

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده: مهندسی عمران

گروه: مهندسی ژئوتکنیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی و آنالیز برگشتی تغییر شکلها در گودهای عمیق جهت انتخاب مناسب پارامترهای
الاستیک خاک

نگارنده: مهدی فرهادی

استاد راهنما:

دکتر امیر بذرافشان مقدم

دی ۱۳۹۶

دانشگاه صنعتی شاهرود

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای مهدی فرهادی

تحت عنوان: بررسی و آنالیز برگشتی تغییر شکلها در گودهای عمیق جهت انتخاب مناسب پارامترهای

الاستیک خاک، در تاریخ

توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک

مورد پذیرش قرار گرفت.

کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه

امضا	اساتید مشاور	امضا	اساتید راهنما

امضا	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضا	اساتید داور

تقدیم‌نامه

تقدیم به خدایی که آفرید

جهان را، انسان را، عقل را، علم را، معرفت را، عشق را ...

و به کسانی که عشقشان را در وجودم دمید

تقدیم به مادر عزیز و مهربان و روح پدرم.

تعهدنامه

اینجانب مهدی فرهادی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران-ژئوتکنیک دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه "بررسی و آنالیز برگشتی تغییر شکلها در گودهای عمیق جهت انتخاب مناسب پارامترهای الاستیک خاک" تحت راهنمایی دکتر امیر بذرافشان مقدم متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

امروزه با افزایش چشمگیر نیاز به اجرای گودبرداری در مناطق شهری، جهت اجرای ایمن و با صرفه گود در مجاورت سازه ها و تاسیسات شهری، لازم است تغییر شکل های ناشی از گودبرداری به نحوی مناسب کنترل گردد. در این پژوهش میزان تغییر شکل های یک گود به ازای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش های ژئوتکنیک (شامل پرسیومتری، SPT و سه محوری) و با استفاده از سه مدل رفتاری مور-کولمب (MC)، سخت شونده (HS) و "سخت شونده با افزایش سختی در کرنش کوچک" (HSS)، در نرم افزار المان محدود Plaxis 2D بررسی شده است. با مقایسه نتایج حاصل از مدلسازی و نتایج حاصل از پایش یک گود به عمق ۲۵ متر و پایدار شده به روش شمع شناور و مهارى در شهر مشهد، مشخص گردید مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش پرسیومتری نسبت به آزمایش های سه محوری و SPT در تحلیل گود مناسبتر می باشد. همچنین مدل رفتاری HSS، شامل دقیق ترین نتایج و مدل رفتاری MC دارای بیشترین خطا بوده، به گونه ای که توصیه می شود در تحلیل گودبرداری از این مدل رفتاری استفاده نگردد.

مطالعه پارامتریک نیز به منظور بررسی میزان حساسیت جابجایی گودهای مهار شده به روش انکرینگ نسبت به پارامترهای مهندسی خاک (شامل سختی، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی) انجام گردید و پارامترهای مختلف از جمله حداکثر جابجایی افقی و قائم، پروفیل جابجایی و ... به ازای مقادیر مختلف پارامترهای مهندسی خاک بررسی گردید.

کلمات کلیدی: گودبرداری، مدل‌های رفتاری، سیستم نگهدارنده شمع شناور و مهارى، Plaxis

فهرست مطالب

۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱- مقدمه
۴	۲-۱- ضرورت انجام پژوهش
۵	۳-۱- اهداف پژوهش
۵	۴-۱- روش انجام تحقیق
۵	۵-۱- ساختار پایان نامه
۹	فصل ۲: پایدارسازی گود به روش مهارى
۱۰	۱-۲- مقدمه
۱۰	۲-۲- معرفی انواع روشهای گودبرداری (سازه نگهبان)
۱۱	۱-۲-۲- روش مهارى و بلوک
۱۲	۱-۱-۲-۲- روش اجرای سیستم مهارى و بلوک
۱۵	۲-۲-۲- روش مهارى و شمع‌گذاری (Anchorage and Piling System)
۱۹	۳-۲- مروری بر تحقیقات گذشته
۱۹	۱-۳-۲- جابجایی افقی دیواره گود
۲۱	۲-۳-۲- نشست سطح زمین ناشی از گودبرداری
۲۶	۳-۳-۲- پروفیل نشست سطح زمین بر اثر گودبرداری
۲۹	۴-۳-۲- مسیر تنش
۳۱	۵-۳-۲- تحقیقات انجام شده در خصوص مدل‌های رفتاری خاک در تحلیل گودبرداری
۳۲	۴-۲- جمع بندی مطالعات پیشین و مقایسه آن با تحقیق حاضر
۳۳	فصل ۳: معرفی پروژه مورد مطالعه

