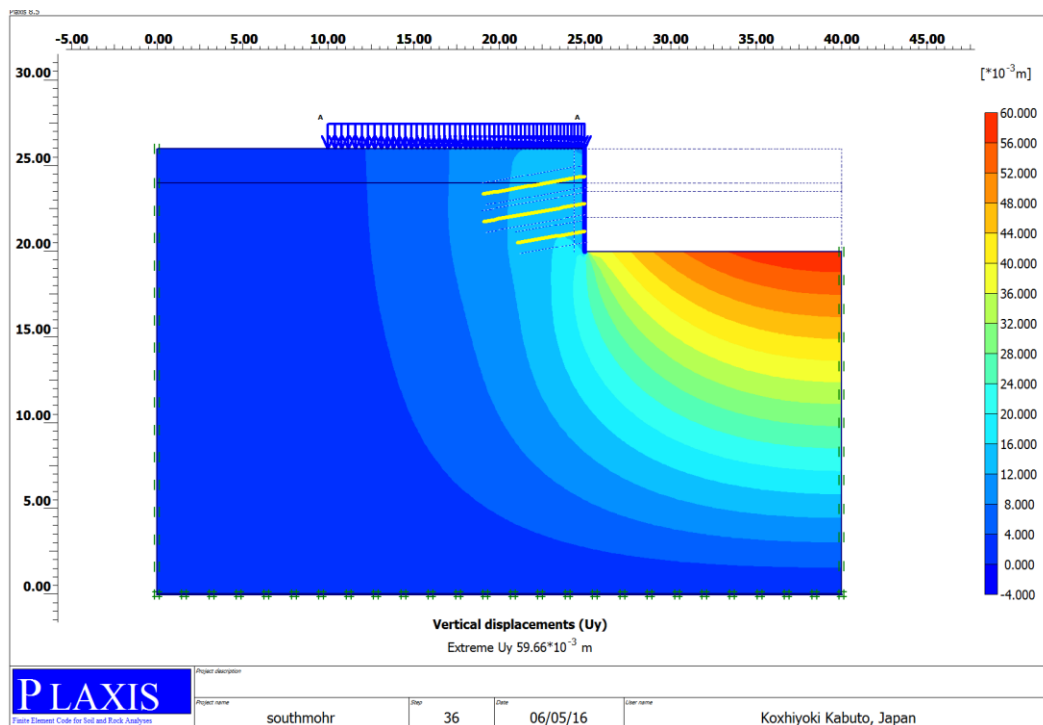
جابجایی قائم (نشست) دیواره جنوبی در نرم افزار پلکسیس و فلک به ترتیب در شکل های ۱۸-۴ و ۱۹-۴ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است ماگزیمم جابجایی نشست در نرم افزار پلکسیس حدود ۱۲ میلی متر و در نرم افزار فلک حدود ۱۰ میلی متر می باشد و بالا آمدگی کف نیز در پلکسیس حدود ۶۰ میلی متر و در فلک حدود ۶۰ میلی متر می باشد.



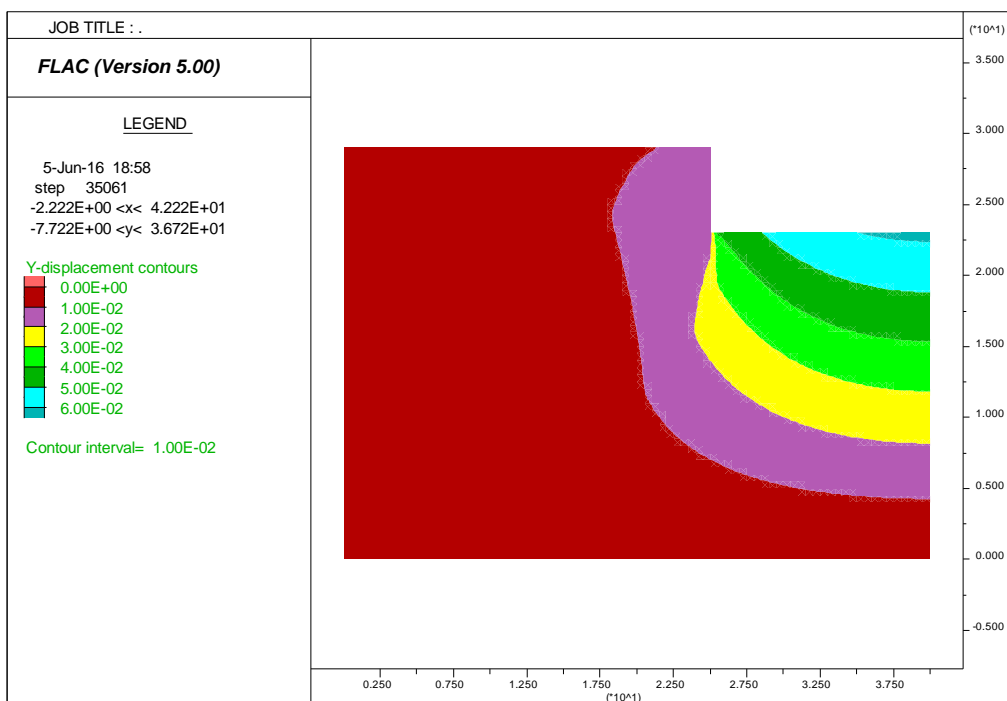
شکل ۴-۱۶ - جابجایی افقی دیواره جنوبی در نرم افزار پلکسیس (برحسب متر)



شکل ۴-۱۷- جابجایی افقی دیواره جنوبی در نرم افزار پلکسیس (بر حسب متر)



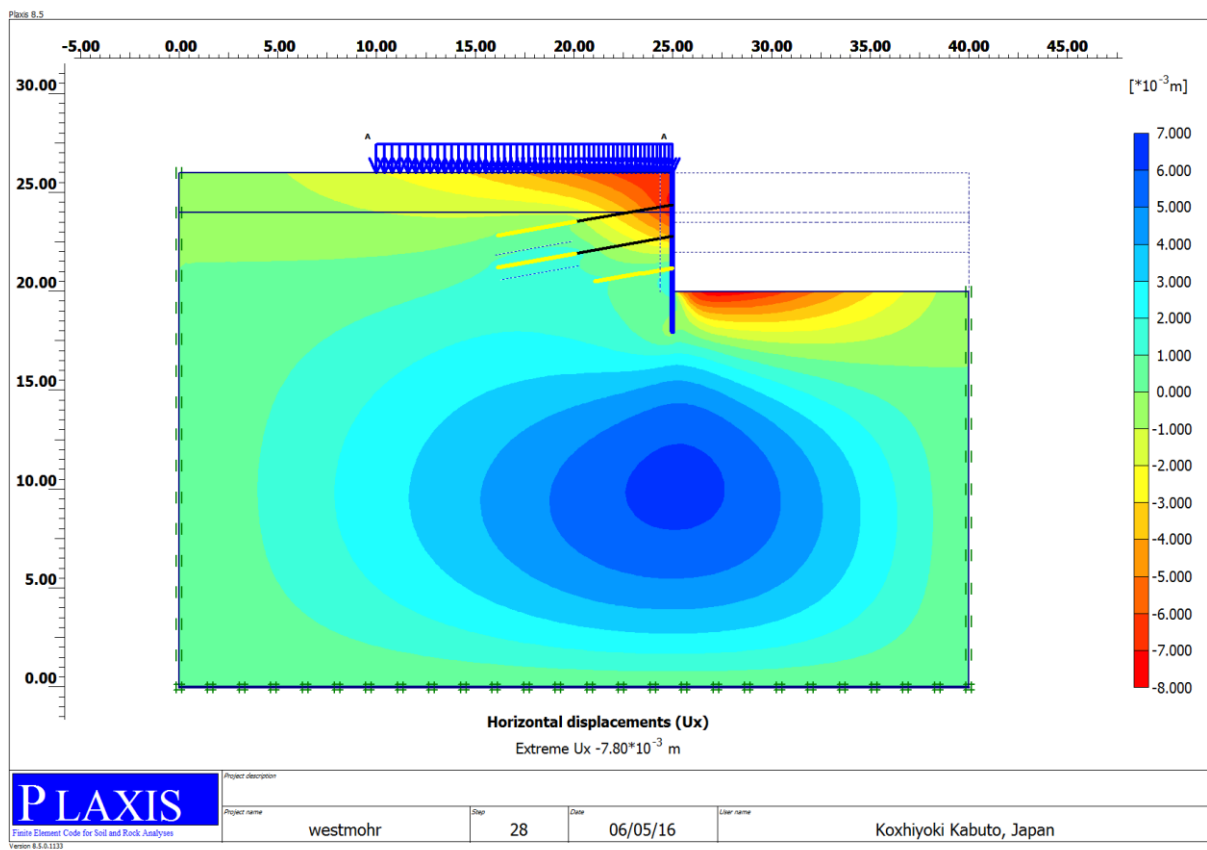
شکل ۴-۱۸- جابجایی قائم دیواره جنوبی در نرم افزار پلکسیس (بر حسب متر)



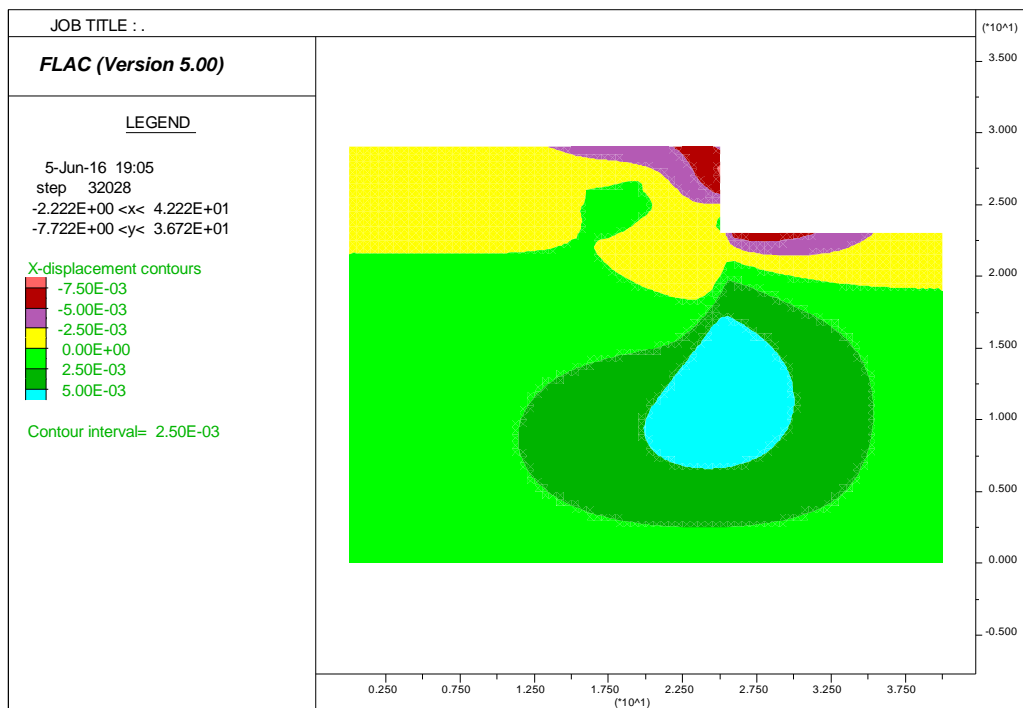
شکل ۴-۱۹- جابجایی قائم دیواره جنوبی در نرم افزار فلک (برحسب متر)

جابجایی افقی دیواره غربی در نرم افزار پلکسیس و فلک به ترتیب در شکل های ۴-۲۰ و ۴-۲۱ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است ماگزیمم جابجایی افقی در نرم افزار پلکسیس حدود ۸ میلی متر و در نرم افزار فلک حدود ۷/۵ میلی متر می باشد.

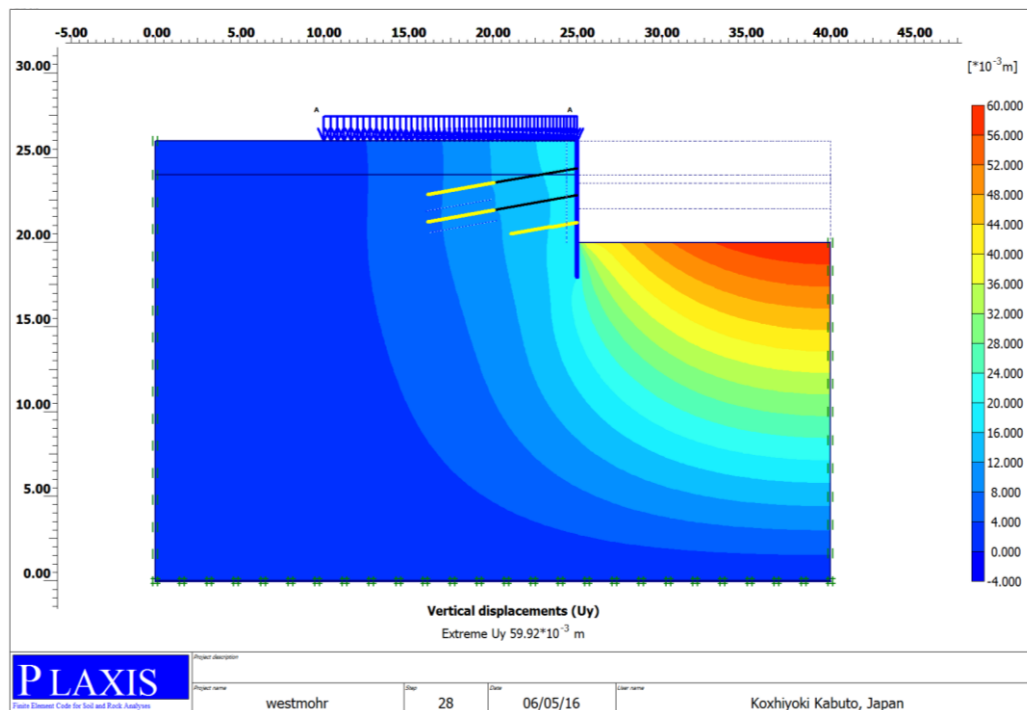
جابجایی قائم (نشست) دیواره غربی در نرم افزار پلکسیس و فلک به ترتیب در شکل های ۴-۲۲ و ۴-۲۳ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است ماگزیمم جابجایی نشست در نرم افزار پلکسیس حدود ۲۲ میلی متر و در نرم افزار فلک حدود ۲۰ میلی متر می باشد و بالا آمدگی کف نیز در پلکسیس حدود ۶۰ میلی متر و در فلک حدود ۶۰ میلی متر می باشد.



