



مدلسازی سه بعدی گودهای میخکوبی شده با توجه به اثر سربار اعمالی و اندرکنش خاک و میخ

سعید هاشمی^۱، جعفر بلوری بزاز^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی، گروه عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

saeed_hashemi1986@yahoo.com

bolouri@um.ac.ir

خلاصه

یکی از مسائل مهم مهندسی عمران در مناطق شهری، پایدارسازی جداره های قائم و شیبدار خاکی است. از روش های نسبتاً جدید که روز به روز در محیط های شهری داخل و خارج کشور به منظور پایدارسازی گودها رواج پیدا نموده است، روش میخکوبی می باشد. چال های حفاری معمولی تحت اثر بارهای وارده، حتی در اعماق کم، بارها ریزش نموده و از سرعت کار کاسته شده و تلفات جانی و هزینه های اقتصادی غیر قابل پیش بینی را موجب شده است. علاوه بر آن ریزش چال های حفاری از سوی دیگر موجبات سستی خاک و از دست دادن تراکم آن را فراهم می سازد که به طبع آن باعث تحمیل تغییر شکل بیشتر افقی و عمودی در سطح زمین می شود. این تحقیق ضمن معرفی این مشکل در گودبرداری های عمیق، با مدل سازی عددی بوسیله نرم افزار المان محدود Plaxis 3D Foundation، به بررسی چگونگی تاثیر میزان سربار بر رفتار گودها و پایداری چال های حفاری می پردازد.

کلمات کلیدی: گودبرداری، سربار، میخکوبی، اندرکنش خاک و میخ، Plaxis 3D Foundation

۱. مقدمه

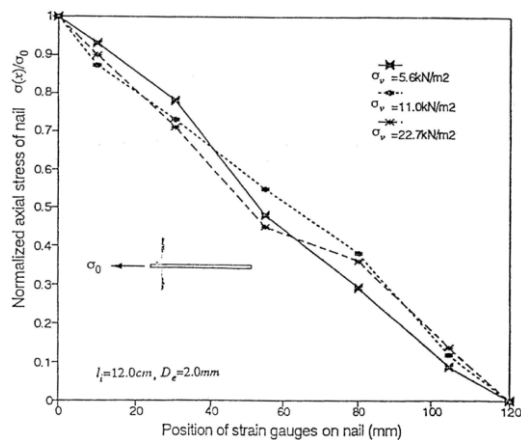
با رشد روز افزون جمعیت و کمبود فضای شهری مناسب جهت ساخت و سازها تمایل به ساخت ساختمان های بلند مرتبه افزایش یافته که این امر به نوبه خود نیاز به گودبرداری را افزایش داده است که برای پایدارسازی آن ها روش های متفاوتی پیشنهاد می شود. یکی از این روش ها که امروزه کاربرد فراوانی دارد، روش پایدارسازی توسط سیستم میخ کوبی می باشد. در این روش جداره های خاکی ناپایدار ناشی از گودبرداری با استفاده از شبکه ای از میلگردهای فولادی که تا عمق مشخصی در خاک فرو رفته و در پوششی از دوغاب سیمان قرار دارد، پایدار می شود. امروزه روش میخکوبی خاک (Soil nailing) بعنوان یکی از سازه های حائل دیواره گود، جایگزین سازه های متداول شده است. پایدارسازی در روش میخ کوبی به این صورت است که ابتدا میخ هایی (آرماتور) درون دیواره گود قرار گرفته و سپس عملیات تزریق در اطراف میخ ها انجام می شود. برتری های این روش نظیر سرعت و سهولت انجام کار و هزینه اقتصادی کم، آن را بعنوان یکی از روش های برتر در حفاظت دیواره گودبرداری ها مطرح نموده است. صرف نظر از مشکلاتی که این روش در پایداری بعضی از خاک ها نظیر رس اشباع عادی تحکیم یافته با آن مواجه است، ملاحظات اجرایی آن در برابر خاک های با چسبندگی و تراکم کم باید مد نظر قرار گیرد. در تحقیق حاضر برای مدل کردن میخ ها از نرم افزار جزء محدود Plaxis 3D Foundation استفاده گردیده است. سربارهای مختلف بر مدل ها اعمال گردیده و در نهایت اثر تغییرات سربار و وزن مخصوص خاک با توجه به اندرکنش خاک و میخ به صورت نمودار ارائه شده و سرانجام به تحلیل نمودارها و ارائه نتایج صورت گرفته است.

۲. تاریخچه میخ کوبی و مطالعات صورت گرفته بر مدل سازی عددی بیرون کشیدگی میخ

روش میخ کوبی خاک برگرفته از روش تونل سازی جدید اتریشی NATM که ترکیبی از شاتکریت مسلح و پیچ مهار برای ایجاد یک محافظ انعطاف پذیر در ساخت حفاری های زیرزمینی است می باشد [۱]. این روش اولین بار در آمریکای شمالی در اواخر دهه ۱۹۶۰ و نیز در کانادا برای حفاظت گودبرداری های موقتی ساختمان های صنعتی و مسکونی بکار رفت.