۳۴	۱-۳- مقدمه
۳۴	۲-۳- مشخصات کلی پروژه
۳۴	۳-۳- مطالعات ژئوتکنیک انجام شده در پروژه
۳۸	۱-۳-۳- تبدیل مدول پرسیومتری به مدول الاستیسیته
۳۹	۴-۳- مشخصات فنی سازه نگهبان اجرا شده

فصل ۴: مدلسازی عددی ۴۳

۴۴	۱-۴- مقدمه
۴۴	۲-۴- انتخاب روش مناسب تحقیق
۴۵	۳-۴- نرم افزار PLAXIS 2D Ver. 8.6
۴۶	۱-۳-۴- روش المان محدود
۴۸	۲-۳-۴- کالیبراسیون نسخه PLAXIS مورد استفاده
۴۸	۱-۲-۳-۴- مشخصات مدل ساخته شده جهت کالیبراسیون نرم افزار
۵۲	۴-۴- ابعاد در مدلسازی عددی
۵۲	۵-۴- روند خاکبرداری و اجرای سازه نگهبان در پروژه مورد مطالعه
۵۴	۶-۴- مشخصات مهندسی اعضای سازه نگهبان
۵۵	۷-۴- تفاوت اثر مقدار پارامترهای مختلف بر نتایج طراحی و آنالیز برگشتی (تفاوت طراحی و آنالیز برگشتی)
۵۶	۸-۴- استخراج پارامترهای مهندسی لایه های خاک (جهت انجام آنالیز برگشتی)
۵۶	۱-۸-۴- استخراج پارامترهای مقاومت برشی C' و ϕ' ماسه جهت استفاده در آنالیز برگشتی
۶۰	۲-۸-۴- استخراج پارامترهای مقاومت برشی C' و ϕ' در خاک ریزدانه
۶۲	۳-۸-۴- مقادیر مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش های مختلف
۶۳	۹-۴- روند مدلسازی گودبرداری با نرم افزار Plaxis 2D
۶۳	۱-۹-۴- ابعاد مدلها

- ۶۴ وضعیت سربارهای مجاور گود ۲-۹-۴
- ۶۵ شرایط مرزی مدل ۳-۹-۴
- ۶۵ سایر مشخصات مدل ۴-۹-۴
- ۶۹ مدل‌های رفتاری استفاده شده در تحلیل ۱۰-۴
- ۷۰ مدل رفتاری مور- کولمب (MC) ۱-۱۰-۴
- ۷۱ مدل رفتاری سخت شونده (HS) ۲-۱۰-۴
- ۷۳ مدل رفتاری سخت شونده با در نظرگیری سختی در کرنش کم (HSS) ۳-۱۰-۴
- ۷۵ تحلیل حساسیت تغییر شکل های گود به مشخصات مهندسی خاک ۱۱-۴

فصل ۵: بررسی و تفسیر نتایج ۷۷

- ۷۸ ۱-۵ مقدمه ۱-۵
- ۷۸ ۲-۵ نتایج آنالیز برگشتی گود با مدل های رفتاری مختلف و براساس مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش های مختلف ۲-۵
- ۸۰ ۱-۲-۵ نتایج آنالیز برگشتی دیواره گود در شرایط مختلف ۱-۲-۵
- ۸۶ ۲-۲-۵ نتایج آنالیز برگشتی جهت محاسبه نشست بالای دیواره در شرایط مختلف ۲-۲-۵
- ۸۹ ۳-۲-۵ جمع بندی نتایج و پیشنهاد روش مناسب جهت تحلیل تغییرشکل‌های گودبرداری ۳-۲-۵
- ۹۰ ۳-۵ مقایسه کیفی کانتورهای جابجایی افقی در مدل های رفتاری مختلف ۳-۵
- ۹۲ ۴-۵ تحلیل حساسیت تغییر شکل های گود به مشخصات مهندسی خاک ۴-۵
- ۹۴ ۱-۴-۵ نتایج میزان حساسیت تغییر شکل های گود به چسبندگی خاک ۱-۴-۵
- ۹۹ ۲-۴-۵ نمودارهای میزان حساسیت تغییر شکل های گود به زاویه اصطکاک داخلی خاک ۲-۴-۵
- ۱۰۲ ۳-۴-۵ نمودارهای میزان حساسیت تغییر شکل های گود به سختی خاک ۳-۴-۵
- ۱۰۶ ۴-۴-۵ خلاصه و جمع بندی نتایج تحلیل حساسیت تغییر شکل های گود به پارامتر مهندسی خاک ۴-۴-۵