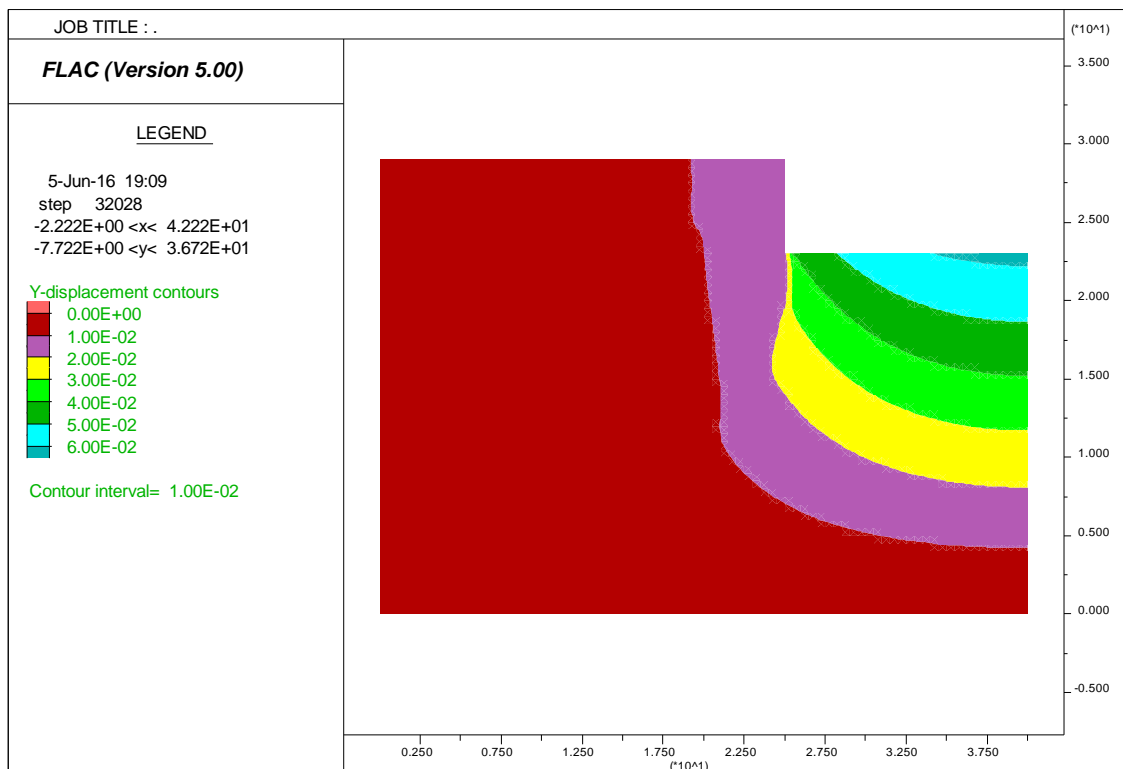
شکل ۴-۲۰- جابجایی افقی دیواره غربی در نرم افزار پلکسیس (برحسب متر)



شکل ۴-۲۱- جابجایی افقی دیواره غربی در نرم افزار فلک (برحسب متر)



شکل ۴-۲۲- جابجایی قائم دیواره غربی در نرم افزار پلکسیس (برحسب متر)



شکل ۴-۲۳- جابجایی قائم دیواره غربی در نرم افزار فلک (برحسب متر)

این نرم افزار به صورت دستورنویسی (Command-Driven) اجرا خواهد شد و باید دستورات در مقابل عبارت flac: نوشته شود. هر دستور هنگامیکه کلید <Enter> فشرده شود اجرا خواهد کرد. اگر یک خطا ایجاد شود یک پیام خطا در صفحه نمایش نوشته خواهد شد. بعنوان شکل دیگر یک فایل اطلاعات ورودی ممکن است با استفاده از ویرایشگر متن ایجاد شود. این فایل شامل مجموعه‌ای از دستورات همانند دستوراتی که در قسمت برنامه‌نویسی وارد می‌شوند. گرچه این فایل اطلاعات ممکن هست هر نامی داشته باشند ولی یک پسوند مشخص عمومی (برای مثال DAT). در تشخیص آن از بقیه فایل‌های FLAC3D کمک می‌کند. این برنامه همچنین شامل یک زبان برنامه نویسی داخلی بنام FISH می‌باشد که برای تعریف توابع و متغیرهای جدید بکار برده می‌شود. این توابع برای تعریف موارد جدید و توسعه‌ی کاستی‌های موجود در این برنامه بکار می‌رود.

این برنامه از فهرست علائم و اختصاراتی استفاده می‌کند که در حالت کلی در برنامه‌های تفاضل محدود و المان محدود نیز از آنها برای تحلیل تنش استفاده می‌شود. در شکل ۳-۴ یک مدلی که توسط نرم‌افزار FLAC3D ایجاد شده است همراه با اصطلاحات فنی فراهم شده است.

که این اصطلاحات تخصصی به صورت زیر می‌باشد :

FLAC3D MODEL: مدلی است که توسط کاربر جهت شبیه سازی یک مساله فیزیکی ایجاد

می‌شود.

ZONE: ناحیه، کوچکترین واحد از هندسه مدل است که با یک پدیده دچار تغییر می‌شود.

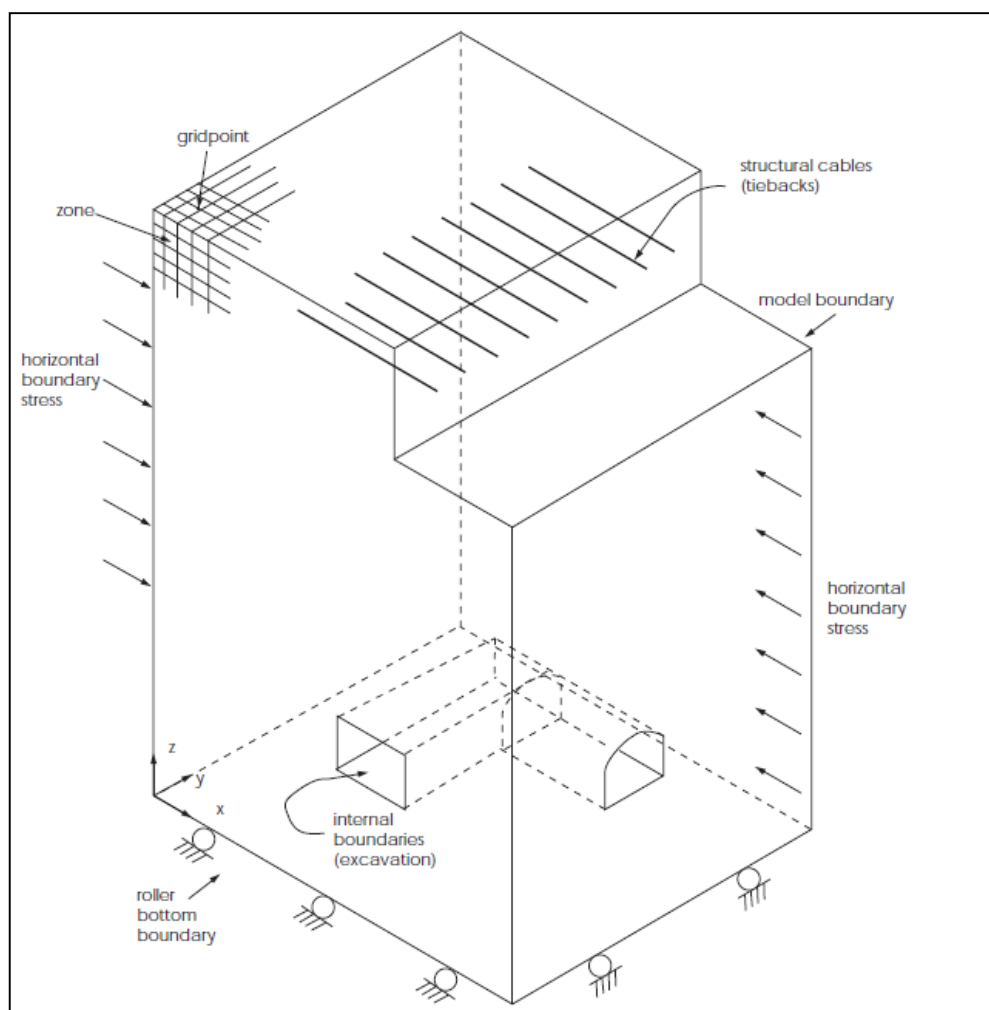
GRIDPOINT: نقاط گرهی، رئوس نواحی را نشان می‌دهد که دارای مختصات X,Y,Z می‌باشند.

FINITE DIFFERENCE GRID: شبکه تفاضل محدود، مجموعه بهم پیوسته‌ای از چند ناحیه است

که آنالیز روی آن انجام می‌شود. شبکه تفاضل محدود، محدوده‌ای فیزیکی است که تحلیل شبکه از آن

آغاز می‌شود. کوچکترین شبکه‌ای که می‌تواند توسط نرم‌افزار تحلیل شود فقط شامل یک زون است.

MODEL BOUNDARY: مرز مدل، به محدوده شبکه ایجاد شده اطلاق می‌شود.



شکل ۴-۲۴: یک مدل در نرم افزار فلک ۳ بعدی همراه با اصطلاحات تخصصی

BOUNDARY CONDITION: شرایط مرزی. در واقع قیدهایی هستند که به مدل اعمال می شوند.

مشخص کردن سرعت یا نیروی اعمالی به برخی گره ها برای مسائل مکانیکی و مرز نفوذ ناپذیر برای مسائل جریان آب زیرزمینی مثال هایی از این موارد هستند. این مقادیر در زمان اجرای برنامه ثابت می مانند.

INITIAL CONDITION: شرایط اولیه، وضعیت متغیرها در شروع آنالیز را تعیین می کند. برای مثال

تنش های برجا در مکانیک سنگ را می توان ایجاد کرد.

NULL ZONE: این ناحیه دارای مصالح نیست. در واقع همان ناحیه حفاری شده در مدل سازی است.

Unbalanced Force (نیروهای نامتعادل): نیروهای نامتعادل وقتی در حال رسیدن به حالت تعادل دینامیکی (آغاز لغزش درزه یا جریان پلاستیک) برای آنالیز الاستاسیک است، نمایان می‌شوند. یک مدل در تعادل کامل است اگر بردار نیروی گرهی خالص در مرکز هندسی هر ناحیه، صفر باشد. ماکزیمم بردار نیروی گرهی وقتی مشاهده می‌شود که فرمان STEP یا Cycle یا Solve اجرا شود. ماکزیمم بردار نیروی گرهی نیروی نامتعادل (Unbalanced) یا خارج از تعادل (Out Of Unbalanced) نیز نامیده می‌شوند. نیروی نامتعادل ماکزیمم هیچگاه برای یک تحلیل عددی عیناً به صفر نمی‌رسد. مدل وقتی که نیروی نامتعادل ماکزیمم در مقایسه با نیروهای موجود در مسئله کوچک باشد، در تعادل فرض می‌شود. اگر نیروی نامتعادل به یک مقدار ثابت غیر صفر میل کند احتمالاً بر اثر لغزش یا شکست ناحیه، جریان پلاستیک رخ می‌دهد.

قبل از اینکه تغییرات اعمال شود مدل باید به حالت تعادل نیروهای اولیه برسد. شرایط اولیه و مرزی اغلب ممکن است طوری تعیین شود که مدل کاملاً در تعادل ابتدایی است گرچه ممکن است به محاسبه تعادل اولیه تحت شرایط مرزی و ابتدایی داده شده (به خصوص برای مسائلی با هندسه پیچیده و مواد گوناگون) نیاز شود. این کار بوسیله دستور SOLVE یا STEP انجام می‌شود. در دستور STEP باید تعدادی مرحله محاسباتی، بمنظور رسیدن مدل به تعادل تعیین شود. دستور SOLVE را می‌شود به جای دستور STEP بکاربرد اگر خواسته شود نرم افزار بطور خودکار، هنگامی که ماکزیمم نیروی نامتعادل کننده یا نسبت تعادل به پایین تر از حد تعیین شده برسد متوقف شود.