نخستین پروژه تحقیقاتی بر روی میخ کوبی خاک در آلمان، با همکاری دانشگاه کارلسروهه و شرکت پیمانکاری بانر طی سال های ۱۹۷۵-۱۹۸۱ انجام گرفت. این پروژه شامل آزمایش بر روی سازه های میخ کوبی شده تمام مقیاس با میخ های تزریق شده بود که با افزایش سربار در بالای دیوار تا حد گسیختگی بارگذاری می شد [۲-۳].

روش میخ کوبی اولین بار در کشور هنگ کنگ در سال ۱۹۸۰ مطرح شد. این روش میخ کوبی در پایدار سازی گود، هم اکنون نیز در این کشور کاربرد فراوانی دارد [۴]. در این تحقیق یک سری آزمایش های بیرون کشیدگی میخ در سه نوع ماسه که داخل جعبه ای به طول، عرض و ارتفاع ۲۵۴، ۱۵۳ و ۲۰۲ میلی متر مطابق شکل (۱) ریخته شده بود انجام گردید [۵]. همانگونه که در شکل (۲) نشان داده شده، بیشترین نیروی بیرون کشیدگی با مقاومت برشی خاک افزایش می یابد. بر اساس اطلاعات بدست آمده از کرنش سنج، مشاهده شده که تنش محوری در میخ سخت تقریباً به طور خطی در طول میخ توزیع شده است. همچنین نتایج نشان داد که هر چقدر سختی نسبی بین خاک و میخ افزایش یابد، توزیع تنش محوری به توزیع خطی نزدیکتر و توزیع تنش برشی یکنواخت تر خواهد شد. همان طور که انتظار می رود برای میخ های سخت با سطح صاف، بیشترین نیروی بیرون کشیدگی کمتر از نیروی بیرون کشیدگی ماکزیمم در میخ سخت با سطح زبر است. در میخ های انعطاف پذیر، بیشترین نیروی بیرون کشیدگی کمتر از حالت میخ های سخت بوده و به نظر می رسد متناسب با طول میخ ها نمی باشد.



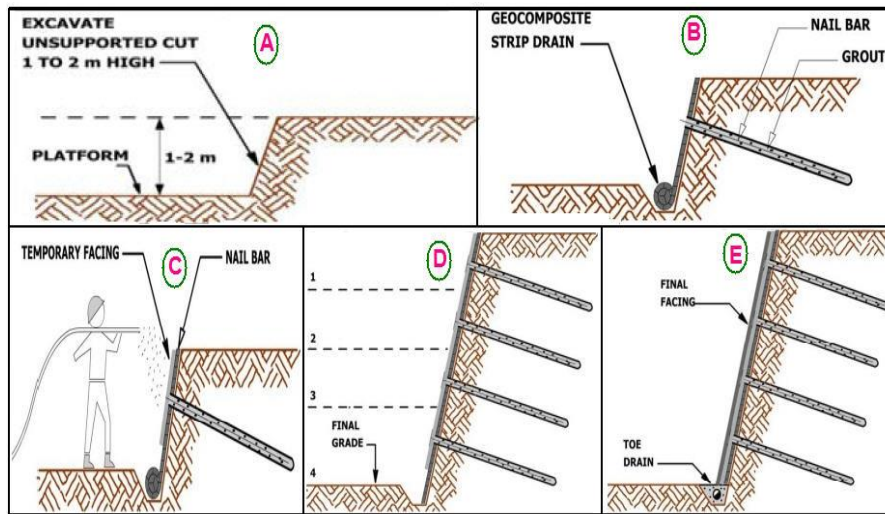
شکل (۲): توزیع تنش محوری در طول میخ [۵].



شکل (۱): جعبه بیرون کشیدگی میخ [۶].

۳. میخ کوبی

این روش شامل یک شیب میخ کوبی شده متشکل از سه بخش توده خاک، تسلیح کننده ها و رخیوش شیب می باشد. تسلیح کننده ها باعث افزایش مقاومت و سختی توده خاک شده و در برابر تنش های جانبی ناشی از سربار و یا وزن توده خاک مقاومت می نمایند و به این وسیله موجب پایداری شیب می گردند [۷]. تحلیل های عددی انجام گرفته نشان می دهد که رفتار شیب میخ کوبی شده بیش از اینکه وابسته به شرایط انتهایی تسلیح کننده ها باشد به مشخصات سطح تماس تسلیح کننده و خاک اطراف آن بستگی دارد [۸]. میخکوبی خاک در طیف وسیعی از خاک ها شامل رس، ماسه، سنگ های هوازده، نیم رخ شیب های هوازده، خاک های لایه ای و ناهمگن امکان پذیر می باشد. ولی انجام این روش در رس های نرم و پلاستیک، خاک های با دانسیته پائین و یا اشباع توصیه نمی شود [۹]. شکل (۳) گودبرداری مرحله به مرحله و اجرای میخکوبی را نشان می دهد.



شکل (۳): مراحل اجرای میخکوبی

تسلیح فولادی شامل سیستم مش بندی شده از سیم های به هم جوش خورده است. طول پانل های شبکه فولادی جوش خورده باید به اندازه ای باشد که هر پانل با پانل کناری تا اندازه ای همپوشانی داشته باشد. در این مرحله لایه نازک بتن شاتکریت بر روی سطح گود پاشیده می شود. بعد از آن یک صفحه (پلیت فولادی) بر روی نوک میخ کار گذاشته می شود. از واشر و مهره های شش گوش برای اتصال میخ به صفحه استفاده می شود. توجه شود که مدت ۷۲ ساعت لازم است تا بتن شاتکریت به مقاومت ۳ روزه با مقدار تقریبی ۱۰/۵ مگاپاسکال برسد و بعد گودبرداری مرحله بعد انجام شود [۲].