۱۰۹	.....	آزمایش ها
۱۱۰	.....	۱-۵-۵- بررسی نتایج آزمایش بارگذاری صفحه
۱۱۱	.....	۲-۵-۵- مقایسه مقادیر مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش های مختلف
۱۱۲	.....	۳-۵-۵- جمع بندی نتایج بررسی آزمایش بارگذاری صفحه در تعیین مدول الاستیسیته خاک.

فصل ۶: جمع بندی و پیشنهادها ۱۱۵

۱۱۶	.....	۱-۶- مقدمه
۱۱۶	.....	۲-۶- جمع بندی نتایج
۱۱۹	.....	۳-۶- پیشنهادها

مراجع ۱۲۱

پیوست ۱۲۴

فهرست شکل ها

- شکل ۱-۲- اجزای تشکیل دهنده مهاری ۱۲
- شکل ۲-۲- مراحل اجرای مهاری و جزئیات آن ۱۳
- شکل ۳-۲- اجزای سر مهاری که توسط دیسک سوراخ دار و انگشتی تحت بار کشش قفل شده است ۱۳
- شکل ۴-۲- نمونه گود پایدار شده به روش مهاری و بلوک ۱۴
- شکل ۵-۲- پایدارسازی دیواره گود به کمک روش مهاری و شمع فلزی ۱۶
- شکل ۶-۲- پایدارسازی دیواره گود به کمک روش مهاری و شمع بتنی ۱۷
- شکل ۷-۲- انجام عملیات کشش استرند توسط جک هیدرولیکی مخصوص ۱۷
- شکل ۸-۲- استفاده از روش شمع فلزی و مهاری در مجاورت ساختمان همسایه ۱۸
- شکل ۹-۲- جابجایی حداکثر افقی دیواره گود ۲۰
- شکل ۱۰-۲- نشست سطح زمین در مجاورت گود ۲۱
- شکل ۱۱-۲- حداکثر نشست سطح زمین در مجاورت گود براساس مقدار حداکثر جابجایی افقی دیواره ۲۲
- شکل ۱۲-۲- رابطه حداکثر جابجایی افقی و نشست گود ۲۵
- شکل ۱۳-۲- رابطه بین پارامترهای R و $F.Sbh$ و حداکثر جابجایی افقی و نشست گود ۲۵
- شکل ۱۴-۲- انواع پروفیل نشست سطح زمین و جابجایی دیواره گود ۲۶
- شکل ۱۵-۲- تغییرات موقعیت نشست حداکثر براساس پارامتر PIZ در خاک رس نرم ۲۸
- شکل ۱۶-۲- پروفیل نشست سطح زمین در مجاورت گود در خاک رس نرم ۲۸
- شکل ۱۷-۲- موقعیت المان های خاک در مطالعات انجام شده ۳۰
- شکل ۱۸-۲- مسیر تنش موثر (شکل a) و مسیر تنش کل (شکل b) برای المان های خاک با فاصله ۱۰ متر از دیوار دیافراگمی ۳۰
- شکل ۱-۳- حفاری گمانه و انجام آزمایش صحرایی پرسیومتری در محل پروژه ۳۵
- شکل ۲-۳- موقعیت گمانه های حفاری شده در پروژه ۳۵
- شکل ۳-۳- نتایج آزمایش های پرسیومتری در محل پروژه ۳۷
- شکل ۴-۳- نتایج آزمایش های پرسیومتری در محل پروژه ۳۷
- شکل ۵-۳- پلان گودبرداری پروژه ۴۰
- شکل ۶-۳- نقشه مشخصات فنی سیستم سازه نگهبان اجرا شده ۴۲
- شکل ۱-۴- تصویری از محیط بخش input نرم افزار Plaxis 2D ۴۵