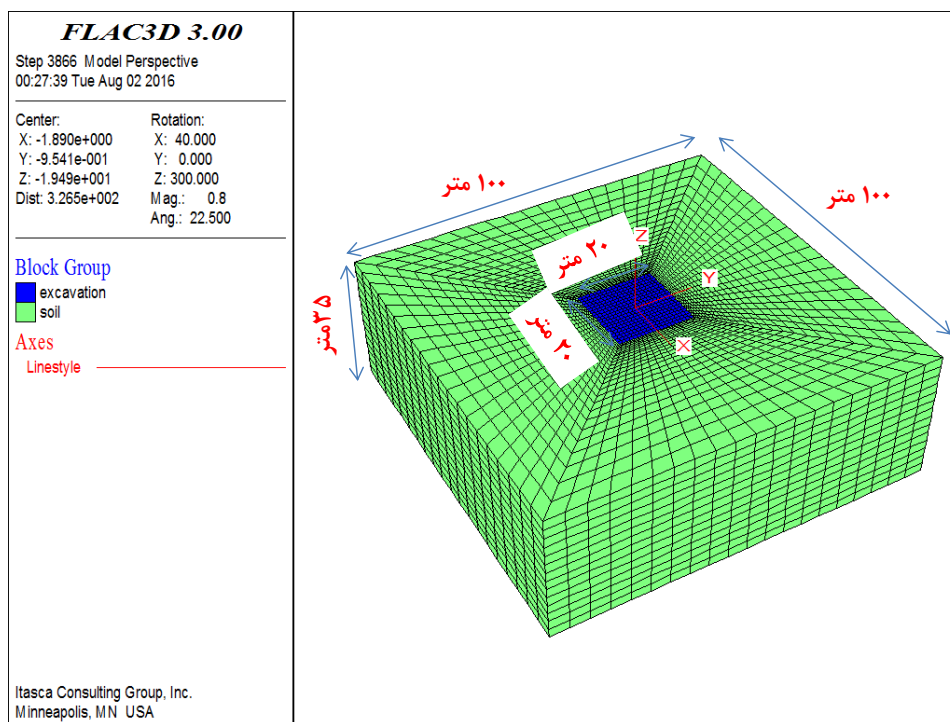
دو مقدار متفاوت در طی حل کردن مدل در صفحه نمایش چاپ می‌شود:

(۱) ماکزیمم بردار نیروی گره‌ای (ماکزیمم نیروی نامتعادل نامیده می‌شود)

۲) بزرگترین نسبت ماکزیمم نیروی نامتعادل به نیروی اعمالی در میان همه گره‌ها (نسبت تعادل نامیده می شود).

با استفاده از یک یا هر دو این اعداد بعنوان راهنما می شود وقتی را که مدل به تعادل می رسد را تعیین کرد. مهم است که توجه شود در محاسبات عددی نیروی نامتعادل هر گز دقیقا به صفر نخواهد رسید. بهر حال کفایت می کند برای گفتن اینکه مدل در حال تعادل است هنگامی که ماکزیمم نیروی نامتعادل در مقایسه با نیروی اعمالی در مسئله کوچک باشد. بنابراین یک مقدار ۰/۱ یا ۰/۱٪ برای نسبت تعادل بعنوان ملاک تعادل بسته به درجه دقت مورد نیاز قابل قبول است.

بعد از معرفی ، شبیه سازی سه بعدی مسئله آغاز می شود. که هندسه کلی در شکل زیر نشان داده شده است. مرزهای جانبی ۴۰ متر از لبه گود فاصله دارند تا تاثیر شرایط مرزی بر مدل کم شود و از شبکه بندی تدریجی (gradually graded mesh) استفاده شده است، تا تراکم زونها در اطراف منطقه حفاری بیشتر شود و با فاصله گرفتن از گود تراکم کمتر می شود. طول و عرض گود ۲۰ متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۴-۲۵: مدل سازی هندسی در نرم افزار فلک ۳ بعدی

مشخصات مورد نیاز برای المان کابل شامل مدول یانگ (E) ، مقاومت چسبندگی دوغاب (S_{bond}) ، سختی برشی واحد طول دوغاب (K_{bond}) ، سطح مقطع کابل $(area)$ ، مقاومت تسلیم فشاری $(ycomp)$ و مقاومت تسلیم کششی $(yield)$ می باشد. سختی برشی واحد طول دوغاب و مقاومت چسبندگی دوغاب معمولاً از طریق آزمایش کشش مستقیم (pull-out tests) بدست می آید و در صورت نبود این آزمایش از طریق فرمول های زیر محاسبه می شوند.

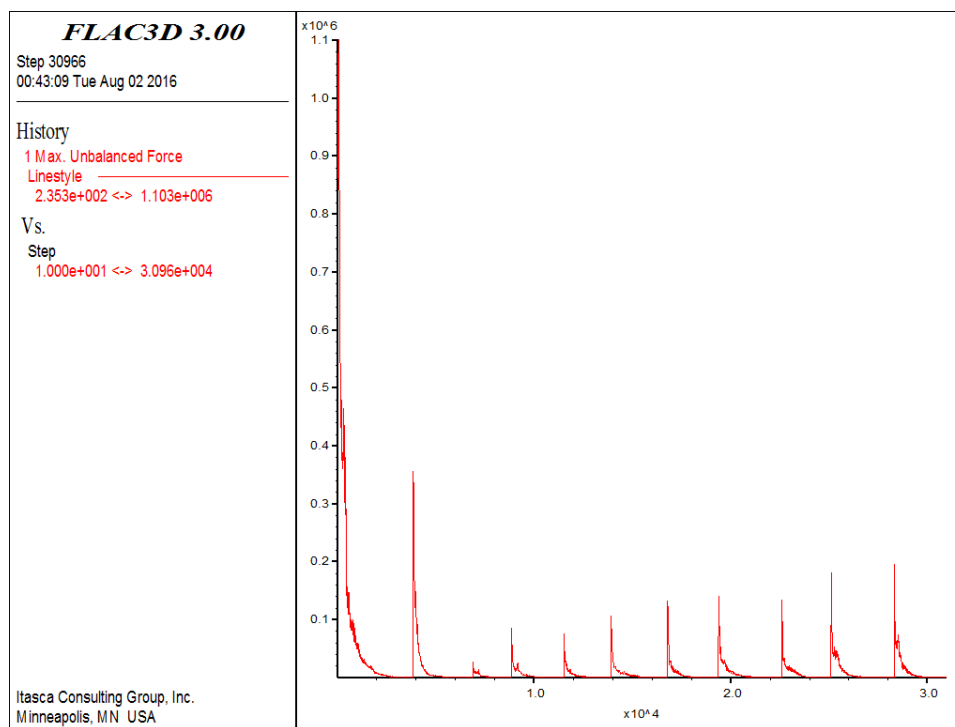
$$K_{bond} = \frac{2\pi G}{10 \ln(1 + 2t / D)}$$

که G مدول برشی دوغاب برابر با $6 GPa$ و D قطر کابل برابر با 32 mm و t ضخامت دوغاب اطراف

تاندون که بطور متوسط برابر با 34 mm می باشد (با در نظر گرفتن قطر حفاری 100 میلی متر)

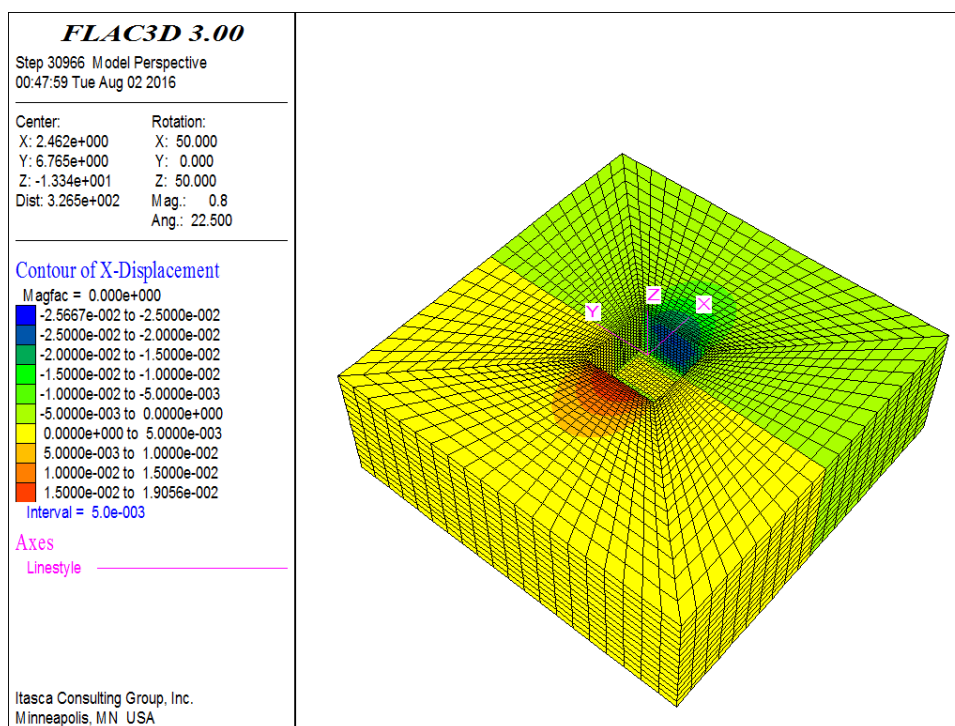
$$S_{bond} = \pi(D + 2t)\tau_{peak}$$

و مقدار τ_{peak} برابر با ۲۵۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است. بعد از انجام حفاری و نصب هر مرحله نیل و شاتکریت بعد از ۹ مرحله حفاری تا عمق ۱۴ متر خروجی‌ها بصورت زیر می باشد.



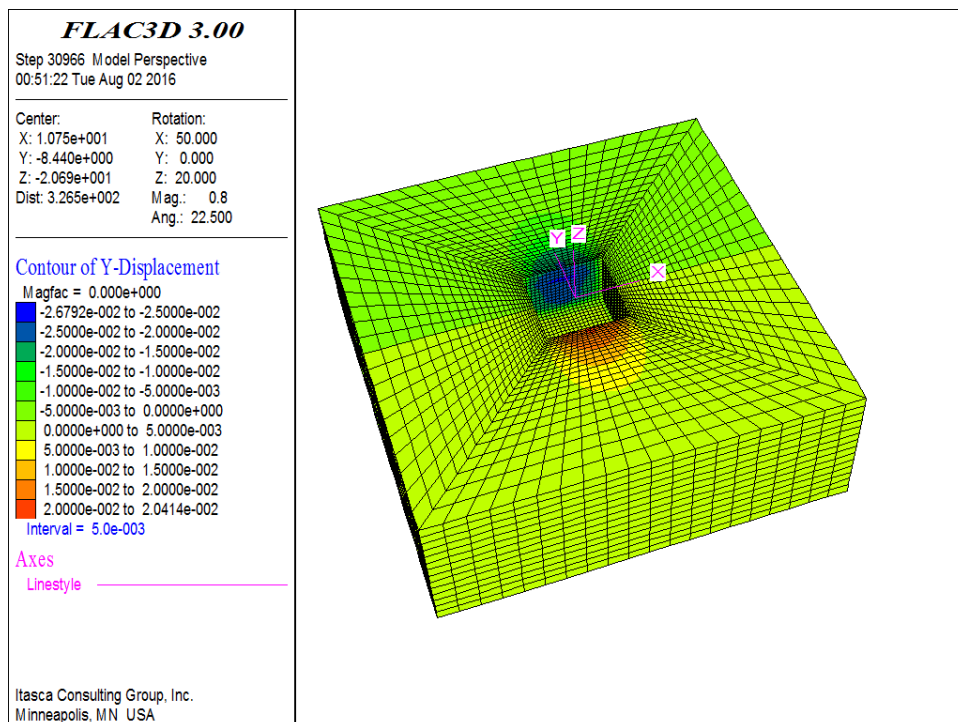
شکل ۴-۲۶: نیروهای نامتعادل کننده گری در انتهای تحلیل

همانطور که مشخص است نیروهای نامتعادل کننده به سمت صفر میل میکند که نشان دهنده به تعادل رسیدن محیط می باشد.



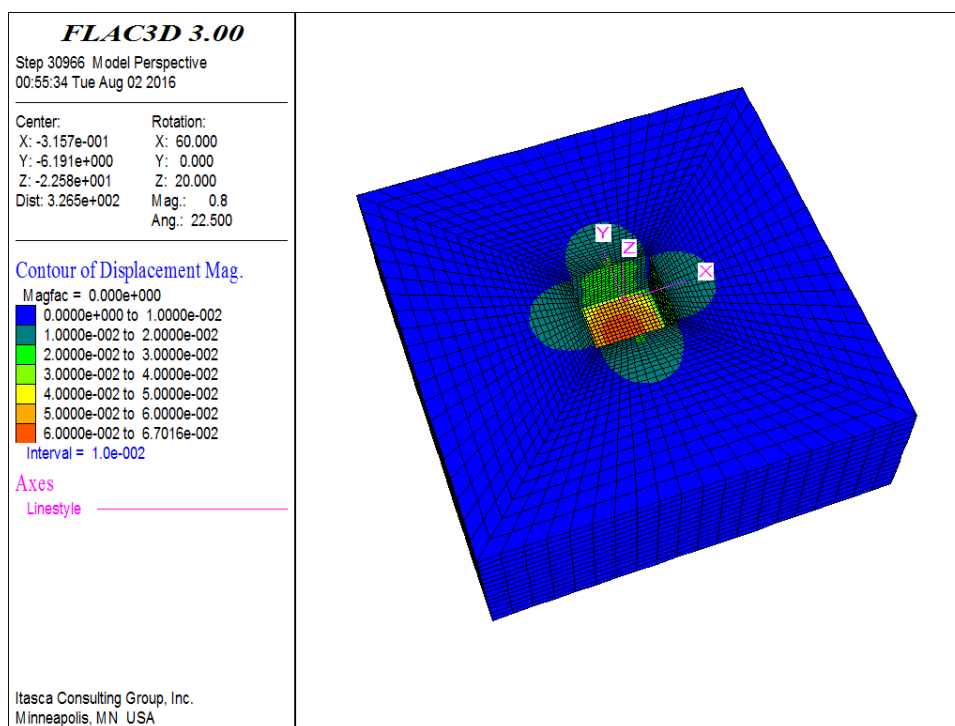
شکل ۴-۲۷: مدل سازی هندسی در نرم افزار فلک ۳ بعدی

این شکل کنتور جابجایی در جهت محور x را نشان می دهد که در همانطور که مشخص است جهت این محور به سمت شمال می باشد و این کنتور جابجایی دیواره شمالی و جنوبی را نشان می دهد که حداکثر ۲/۵۶ سانتی متر می باشد.