۴. مقاومت چسبندگی بین خاک و ملات در دیوارهای میخ کوبی شده

ظرفیت بیرون کشیدگی میخ یک عامل مهم در تحلیل و طراحی دیوارهای میخ کوبی شده می باشد، که به دو عامل اصلی اندازه مجموعه میخ و مقاومت چسبندگی^۱ 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 نمی توان 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 می گردد (با توجه به شرایط میدانی و شرایط خاک) و سپس به وسیله آزمایش بیرون کشیدگی^۲ در طی ساخت اصلاح می شود [۱۰].

۱.۴. تاثیر شرایط خاک مقاومت بیرون کشیدگی میخ

ویژگی هایی از خاک که روی مقاومت بیرون کشیدگی اثر می گذارند شامل مقاومت، اندازه ذرات، اتساع و درجه اشباع خاک می باشند. یکی از مهم ترین پارامترهای تاثیرگذار بر مقاومت بیرون کشیدگی میخ، خاک اطراف میخ می باشد. 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 [۱۱]. اندازه و شکل ذرات که بستگی به اتساع خاک دارند، به طور عمده روی رفتار بیرون کشیدگی و مقاومت بیرون کشیدگی موثرند. برای خاک هایی که دارای ذرات بزرگ تر و یکنواخت تر با اشکال نامنظم هستند، هنگام بیرون کشیدن میخ ذرات چرخیده و تغییر آرایش داده که منجر به اتساع خاک می شود. اگر اتساع خاک محدود شود، افزایش تنش قائم نتیجه می شود که آن نیز منجر به افزایش مقاومت بیرون کشیدگی می شود [۱۲]. به مطالعه تاثیر اتساع روی مقاومت بیرون کشیدگی پرداخت. یک درجه اشباع متوسط خاک می تواند برای مقاومت بیرون کشیدگی مفید باشد. خاک خیلی خشک یا خیلی خیس خوب نمی باشد [۱۳ و ۱۴].

1. Bond Strength

2. Pullout Test

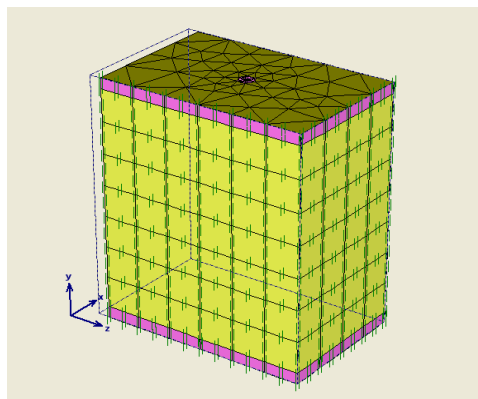
۵. نرم افزار Plaxis 3D Foundation

در تحلیل دو بعدی امکان انتخاب دو نوع عنصر ۶ گره‌ای و ۱۵ گره‌ای مثلثی در تحلیل‌ها وجود دارد. عنصر پیش فرض در این نرم افزار المان ۶ گره‌ای می‌باشد. برای دستیابی به دقت بیشتر در محاسبات تنش‌ها و بار و گسیختگی (خصوصاً در هندسه) از ۱۵ گره‌ای استفاده می‌شود. در پیش فرض تابع تقریب جابجایی المان‌ها از مرتبه دوم در نظر گرفته شده است. ماتریس سختی این نوع المان‌ها با استفاده از سه نقطه تنش حاصل می‌شود. در المان‌های ۱۵ گره‌ای مثلثی، تابع تقریب جابجایی از مرتبه چهارم و نقاط تنش آن به منظور تعیین ماتریس سختی ۱۲ نقطه در نظر گرفته شده است. این نوع المان در آنالیزهای دقیق مهندسی بکار می‌رود و برای انجام آنالیزها توسط آن نیاز به حافظه بیشتری از کامپیوتر بوده و وقت بیشتری برای تحلیل نیاز دارد.

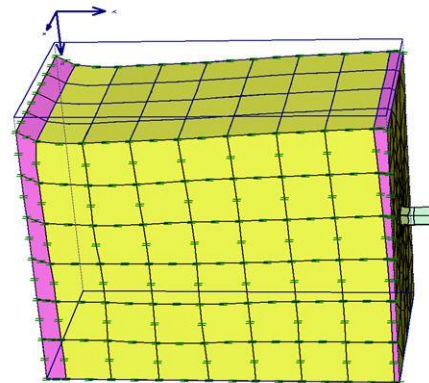
در نرم افزار Plaxis 3D Foundation می‌توان برای محاسبه ضریب پایداری، روش بدست آوردن ضریب اطمینان را به کار گرفت، در این روش تغییر شکل‌های کلی مفهوم فیزیکی ندارد، اما تغییر شکل‌های جزئی آخرین مرحله تحلیل (هنگام خرابی) در تعیین مکانیزم خرابی مورد استفاده قرار می‌گیرند، ضمناً این تحلیل‌ها براساس معیار موهر کلمب انجام می‌گیرد [۱۵].