- شکل ۴-۲- تصویر مدل ساخته شده در راهنمای نرم افزار plaxis ۴۹
- شکل ۴-۳- شبکه المان بندی شده در مدل ساخته شده جهت صحت سنجی نتایج ۵۰
- شکل ۴-۴- میزان جابجایی افقی مدل ۵۱
- شکل ۴-۵- میزان جابجایی قائم مدل ۵۱
- شکل ۴-۶- مراحل خاکبرداری و اجرای سازه نگهبان پروژه مورد مطالعه ۵۳
- شکل ۴-۷- تخمین زاویه اصطکاک داخلی ماسه براساس عدد N_{spt} ۵۷
- شکل ۴-۸- تخمین زاویه اصطکاک داخلی لایه های ماسه ای براساس عدد spt ۵۸
- شکل ۴-۹- انتخاب مقدار نهایی ϕ ماسه جهت استفاده در آنالیز برگشتی گود ۶۰
- شکل ۴-۱۰- ابعاد مدل در تحلیل گود ۶۴
- شکل ۴-۱۱- المان بندی انجام شده توسط نرم افزار ۶۶
- شکل ۴-۱۲- تعریف سولجر فولادی به مقطع 2IPE200 و به فواصل افقی ۳ متر ۶۷
- شکل ۴-۱۳- تعریف بتن پاششی دیواره به ضخامت ۱۰ سانتی متر ۶۷
- شکل ۴-۱۴- مشخصات طول آزاد انکرهای ۶ رشته به فواصل افقی ۳ متری ۶۸
- شکل ۴-۱۵- تعریف طول گیردار انکرهای ۶ رشته به فواصل افقی ۳ متری ۶۸
- شکل ۴-۱۶- اعمال پیش تنیدگی انکرها به میزان ۳۰۰ کیلوپاسکال ۶۹
- شکل ۴-۱۷- رفتار تنش - کرنش مصالح در مدل مور- مولمب و سطح گسیختگی مور- کولمب در فضای تنش های اصلی ۷۰
- شکل ۵-۱- مقادیر جابجایی دیواره گود براساس E_s حاصل از آزمایش های سه محوری، spt و پرسیومتری (مدول بارگذاری و باربرداری) و با استفاده از مدل رفتاری مور-کولمب ۸۱
- شکل ۵-۲- مقادیر جابجایی دیواره گود براساس E_s حاصل از آزمایش های سه محوری، spt و پرسیومتری و با استفاده از مدل رفتاری سخت شونده HS ۸۳
- شکل ۵-۳- مقادیر جابجایی دیواره گود براساس E_s حاصل از آزمایش های سه محوری، spt و پرسیومتری و با استفاده از مدل رفتاری "سخت شونده با افزایش سختی کرنش کوچک" (HSS) ۸۵
- شکل ۵-۴- مقادیر کرنش قائم در پروژه مورد مطالعه (در مدل رفتاری HSS) ۸۸
- شکل ۵-۵- مقادیر کرنش افقی در پروژه مورد مطالعه (در مدل رفتاری HSS) ۸۸
- شکل ۵-۶- مقادیر کرنش برشی در پروژه مورد مطالعه (در مدل رفتاری HSS) ۸۹
- شکل ۵-۷- کانتورهای جابجایی افقی در مدل رفتاری مور- کولمب MC ۹۱
- شکل ۵-۸- جابجایی افقی در مدل رفتاری سخت شونده HS ۹۱
- شکل ۵-۹- جابجایی افقی در مدل رفتاری سخت شونده HSS ۹۲
- شکل ۵-۱۰- وضعیت گود و مجاور آن در مدلسازی المان محدود جهت مطالعه پارامتریک ۹۳