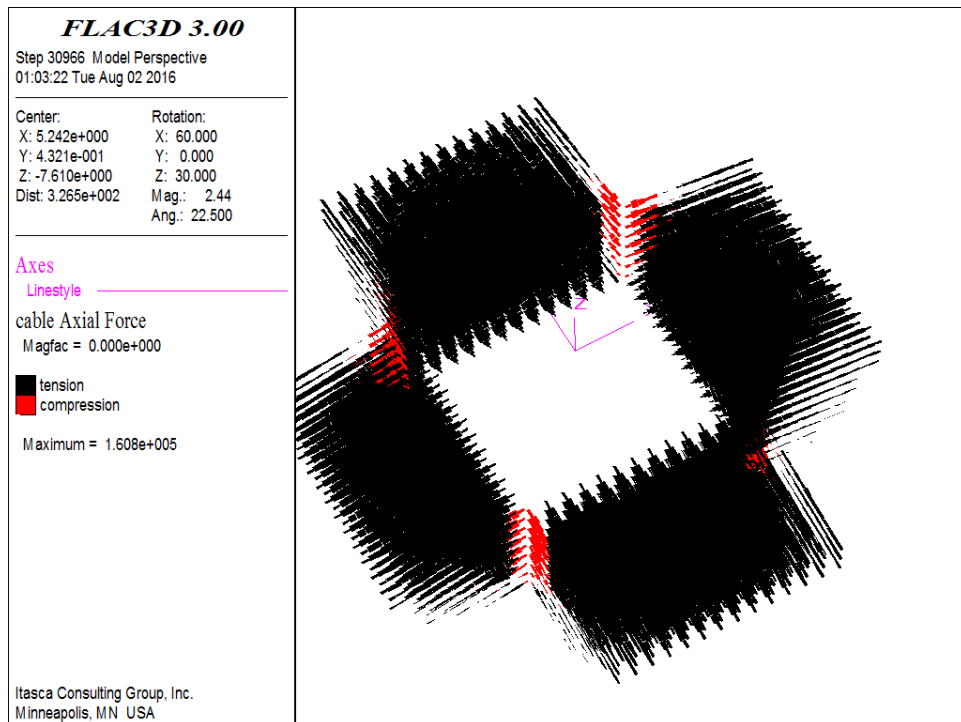
شکل ۴-۲۸: مدل سازی هندسی در نرم افزار فلک ۳ بعدی

این شکل کنتور جابجایی در جهت محور Y را نشان می دهد که در همانطور که مشخص است جهت این محور به سمت غرب می باشد و این کنتور جابجایی دیواره غربی و شرقی را نشان می دهد که حداکثر ۲/۶۷ سانتی متر می باشد.



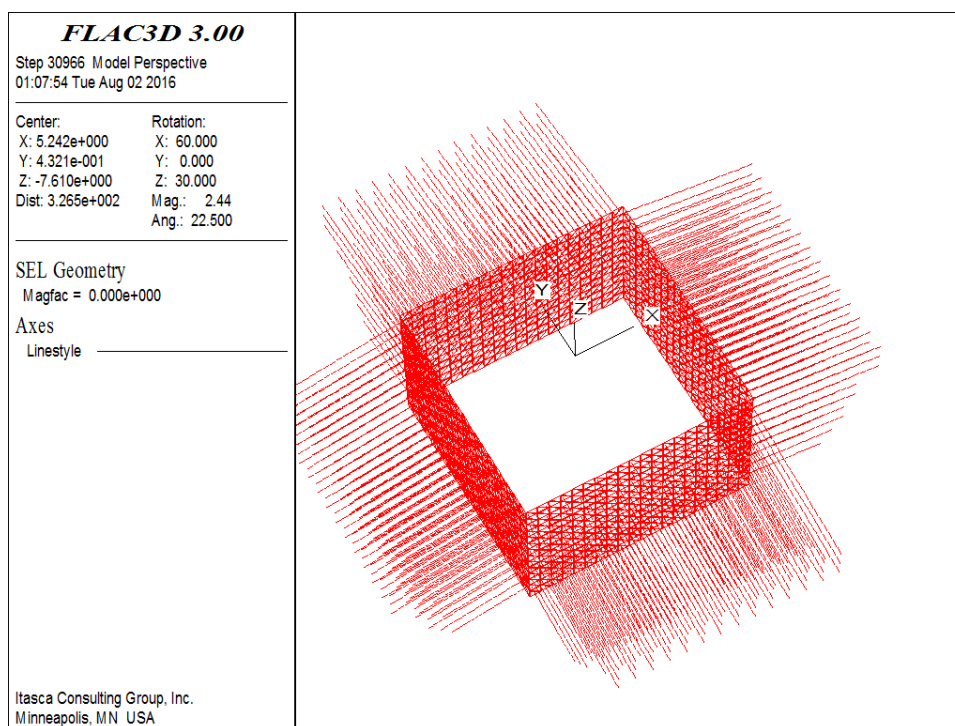
شکل ۴-۲۹: مدل سازی هندسی در نرم افزار فلک ۳ بعدی

این شکل کنتور جابجایی کلی را نشان می دهد مقدار ۶ سانتی متر در کف به علت بالا آمدگی کف می باشد.



شکل ۴-۳: مدل سازی هندسی در نرم افزار فلک ۳ بعدی

این شکل نیروی محوری در نیل ها را نشان می دهد. همانطور که مشخص است حداکثر مقدار برابر با ۱۶۰ کیلو پاسکال می باشد که با توجه به مشخصات میگرد $\varnothing 32, AIII$ مقدار تنش تسلیم برابر با $F_Y = A_s * 420 = 337 KPa$ می باشد در نتیجه مقدار فاکتور ایمنی برابر با $FS_s = \frac{337}{160} = 2.1$ خواهد شد که بیشتر از مقدار مجاز $1/8$ می باشد و بنابراین نیلها دچار گسیختگی کششی نخواهند شد.



شکل ۴-۳: مدل سازی هندسی در نرم افزار فلک ۳ بعدی

در این تصویر به منظور دید بهتر شاتکریت و نیل در انتهای حفاری نشان داده شده است.

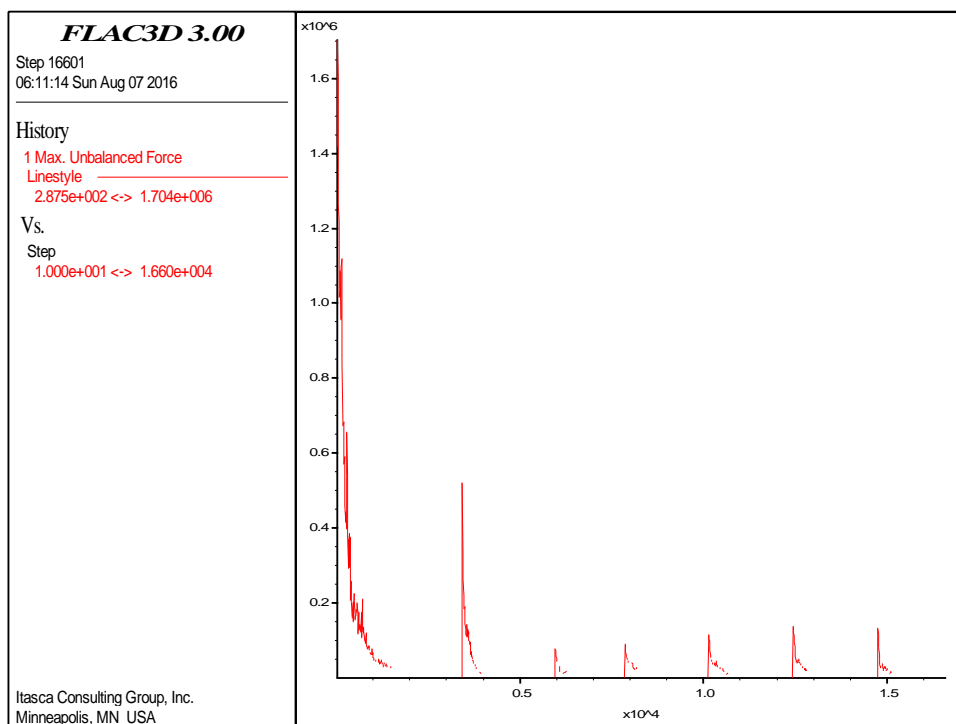
مشخصات مورد نیاز برای المان کابل شامل مدول یانگ (e)، مقاومت چسبندگی دوغاب (S_{bond})، سختی برشی واحد طول دوغاب (K_{bond})، سطح مقطع کابل (area)، مقاومت تسلیم فشاری (ycomp) و مقاومت تسلیم کششی (yield) می باشد. سختی برشی واحد طول دوغاب و مقاومت چسبندگی دوغاب معمولاً از طریق آزمایش کشش مستقیم (pull-out tests) بدست می آید و در صورت نبود این آزمایش از طریق فرمول های زیر محاسبه می شوند.

$$K_{bond} = \frac{2\pi G}{10 \ln(1 + 2t / D)}$$

که G مدول برشی دوغاب برابر با 6 GPa و D قطر کابل برابر با 32 mm و t ضخامت دوغاب اطراف تاندون که بطور متوسط برابر با 34 mm می باشد (با در نظر گرفتن قطر حفاری 100 میلی متر)

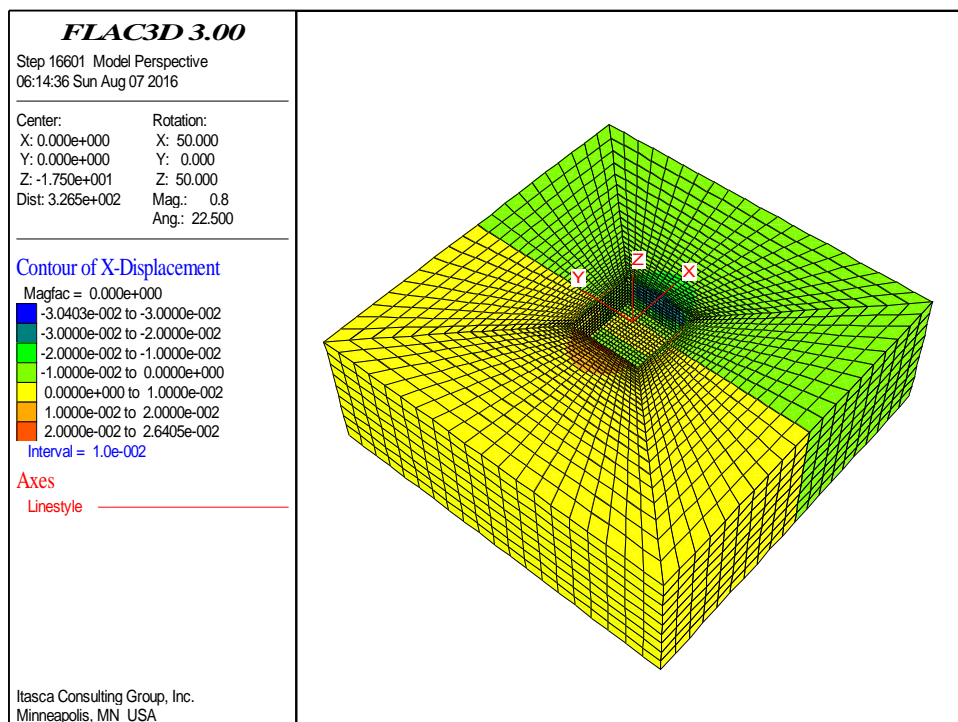
$$S_{bond} = \pi(D + 2t)\tau_{peak}$$

و مقدار τ_{peak} برابر با 250 کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است. بعد از انجام حفاری و نصب هر مرحله نیل و شاتکریت بعد از 5 مرحله حفاری تا عمق 9 متر خروجی ها بصورت زیر می باشد.



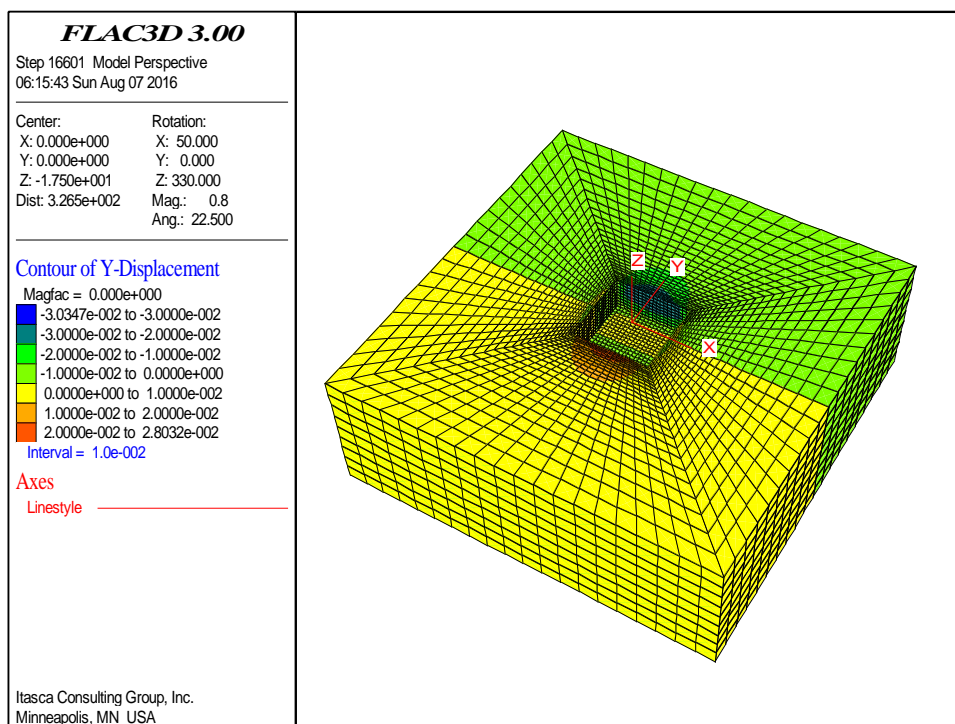
شکل ۴-۳۲: نیروهای نامتعادل کننده گری در انتهای تحلیل

همانطور که مشخص است نیروهای نامتعادل کننده به سمت صفر میل میکند که نشان دهنده به تعادل رسیدن محیط می باشد.