۶. المان بندی و تشریح مدل‌های طراحی

هندسه مدل باید به المان‌های محدود، به منظور انجام محاسبات المان محدود، تقسیم شود. ایجاد کننده مش بندی در نرم افزار یک نسخه ویژه ایجاد کننده مش بندی مثلثی می‌باشد که توسط سپرا توسعه یافته است. این مش بندی بر اساس روش مثلث بندی قوی می‌باشد که نتیجه آن مش بندی بی‌سازمان است. این مش بندی نامرتب به نظر می‌رسد اما عملکرد عددی آن از عملکرد مش بندی منظم بهتر می‌باشد. داده‌های مورد نیاز برای ایجاد مش در هندسه مدل شامل نقاط، خطوط تودها (توده نواحی بسته با خطوط می‌باشند که به طور اتوماتیک در مدت ایجاد مدل هندسی بوجود می‌آیند) می‌باشند. خطوط هندسی و نقاط ممکن است برای تحت تاثیر قراردادن موقعیت و توزیع المان بکار می‌روند. ایجاد مش بندی نیاز به پارامتر مش بندی عمومی که اندازه المان میانگین Le را نشان دهد، دارد. در نرم افزار Plaxis این پارامتر به وسیله ابعاد هندسی خارجی و تنظیمات درشتی عمومی که در زیر منوی Mesh تعریف شده است محاسبه می‌شود.



شکل (۵): شرایط مرزی مدل ساخته شده



شکل (۶): میخ بیرون کشیده در مدل عددی

۷. اختصاص مشخصات خاک و میخ

مشخصات خاک را طبق جدول (۱) با توجه به مدل‌سازی آزمایش مربوطه، در نرم‌افزار اختصاص داده می‌شود. لازم به ذکر است که با توجه به ابعاد مخزن، تنش‌های برجای خاک که در اولین فاز محاسبات تولید می‌شوند، قابل چشم‌پوشی است. لذا مقادیر وزن مخصوص طبیعی و اشباع خاک صفر در

نظر گرفته شده است. لازم به یادآوری است مقادیر فیزیکی و مکانیکی خاک ارائه شده در جدول زیر با استفاده از آزمایش برش مستقیم بدست آمده است.

جدول (۱): مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک‌های مدل شده

ردیف	پارامتر	نام	خاک B1-B3	خاک B4-B6
۱	مدل رفتاری ماده	<i>Model</i>	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
۲	نوع رفتار ماده	<i>Type</i>	Drained	Drained
۳	مدول الاستیسیته	E_{ref} (kg/cm ²)	۸۰	۱۰۰
۴	نسبت پواسن	ν	۰/۳	۰/۳
۵	چسبندگی	C (kg/cm ²)	۰/۰۰۵	۰/۰۱
۶	زاویه اصطکاک	φ (°)	۲۰	۲۵
۷	زاویه اتساع	ψ (°)	۰	۰

برای تعریف میخ که شامل میلگرد و دوغاب دور آن است از ابزار شمع استفاده می‌شود به صورتی که دو شمع تو در تو در نظر گرفته می‌شود. برای شمع خارجی سطح مشترک تعریف می‌شود در حالی که بین شمع‌های داخلی و خارجی سطح مشترک تعریف نمی‌شود و این دو به دلیل آن که سختی بالایی دارند، مجموعاً یک جسم صلب در نظر گرفته می‌شوند. برای تخصیص مشخصات دوغاب و میلگرد به شمع‌ها از جداول (۲) و (۳) استفاده می‌شود. لازم به ذکر است پارامتر ضریب سطح مشترک (R_{int}) یکی از پارامترهایی است که کالیبراسیون بوسیله آن انجام شده و مقدار آن بین ۰/۶ تا ۰/۷ بدست آمد.

جدول (۳): مشخصات میلگرد

ردیف	پارامتر	نام	مقدار
۱	مدل رفتاری ماده	<i>Model</i>	Elastic
۲	نوع رفتار ماده	<i>Type</i>	Non-porous
۳	مدول الاستیسیته	E_{ref} (kg/cm ²)	۸۰۰۰۰
۴	نسبت پواسن	ν	۰/۲
۵	ضریب سطح مشترک	R_{int}	۰/۶ - ۰/۷

جدول (۲): مشخصات دوغاب

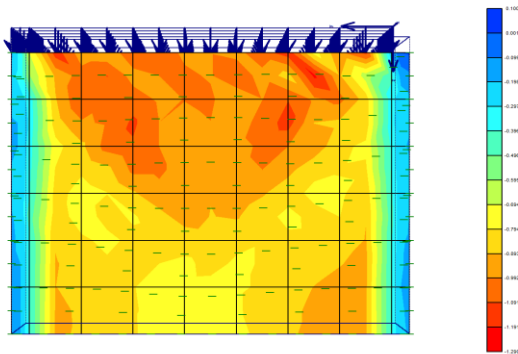
ردیف	پارامتر	نام	مقدار
۱	مدل رفتاری ماده	<i>Model</i>	Elastic
۲	نوع رفتار ماده	<i>Type</i>	Non-porous
۳	مدول الاستیسیته	E_{ref} (kg/cm ²)	2×10^6
۴	نسبت پواسن	ν	۰/۲

در دیوارهای میخ کوبی شده، ظرفیت بیرون کشیدگی میخ یک عامل مهم در تحلیل و طراحی دیوارهای میخ کوبی شده می‌باشد، که به عامل اصلی مقاومت چسبندگی بین خاک و ملات بستگی دارد. هدف از این تحقیق، بررسی اثر تغییرات در پارامترهای موثر بر ظرفیت بیرون کشیدگی میخ‌ها در گودبرداری‌های درون شهری می‌باشد. این پارامترها شامل تراکم خاک و نیز اثر سربر اعمالی به خاک می‌باشد. با توجه به نتایج مطالعات پارامتریک و منطقی بودن نتایج مدلسازی نمودارهای طراحی برای اینگونه مهارها تهیه شده که بخشی از این نمودارها در بخش‌های بعد ارائه شده است.

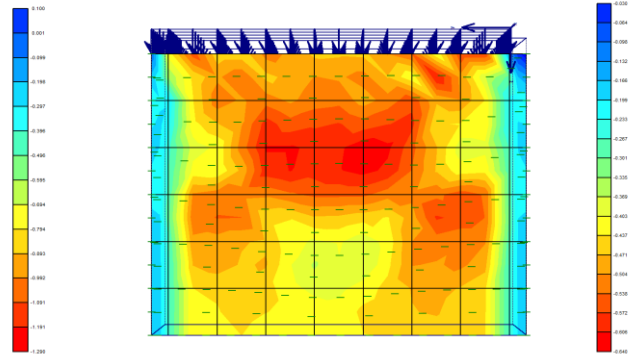
جدول (۴): مشخصات پارامترهای مورد استفاده

B6	B5	B4	B3	B2	B1	مدل
۱/۶	۱/۶	۱/۶	۱/۴	۱/۴	۱/۴	مخصوص وزن خشک (gr/cm^3)
۱/۵	۱/۲	۱	۱/۵	۱/۲	۱	فشار سربار اعمالی (kg/cm^2)

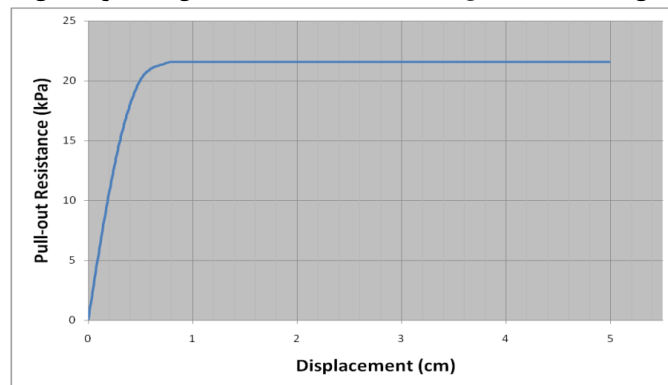
۸. نتایج



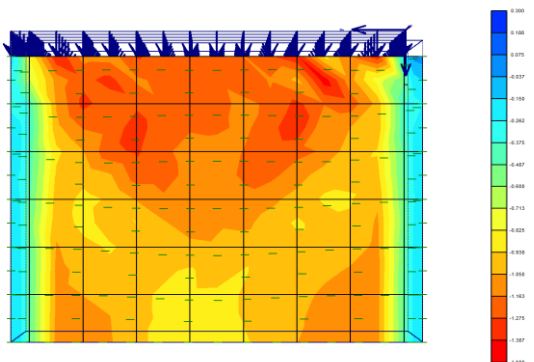
شکل (۷): تغییرات تنش در جهت z در مدل B1



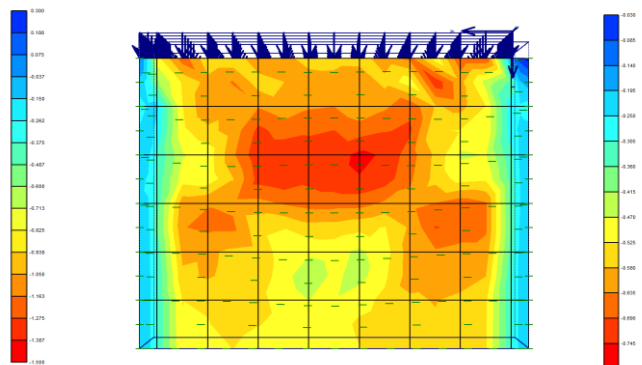
شکل (۶): تغییرات تنش در جهت x در مدل B1



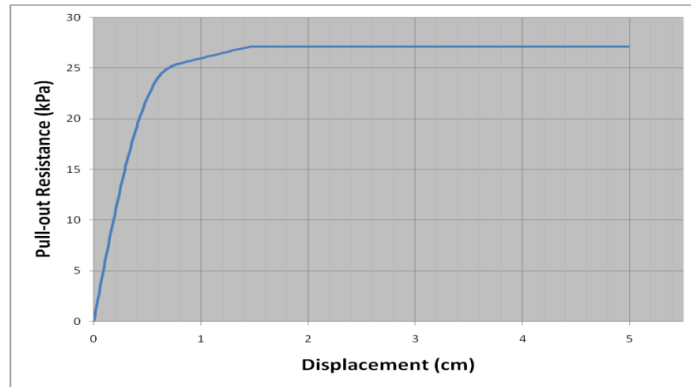
شکل (۸): تغییرات مقاومت بیرون کشیدگی در برابر تغییر مکان میخ در مدل B1