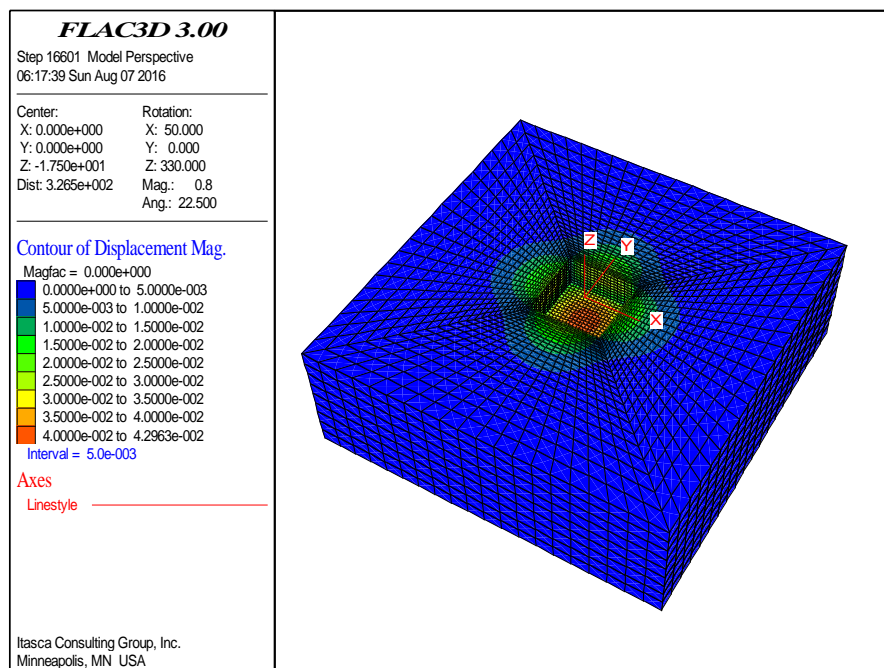
شکل ۴-۳: مدل سازی هندسی در نرم افزار فلک ۳ بعدی

این شکل کنتور جابجایی در جهت محور X را نشان می دهد که در همانطور که مشخص است جهت این محور (محور X) به سمت شمال می باشد و این کنتور جابجایی دیواره شمالی و جنوبی را نشان می دهد که حداکثر ۳ سانتی متر می باشد.



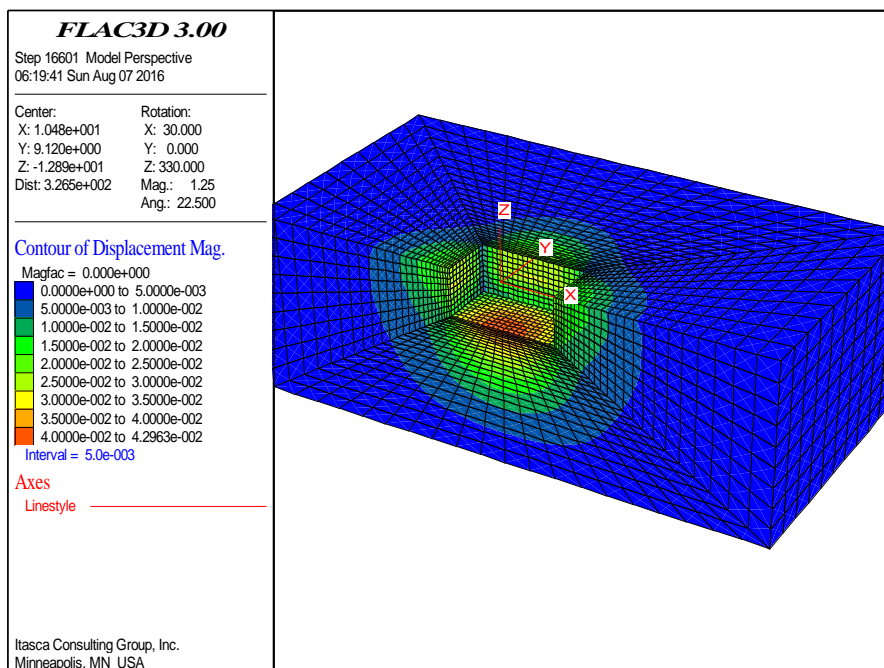
شکل ۴-۳۴: مدل سازی هندسی در نرم افزار فلک ۳ بعدی

این شکل کنتور جابجایی در جهت محور Y را نشان می دهد که در همانطور که مشخص است جهت این محور به سمت غرب می باشد و این کنتور جابجایی دیواره غربی و شرقی را نشان می دهد که حداکثر ۳ سانتی متر می باشد.



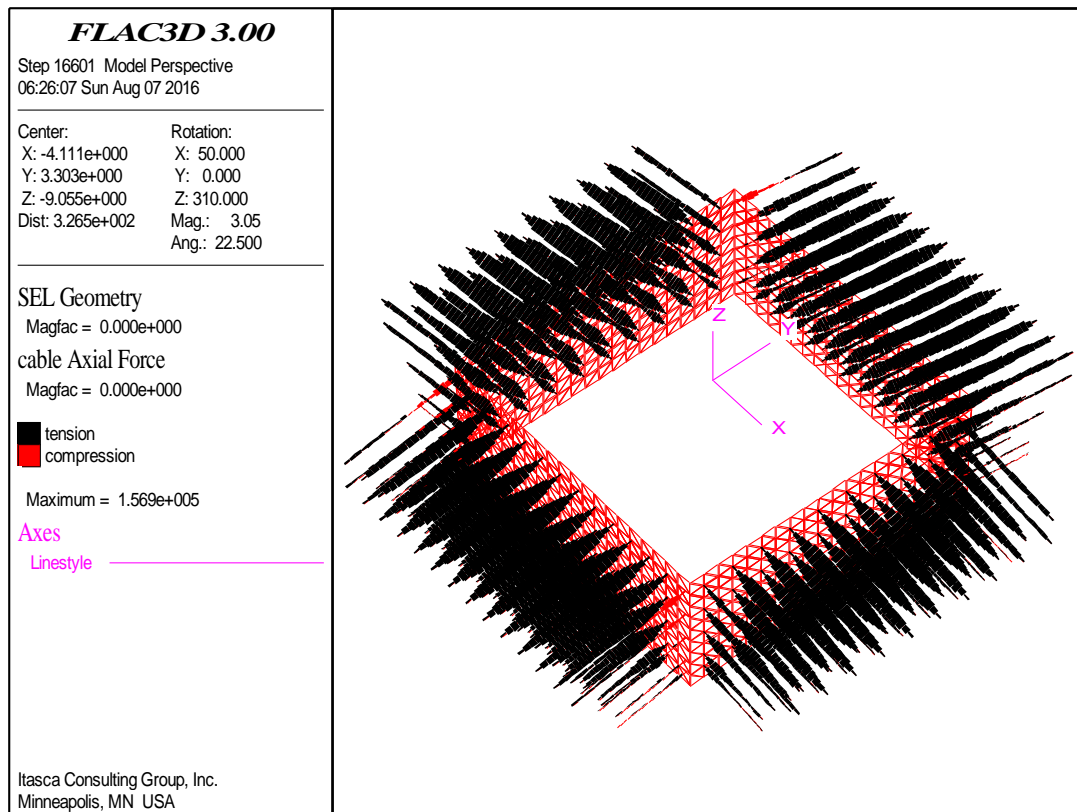
شکل ۴-۳۵: مدل سازی هندسی در نرم افزار فلک ۳ بعدی

این شکل کنتور جابجایی کلی را نشان می دهد مقدار ۴ سانتی متر در کف به علت بالا آمدگی کف می باشد.



شکل ۴-۳۶: مدل سازی هندسی در نرم افزار فلک ۳ بعدی

که به منظور دید بهتر از کنتور جابجایی کلی یک مقطع زده شده است که مقطع عمود بر ضلع شمال و جنوب می باشد و از وسط این دو ضلع عبور می کند.

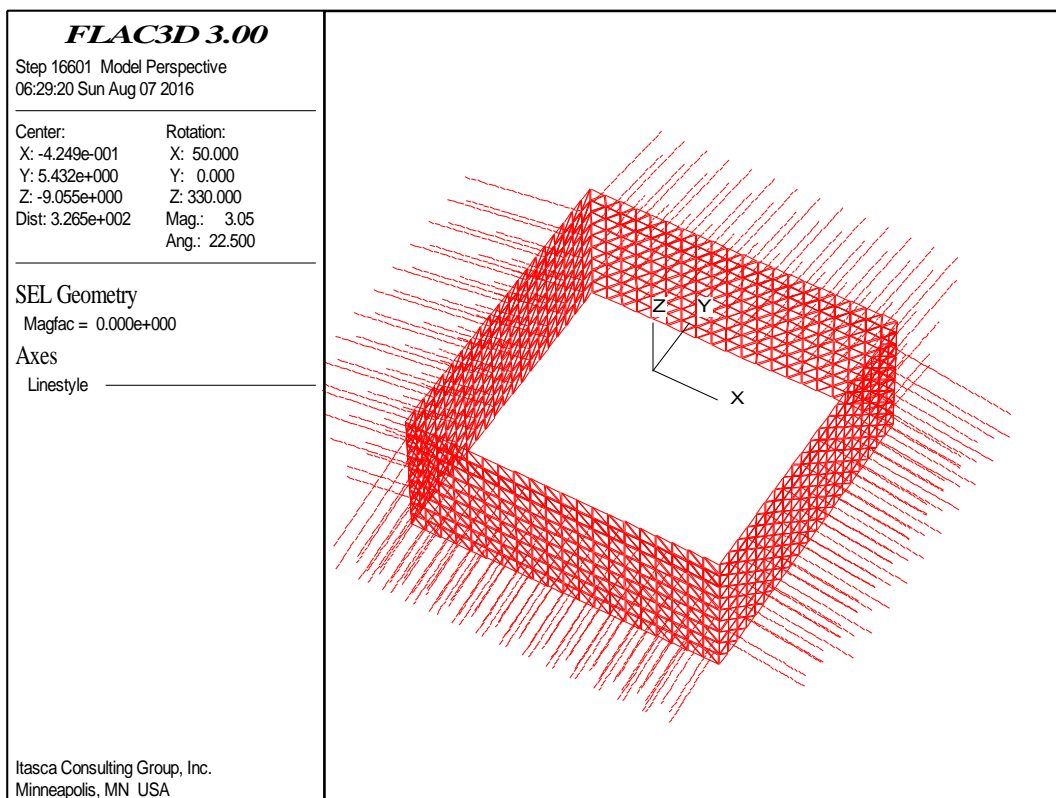


شکل ۴-۳: مدل سازی هندسی در نرم افزار فلک ۳ بعدی

این شکل نیروی محوری در نیل ها را نشان می دهد. همانطور که مشخص است حداکثر مقدار برابر با ۱۵۶ کیلونیوتن می باشد که با توجه به مشخصات میگرد $\varnothing 28, A_{III}$ مقدار تنش تسلیم برابر با

$$F_y = A_s * 420 = 259 \text{ KN} \quad \text{می باشد در نتیجه مقدار فاکتور ایمنی برابر با } FS_s = \frac{259}{156} = 1.66 \text{ خواهد}$$

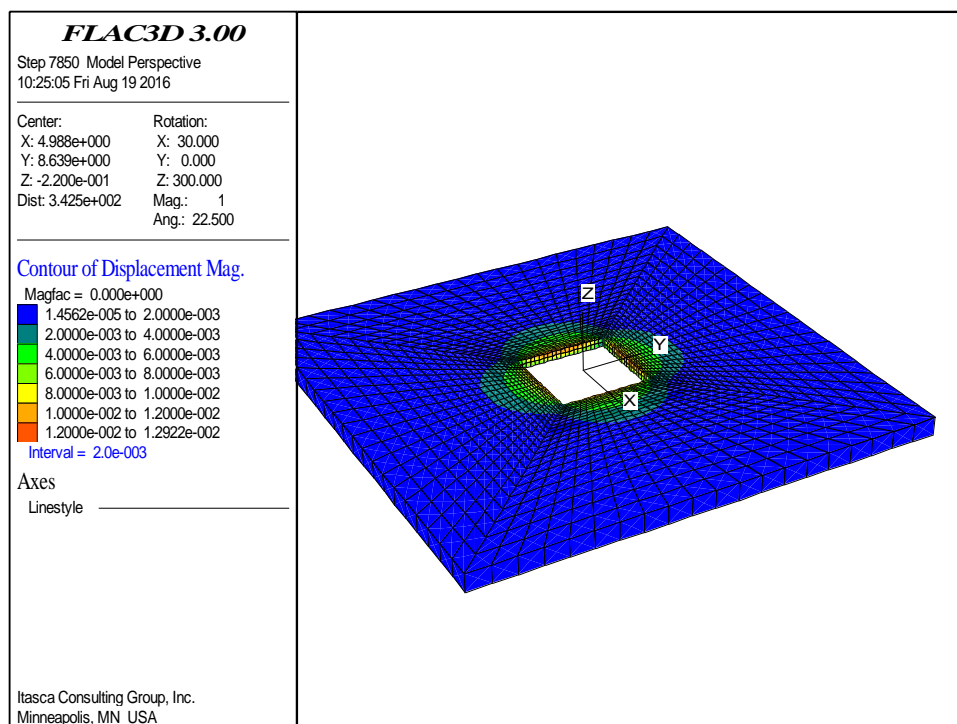
شد که بیشتر از مقدار $1/6$ ($0.6 F_y$) و تقریباً با مقدار مجاز $1/8$ اختلاف چندانی ندارد و بنابراین نیلها دچار گسیختگی کششی نخواهند شد.