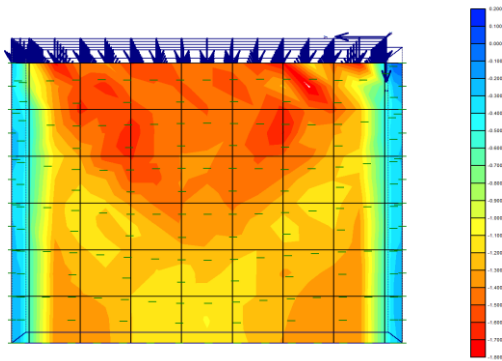
شکل (۱۰): تغییرات تنش در جهت z در مدل B2



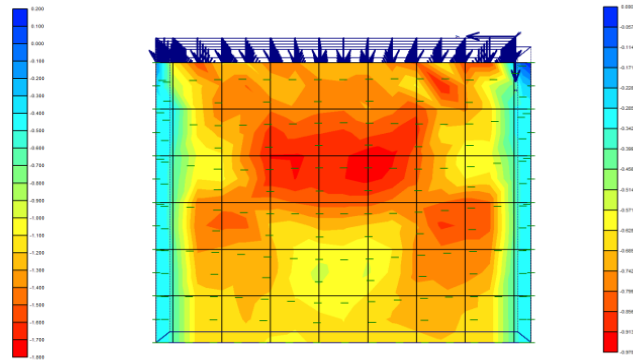
شکل (۹): تغییرات تنش در جهت x در مدل B2



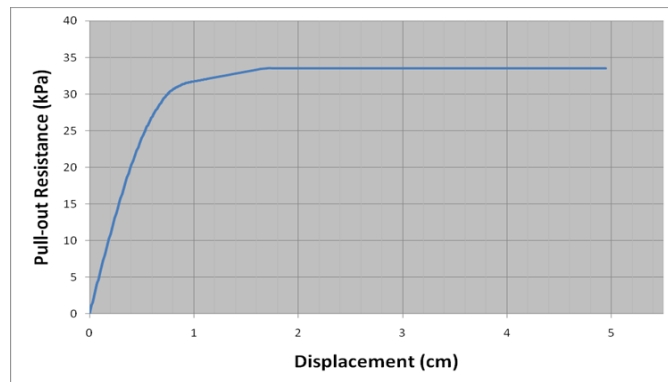
شکل (۱۱): تغییرات مقاومت بیرون کشیدگی در برابر تغییر مکان میخ در مدل B2



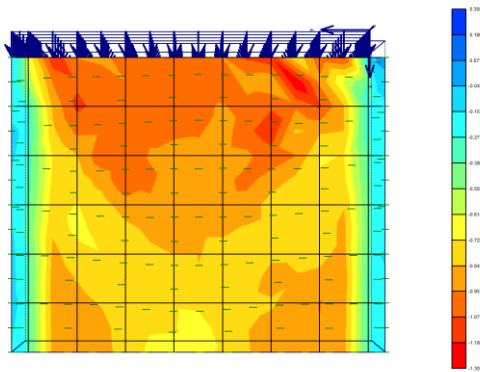
شکل (۱۳): تغییرات تنش در جهت z در مدل B3



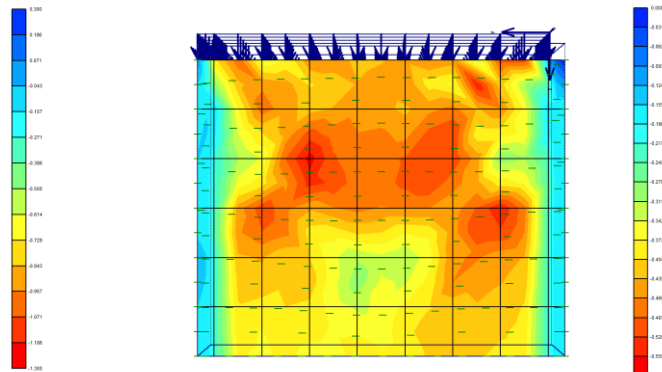
شکل (۱۲): تغییرات تنش در جهت x در مدل B3



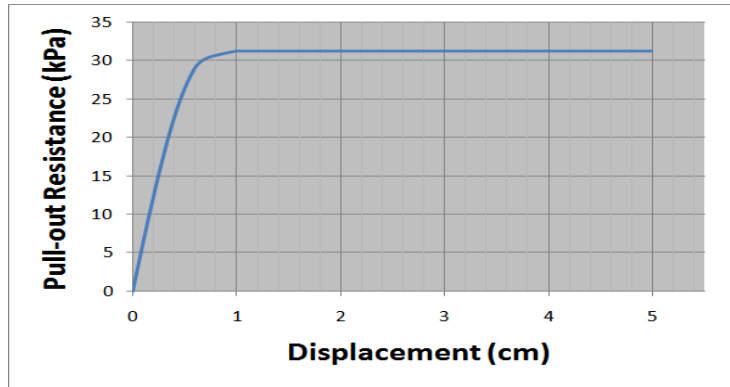
شکل (۱۴): تغییرات مقاومت بیرون کشیدگی در برابر تغییر مکان میخ در مدل B4



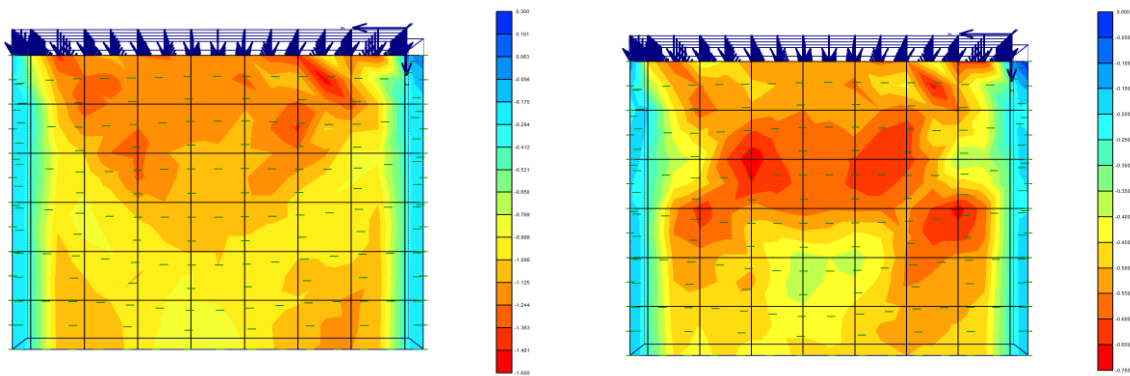
شکل (۱۶): تغییرات تنش در جهت z در مدل B4