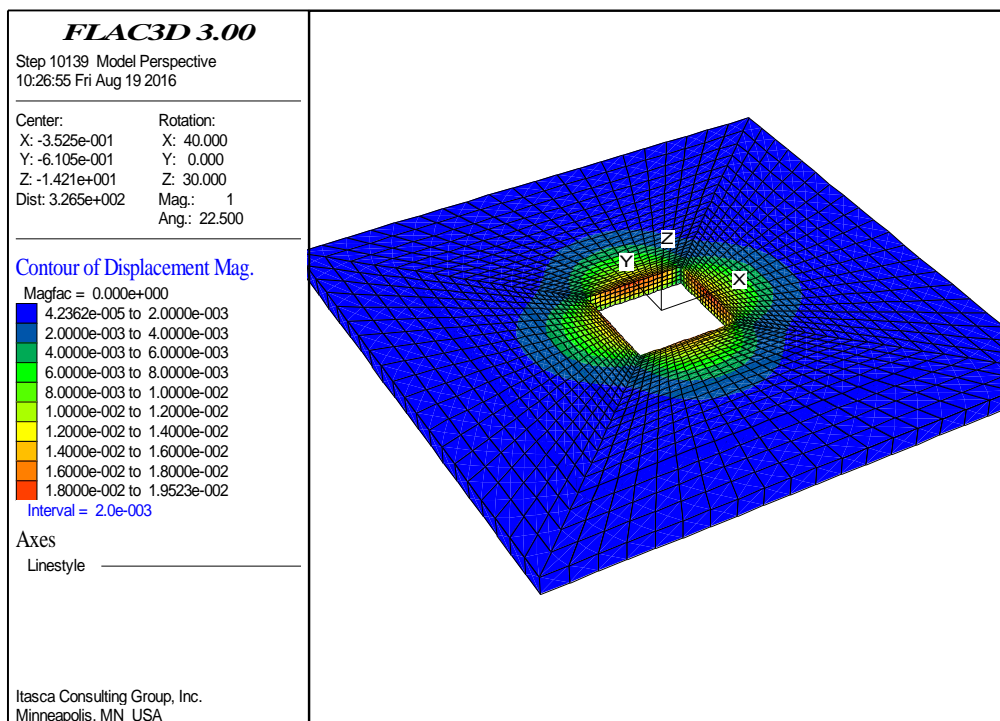
شکل ۴-۳۸: مدل سازی هندسی در نرم افزار فلک ۳ بعدی

در این تصویر به منظور دید بهتر شاتکریت و نیل در انتهای حفاری نشان داده شده است.

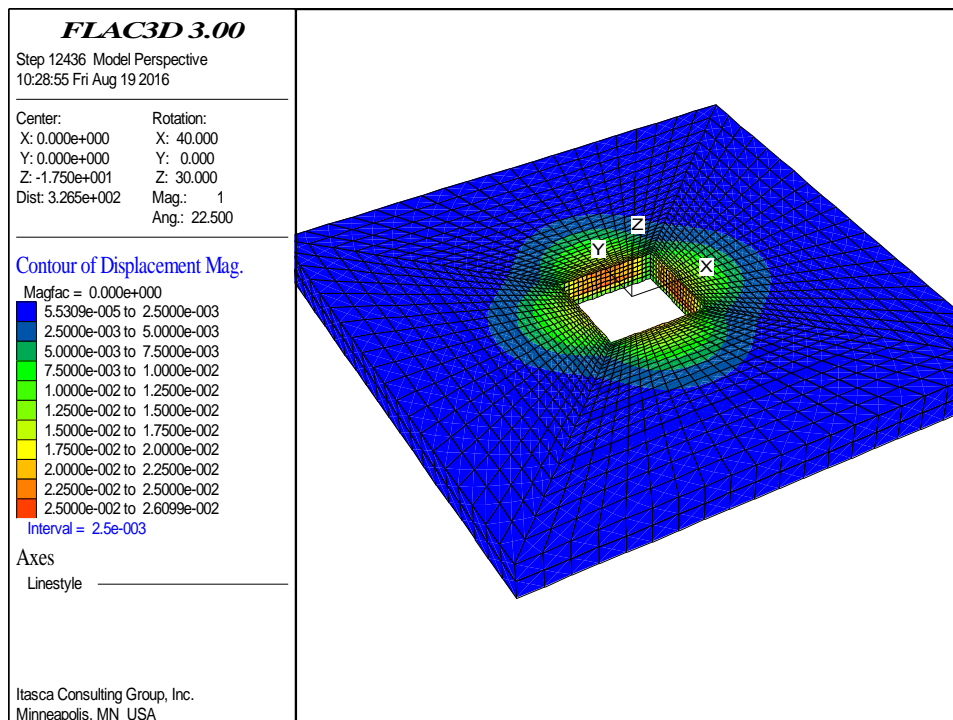
برای عمق ۹ متر بعد از هر مرحله حفاری پلات جابجایی کل گرفته شده است و در هر مرحله برای نمایش بهتر کف گود نشان داده نشده است (بدین صورت که دیواره گود تا سطح زمین نشان داده شده است و در هر پلات نسبت به پلات قبلی ارتفاع دیواره بیشتر می شود). اگر در این شکلها دقت شود ماگزیمم جابجایی در وسط هر دیواره اتفاق افتاده است و در گوشه ها کمترین جابجایی رخ داده است که به علت تاثیر سه بعدی مسئله و وجود دیواره های ضلع مجاور و تاثیر آرچینگ کلی در هر دیواره می باشد.



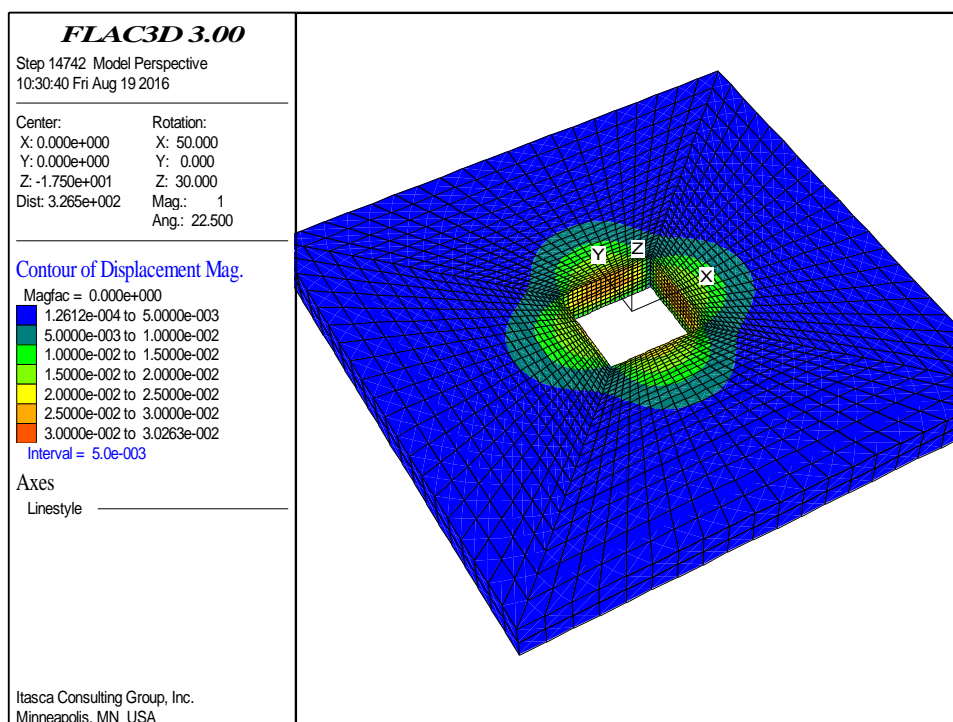
شکل ۴-۳۹: پلات جابجایی در عمق ۲ متر (کف گود نشان داده نشده است)



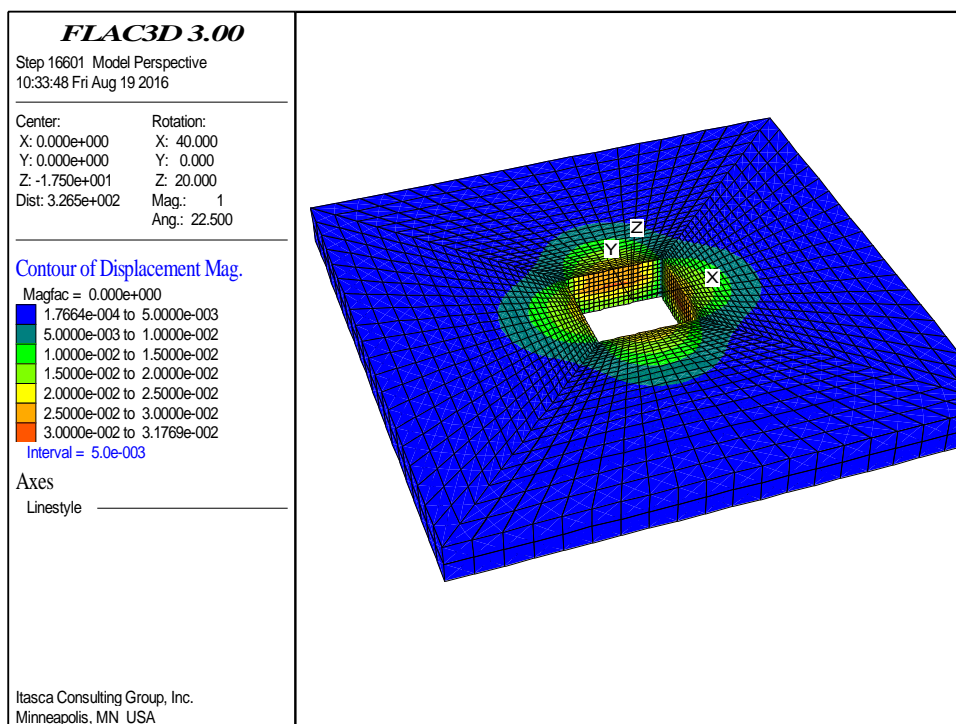
شکل ۴-۴۰: پلات جابجایی در عمق ۴ متر (کف گود نشان داده نشده است)



شکل ۴-۴۱: پلات جابجایی در عمق ۶ متر (کف گود نشان داده نشده است)

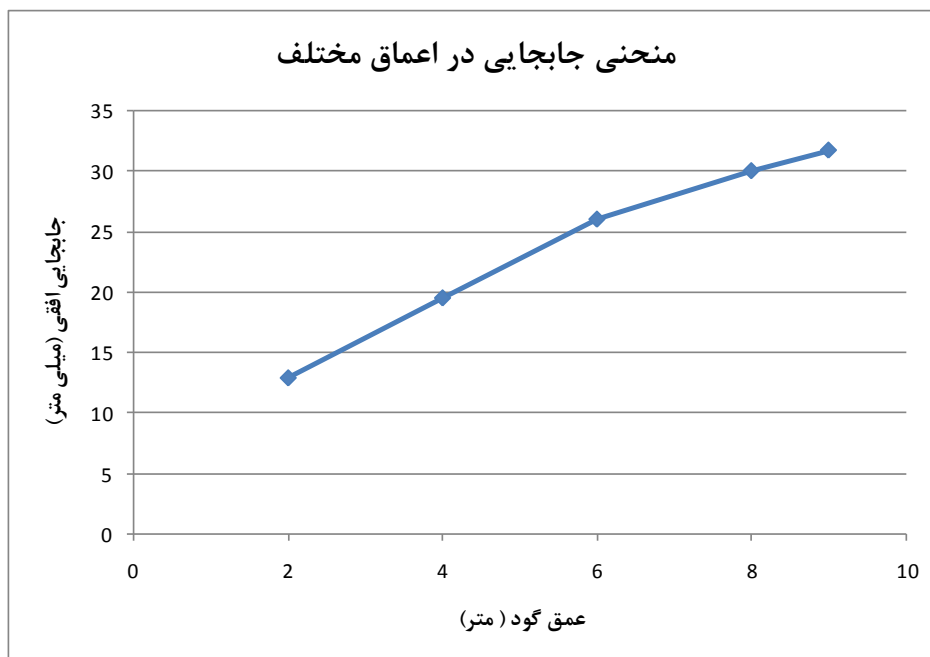


شکل ۴-۴۲: پلات جابجایی در عمق ۸ متر (کف گود نشان داده نشده است)



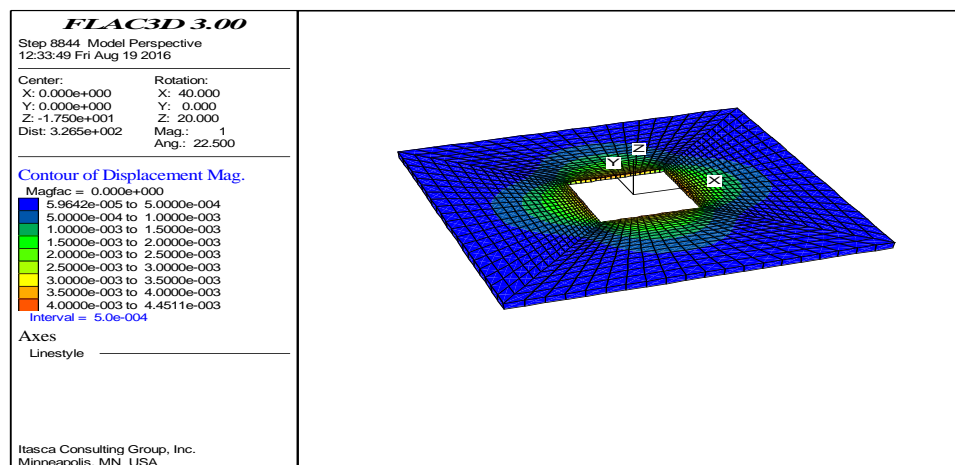
شکل ۴-۴۳: پلات جابجایی در عمق ۹ متر (کف گود نشان داده شده است)

نمودار جابجایی بر حسب عمق نیز بصورت زیر می باشد.

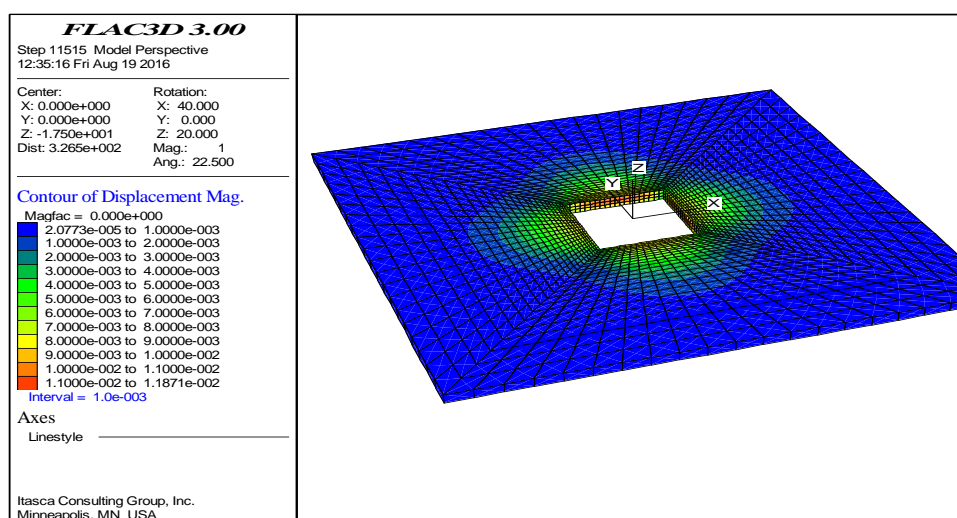


شکل ۴-۴۴:

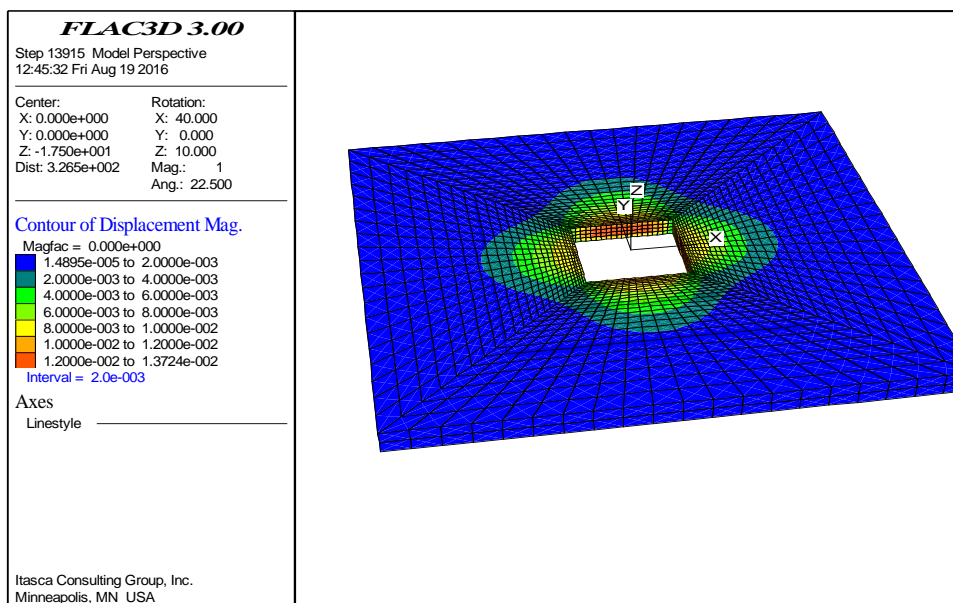
برای عمق ۱۴ متر بعد از هر مرحله حفاری پلات جابجایی کل گرفته شده است و در هر مرحله برای نمایش بهتر کف گود نشان داده نشده است. اگر در این شکلها دقت شود ماگزیمم جابجایی در وسط هر دیواره اتفاق افتاده است و در گوشه ها کمترین جابجایی رخ داده است که به علت تاثیر سه بعدی مسئله و وجود دیواره های ضلع مجاور و تاثیر آرچینگ کلی در هر دیواره می باشد.



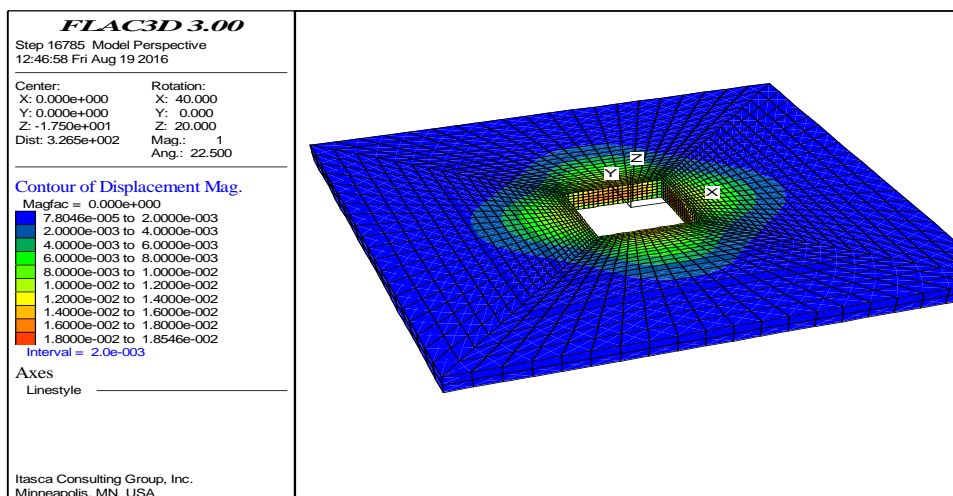
شکل ۴-۴۵: پلات جابجایی در عمق ۱ متر (کف گود نشان داده نشده است)



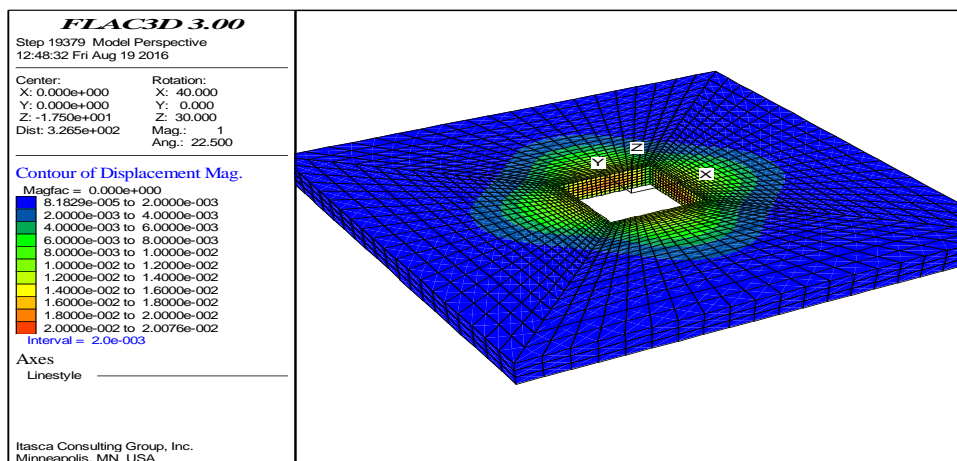
شکل ۴-۴۶: پلات جابجایی در عمق ۳ متر (کف گود نشان داده نشده است)



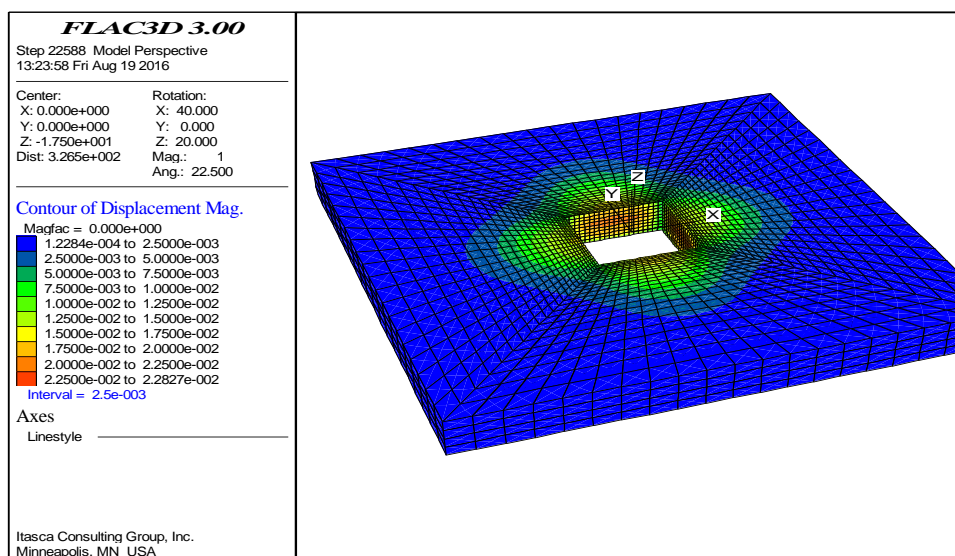
شکل ۴-۴۷: پلات جابجایی در عمق ۴ متر (کف گود نشان داده نشده است)



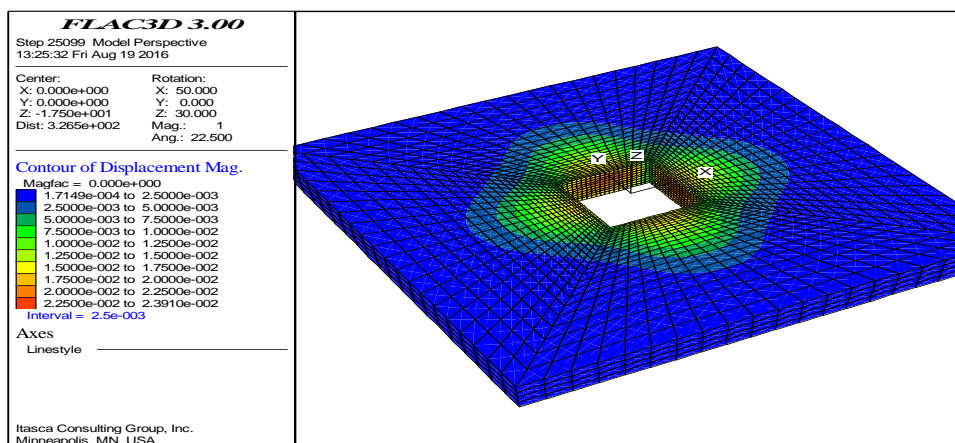
شکل ۴-۴۸: پلات جابجایی در عمق ۶ متر (کف گود نشان داده نشده است)



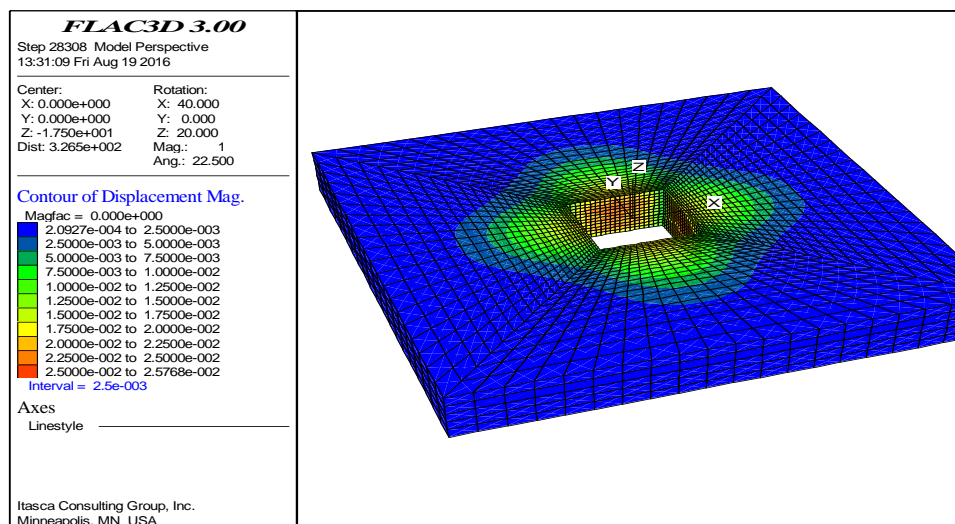
شکل ۴-۴۹: پلات جابجایی در عمق ۷ متر (کف گود نشان داده نشده است)



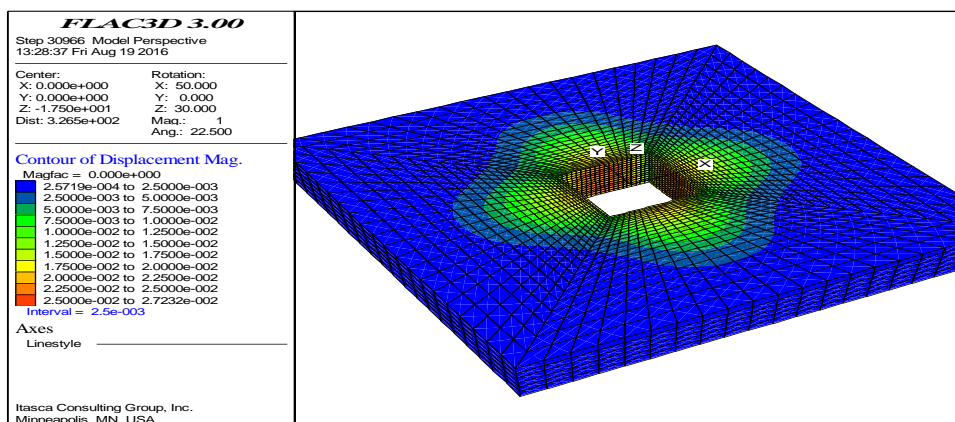
شکل ۴-۵۰: پلات جابجایی در عمق ۹ متر (کف گود نشان داده نشده است)