شکل (۱۵): تغییرات تنش در جهت x در مدل B4

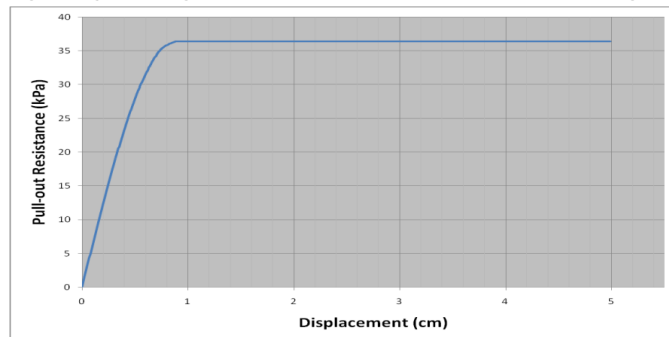


شکل (۱۷): تغییرات مقاومت بیرون کشیدگی در برابر تغییر مکان میخ در مدل B4

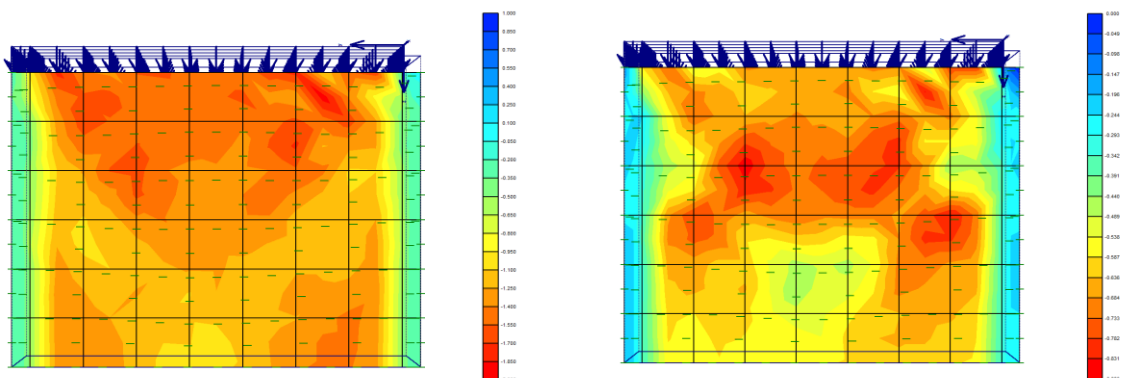


شکل (۱۹): تغییرات تنش در جهت z در مدل B5

شکل (۱۸): تغییرات تنش در جهت x در مدل B5

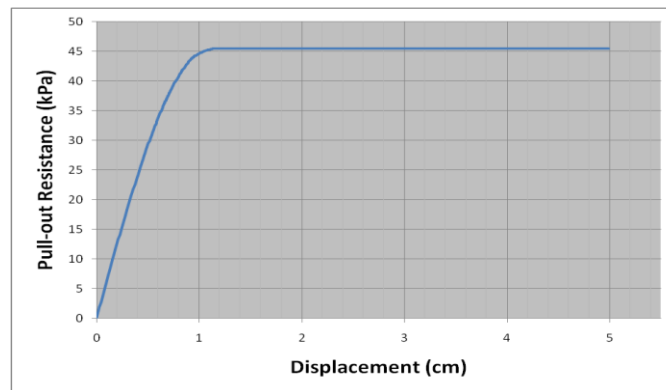


شکل (۲۰): تغییرات مقاومت بیرون کشیدگی در برابر تغییر مکان میخ در مدل B5



شکل (۲۲): تغییرات تنش در جهت z در مدل B6

شکل (۲۱): تغییرات تنش در جهت x در مدل B6



شکل (۲۳): تغییرات مقاومت بیرون کشیدگی در برابر تغییر مکان میخ در مدل B6

۱.۸. تاثیر فشار سربار اعمالی

وضعیت تنش‌های ایجاد شده در جعبه آزمایش مطابق شکل‌های ارائه شده برای تغییر تنش در جهت X و Z می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود توزیع تنش در بالای جعبه آزمایش تقریباً برابر با تنش اعمالی است و این توزیع تنش با فاصله گرفتن از سطح خاک کاهش می‌یابد. با وجود جداری صلبی که در دو طرف جعبه آزمایش می‌باشد ملاحظه می‌شود میزان تنش در کناره‌ها تقریباً برابر صفر است و بعلت اصطکاکی که خاک در این ناحیه با جداره صلب دارد، خاک نشست نکرده و هیچ تنشی از تنش اعمالی دریافت نمی‌کند. کاهش میزان تنش با فاصله گرفتن از سطح خاک را می‌توان بدین گونه توجیه کرد که با توجه به شرایط مرزی که در جداره‌های صلب در نظر گرفته شده، میزان تنش بعلت اصطکاک خاک با جداره‌ها در عمق کاهش می‌یابد.

همان‌گونه که در نمودارها مشخص است افزایش فشار سربار اعمالی در نمونه خاک با وزن مخصوص ۱/۴ و ۱/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب باعث افزایش ظرفیت بیرون کشیدگی میخ می‌شود. زیرا با افزایش فشار سربار اعمالی، تراکم خاک بیشتر شده و این خود باعث بالا رفتن مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک می‌شود. لذا بالا رفتن مقادیر این پارامترها، افزایش مقاومت بیرون کشیدگی میخ را به دنبال دارد. به گونه‌ای که با افزایش سربار از ۱ به ۱/۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، افزایش ظرفیت بیرون کشیدگی برای وزن مخصوص‌های خشک ۱/۴ و ۱/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب به ترتیب ۲۵٪ و ۱۶٪ می‌باشد و این مقادیر افزایش به ازای افزایش سربار از ۱/۲ به ۱/۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، برابر ۲۴ درصد است.

۲.۸. تاثیر تراکم خاک

برای سربار ۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، افزایش وزن مخصوص خشک باعث افزایش ۴۴ درصدی ظرفیت بیرون کشیدگی و با سربار ۱/۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، این مقدار افزایش برابر ۳۴٪ می‌شود و به ازای فشار سربار اعمالی ۱/۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، ظرفیت بیرون کشیدگی میخ در خاک ۳۵ درصد افزایش می‌یابد.

در نتیجه تاثیر تراکم خاک در فشار سربارهای اعمالی بالاتر به مراتب بیشتر از تاثیر این پارامتر در فشار سربارهای اعمالی پایین‌تر است و در نتیجه هرچه فشار سربار اعمالی به خاک افزایش یابد، افزایش تراکم خاک و در نتیجه بهبود پارامترهای مقاومتی خاک همچون ضریب چسبندگی C و زاویه اصطکاک داخلی ϕ را به دنبال دارد که این نیز تاثیر بیشتری بر روی افزایش ظرفیت بیرون کشیدگی میخ دارد.

۹. مراجع

1. Fang, H.y, foundation Engineering Handbook, 2nd Edition, Chapman & Hall, pp 868-905, 1992.
2. French National Research, Recommendations Clouterre, Federal Highway Administration, 1991.
3. Juran, I., Baudrand, G., Farrage, K. and Elias, V., Design of Soil Nailed Retaining Structures, Design and performance of Earth Retaining Structure, Geotechnical Special Publication, No. 25, ASCE, pp 644-659, 1999.
4. The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, Guide to soil nail design and construction, Geotechnical Engineering Office, pp 16-20, 2008.



5. Tei, K. "A study of soil nailing in sand". Ph.D thesis, University of Oxford (1993).
6. Chu, L. M. "Study on the Interface Shear Strength of Soil Nailing in Completely Decomposed Granite (CDG) Soil". M.Phil thesis, Sept. 2003, The Hong Kong Polytechnic University (2003).
7. Bayoumi, A., Bobet, A., & Lee, J. Pullout capacity of a reinforced soil in drained and undrained conditions. *Finite Elements in Analysis and Design*, 525-536, 2008
8. Zhou, Y., C., & Tham, L. Numerical modeling of soil nails in loose fill slop under surcharge loading, *Computers and Geotechnics*, PP 837-850, 2009
9. soil nailing, ISSMFE-TC-17, PP 1-13, 2002.
10. Franzen, G. "Soil Nailing – A laboratory and field study of pullout capacity". Doctoral thesis, Department of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden (1998).
11. Bruce, D. A. and Jewell, R. A. "Soil nailing: Application and Practice - Part 2". *Ground Engineering*, 20(1), pp21-23 (1987).
12. Luo, S. Q., Tan S. A. and Yong K. Y. "Pull-out resistance mechanism of a soil nail reinforcement in dilative soils". *Soils and foundations*, 40(1), pp47-56 (2000).
13. Pradhan, B. "Study of pullout behaviour of soil nails in completely decomposed granite fill". M.Phil thesis, The University of Hong Kong (2003).
14. Chu, L. M. and Yin, J. H. "A Laboratory Device to Test the Pull-Out Behavior of Soil Nails". *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 28(5), September, pp1-15 (2005a).
15. Plaxis: Finite element code for soil and rock analyses (Version 8.2).