شکل ۴-۵۱: پلات جابجایی در عمق ۱۰ متر (کف گود نشان داده نشده است)



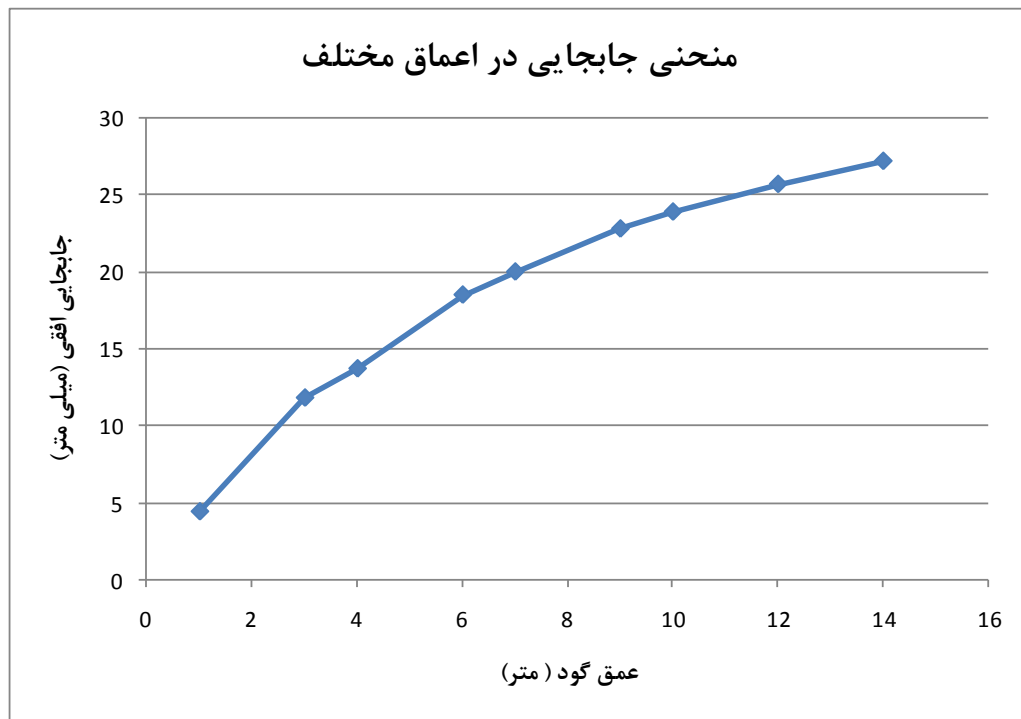
شکل ۴-۵۲: پلات جابجایی در عمق ۱۲ متر (کف گود نشان داده نشده است)



شکل ۴-۵۳: پلات جابجایی در عمق ۱۴ متر (کف گود نشان داده شده است)

همانطور که در این پلاتها مشخص می باشد تاثیر قوس شدگی (آرچینگ) بطور واضح دیده می شود و در گوشه ها مقدار جابجایی کمتر می باشد و در وسط دیواره برای هر ضلع، ماکزیمم مقدار جابجایی رخ داده است.

نمودار جابجایی بر حسب عمق نیز بصورت زیر می باشد.



شکل ۴-۵۴:

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادها

- ❖ برای جلوگیری از وقوع حوادثی مانند لغزش، رانش، سقوط توده های خاک و سنگ فرسوده شده، خزش نیاز شدید به پایدار سازی شیب ها و گودبرداری های حساس به وجود می آید
- ❖ مقایسه تحلیل نشان داد مدلسازی سه بعدی نتایج واقع گرایانه ای ارائه می دهد و به حالت موجود بارگذاری در محیط نزدیک تر می باشد.
- ❖ وجود سربار در ساختمان اطراف منجر به تغییر مقاومت پارامترهای خاک می شود. که در صورتی که این پارامتر ها را وابسته به سربار نکنیم نتایج قابل اطمینانی نخواهیم داشت.
- ❖ می توان نتیجه گرفت نرم افزار پلکسیس نسبت به فلک دو بعدی محافظه کارانه تر عمل می کند و فلک سه بعدی به طراحی دقیق تری می رسد.
- ❖ از جمله ابهامات مدل دو بعدی هندسه بار گذاری در محل ایجاد شده است

۵-۲- پیشنهادها برای ادامه تحقیق

۱. بررسی و تحلیل در زمین های دوزنقه ای در حایت سه بعدی
۲. بررسی فاصله و مکان قرار گیری بار بر روی جا بجایی ها
۳. تحلیل و مدل سازی سه بعدی انکراژ گود و مقایسه نتایج با مدل سازی
۴. انجام تحلیل بر اساس مدل خاک سخت شونده و مقایسه نتایج با مدل موهر-کلمب
۵. ارایه تحلیلی در تاثیر فاصله نیل و طول ان بر یکدیگر و بهینه نمودن این نسبت
۶. بررسی اثر آب زیرزمینی در سطوح مختلف خاک در سیستم
۷. بررسی اثر سربار و فاصله آن از دیواره گود در سازه نگهبان
۸. بررسی سیستم ترکیبی در خاک چندلایه
۹. انجام تحلیل سازه نگهبان خرپایی
۱۰. امکان سنجی اجرای سازه با پایل ها در خاک های مسئله دار
۱۱. بررسی زوایای متفاوت میخ ها در سازه نگهبان
۱۲. بررسی فشار وارد بر هر نیل با توجه به فاصله از بارگذاری متمرکز

منابع فارسی

۱. بهنیا، کامبیز، " مکانیک خاک جلدو مهندسی پی " انتشارات دانشگاه تهران . (۱۳۸۶)
۲. شرق-علی، تحلیل خاکریزهای مسلح شده با ژئوتکستایل روی بستر رسی نرم با استفاده از مدل سازی عددی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شریف، ۱۳۸۱.
۳. طهرانی-حسن، طراحی سیستم های میخ کوبی خاک به روش آنالیز حدی و بررسی روش های اجرا، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، ۱۳۷۹.
۴. کمری-میرجلال، بررسی شیب های خاکی مهار شده با میخ کوبی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شیراز ۱۳۸۰.
۵. کاشفی-جواد، مطالعه پایداری شیروانی های خاک مسلح با ژئوتکستایل به روش اجزا محدود، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه امیر کبیر ۱۳۸۲.
۶. کاربر-لیلا، تحلیل دیوارهای میخ کوبی شده تحت بار زلزله، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۱.

منابع لاتین

1. Barley, A. D, Soil nailing case histories and development Retaining Structures, Thomas Telford, pp-559-573,1993.
2. Basset, R. and Last , Reinforcing Earth below footing and Embankment symposium on Earth Reinforcement , ASCE Annual Convention , Pittsburgh, 1984.

3. Bruce ,D A., Soil Nailing the Second Decade Nicholson Construction Company, 1987.
4. Cartter G. and Gigan I.P, Experiments and observation on soil nailing structure proceeding of the VIII. Conference of E.C.M.F.E, Helsinki,1983.
5. Carlos A.Lazret, Victor Elias, David Espinoza, Paul J,M,. Sabatini, Geotechnical engineering Circular, No.7 Soil Walls, FHWA0 IF-03-017,2003.
6. Carlos A. Lazarte , Victor Elias , Geotechnical Engineering Circular Soil Nail Walls,. FHWA0-IF-03-017 NO. 7. 2003.
7. Chen. Choa, L, Juran I., Strain Compatibility design method for reinforced Earth walls, Jurnal of Geotechnical Engineering Vol. 115, No 4,1989.
8. Cheuk C.Y., H.W. Sun, Numerical experiments of soil nails in loose fill slopes subjected to rainfall infiltration effects, Computers and Geotechnics 32 ,290–303(2005).
9. Clouterre, French National Research Project Clouterre, 1990.
10. Clough G.W., and Tsui , Y., Performance ot tied-back walls in clay Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 100, No. GT-12.pp.1259-1273, 1974.
11. Demonstration project 103-Design and Construction Monitoring of soil Nail walls, Federal Highway Administration, Publication No FHWA-IF-99-026.
12. Dsi-Lang geotech llc, Retaining Wall at Dallas/Fort Worth International Airport, TX Secured with Dywidag Soil Nail, 1966.
13. Fang, H, Foundation Engineering Handbook,2nd Edition, Chapman&Hall, pp.868-905,1992.

14. French national research, Recommendations Clouterre, Federal Highway Administration, 1992.
15. Gudehus G. and Gassler, F., Soil Nailing some aspect of new technique Proceeding of the X Conference of the I.C.S.M.F.E, Stockholm, 1981.
16. Guilloux , A and Schlosser, F., Soil Nailing Practical Application Proceeding of the symposium on Soil and Rock Improvement Technique, 1984.
17. Itasca Consulting Group, Inc. 2004-2009 “Flac version 5 and 7 manual” .
18. Jewell , R.A. and Pedley M.J. Analysis for Soil Reinforcement with Bending Stiffness , Journal of Geotechnical Engineering Vol. 118, No. 10 ,pp.1505-1527,1991.
19. *Juran, I., Baudrand, G., Farrag K. and Elias, V. Design of soil Nailed Retaining structures, Design and Performance of Earth Retaining Structures Geotechnical Special Publication, No 25,ASCE,pp.644-695-1990.
20. Juran, I., Budrand , G., Farrag, K. and Ellas V., Kinematical limit analysis approach for nailed soil retaining structure Proceeding of international geotechnical symposium on theory and practice of Earth reinforcement, Fukuoka, Kyosho, Japan, 1988.
21. Juran, I. Elias, V., Soil Nailed Retaining Structure, Analysis of case histories ASEC, Special Geotechnical Publication No. 12,1987.
22. Juran, I., Shafee, S. and Schlosser, F., Numerical study of nailed soil retaining structure, Proceeding of the 11 international Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering , San Fransisco, 1985.

23. Juran, I., Reinforced soil system Application in Retaining Structures Geotechnical Engineering, Vol 16,1985.
24. Kim, J.S.& Lee S.R., Analysis of soil nailed Earth Slope by Discrete Element –Method, Computers and Geotechnics , Vol 20,No .1 , pp-1-14,1997.
25. Lee, K.L, Adams, B. and Vangeron. J.M, Reinforced Earth Retaining Walls, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, Proc. ASCE. Vol. 99,1997.
26. Louis C,. Theory and practice in soil nailing temporary or permanent works, ASCE Annual Conference, Boston, 1986.
27. Manual for Design and Construction Monitoring of Soil Nail Walls, Federal Highway Administration , Publication No. FHWA-SA-96-069.
28. Ngo. T , Mendis. P , A. Gupta , Ramsay. J , “ Blast Loading and Blast Effects on Structures – An Overview “ , The University of Melbourne, Australia , EJSE Special Issue: Loading on Structures (2007) , pp.76-91.
29. Pfister, P.etal., Permanent Ground Anchors Soletanche Design Criteria Federal Highway Administration, Report No. FHWA-R-D-81-150,1982.
30. Phi Group, Retaining Structures Soil Nailing and Facing Systems.
31. Shen, C. K., Bang, S., Romstad, K. M., Kulchin, L and Dentable, J. S., Field Measurement of an Earth Support System , Journal of Geotechnical Engineering Div., ASCE Vol. 107 , No. 12,pp. 1625-1642, 1981.
32. Soil Nailing , ISSMEF-TC-17,pp.1-13.

33. Sivakumar Babu, G.L., Vikas Pratap,. “NUMERICAL ANALYSIS OF PERFORMANCE OF SOIL NAIL WALLS IN SEISMIC CONDITIONS” ISET Journal of Earthquake Technology, No. 496, Vol. 45, 31–40, (2008).
34. Terzaghi, K. and Peck, R. B., Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley and Sons Inc., New York, 1984.
35. Terzaghi, K. and Theoretical Soil Mechanics John Wiley and Sons Inc., New York , N.Y , 1943.
36. Thompson ,S.R. and Miller, I. R, Design, Construction and performance of a Soil Nailed Wall in Seattle, Washington, Design and performance of Earth Retaining structure, Geotechnical Special Publication, No 25,ASCE,pp.629-643,1990.

Soil as construction material in various projects as well as support for foundations used.

Civil engineers trying to improve the soil strength using mechanical methods to improve and stabilize or using reinforcement techniques.

One of these methods that improve soil behavior is soil nailing.

So far, various materials such as glass fibers (fiberglass) used in polyester resins, inert metals such as aluminum or stainless steel, zinc plated steel (galvanized) and polymer such as geotextiles, geogrid, geocomposite, coated fabrics, tapes, rigid plastics and elastomers has been worn for this purpose. Various methods are used for stabilization area of nailing method, of which more applications.

In this study we tried this method and wished for better , safer and less expensive to stabilize the soil to replace the old methods.

The aim of this study is to deepen stable supply of optimized supporting structures is by creating a layout that is optimized angle and length to given nails to prevent a deep rupture and deformation, that modeling is performed by Plaxis and Flac softwares. To do so we modeled in these two numerical method software .We tried modeling of nails in 2D models in Plaxis and 2D and 3D models in Flac and compare the results of these models.

In this study, transformation and stability, and retaining structures at depths of 9 and 14 meters in nailing two layers of soil conditions and the state of implementation of nails at an angle of 10 degrees and with varying lengths investigated.



Kharazmi International Campus

M.Sc. Thesis in Geotechnical Engineering

Design of retaining structural excavation to combination method nailing
and anchor by numerical methods

By:

Mohamad Mir Mohamad Madi

Supervisors:

Dr.M.Hoseini

September 2016