- شکل ۵-۱۱- منحنی جابجایی افقی دیواره گود برحسب مقادیر مختلف چسبندگی در محدوده ۷۵ تا ۱۳۰ درصد چسبندگی لایه های خاک محل پروژه ۹۵
- شکل ۵-۱۲- منحنی نشست زمین مجاور گود برحسب مقادیر مختلف چسبندگی در محدوده ۷۵ تا ۱۳۰ درصد چسبندگی لایه های خاک محل پروژه ۹۵
- شکل ۵-۱۳- منحنی جابجایی افقی زمین مجاور گود برحسب مقادیر مختلف چسبندگی در محدوده ۷۵ تا ۱۳۰ درصد چسبندگی لایه های خاک محل پروژه ۹۶
- شکل ۵-۱۴- مقادیر حداکثر جابجایی افقی دیواره برحسب مقادیر مختلف چسبندگی در محدوده ۷۵ تا ۱۳۰ درصد چسبندگی لایه های خاک محل پروژه ۹۷
- شکل ۵-۱۵- مقادیر حداکثر نشست زمین مجاور گود برحسب مقادیر مختلف چسبندگی در محدوده ۷۵ تا ۱۳۰ درصد چسبندگی لایه های خاک محل پروژه ۹۷
- شکل ۵-۱۶- رابطه حداکثر نشست زمین و حداکثر جابجایی افقی دیواره برحسب مقادیر مختلف چسبندگی در محدوده ۷۵ تا ۱۳۰ درصد چسبندگی لایه های خاک محل پروژه ۹۸
- شکل ۵-۱۷- منحنی جابجایی افقی دیواره گود برحسب مقادیر مختلف ϕ در محدوده ۸۵ تا ۱۱۵ درصد زاویه اصطکاک خاک محل پروژه ۹۹
- شکل ۵-۱۸- منحنی نشست زمین مجاور گود برحسب مقادیر مختلف ϕ در محدوده ۸۵ تا ۱۱۵ درصد زاویه اصطکاک خاک محل پروژه ۱۰۰
- شکل ۵-۱۹- منحنی جابجایی افقی زمین مجاور گود برحسب مقادیر مختلف ϕ در محدوده ۸۵ تا ۱۱۵ درصد زاویه اصطکاک خاک محل پروژه ۱۰۰
- شکل ۵-۲۰- مقدار حداکثر جابجایی افقی دیواره برحسب مقادیر مختلف ϕ در محدوده ۸۵ تا ۱۱۵ درصد زاویه اصطکاک خاک محل پروژه ۱۰۱
- شکل ۵-۲۱- مقادیر حداکثر نشست زمین برحسب مقادیر مختلف ϕ در محدوده ۸۵ تا ۱۱۵ درصد زاویه اصطکاک خاک محل پروژه ۱۰۱
- شکل ۵-۲۲- رابطه حداکثر نشست زمین و حداکثر جابجایی افقی دیواره برحسب مقادیر مختلف ϕ در محدوده ۸۵ تا ۱۱۵ درصد زاویه اصطکاک خاک محل پروژه ۱۰۲
- شکل ۵-۲۳- منحنی جابجایی افقی دیواره گود برحسب مقادیر مختلف سختی خاک در محدوده ۸۵ تا ۱۱۵ درصد سختی خاک در محل پروژه ۱۰۳
- شکل ۵-۲۴- منحنی نشست زمین مجاور گود برحسب مقادیر مختلف سختی خاک در محدوده ۸۵ تا ۱۱۵ درصد سختی خاک محل پروژه ۱۰۳
- شکل ۵-۲۵- منحنی جابجایی افقی زمین مجاور گود برحسب مقادیر مختلف سختی خاک در محدوده ۸۵ تا ۱۱۵ درصد سختی خاک محل پروژه ۱۰۴
- شکل ۵-۲۶- مقادیر حداکثر جابجایی افقی دیواره برحسب مقادیر مختلف سختی در

- محدوده ۸۵ تا ۱۱۵ درصد سختی خاک محل پروژه ۱۰۴
- شکل ۵-۲۷- مقادیر حداکثر جابجایی قائم زمین برحسب مقادیر مختلف سختی خاک
- در محدوده ۸۵ تا ۱۱۵ درصد سختی خاک محل پروژه ۱۰۵
- شکل ۵-۲۸- رابطه حداکثر نشست زمین و حداکثر جابجایی افقی دیواره برحسب
- مقادیر مختلف سختی خاک در محدوده ۸۵ تا ۱۱۵ درصد سختی خاک محل پروژه... ۱۰۶
- شکل ۵-۲۹- حفاری زمین جهت انجام آزمایش بارگذاری صفحه ۱۰۹
- شکل ۵-۳۰- تجهیزات آزمایش بارگذاری صفحه ۱۱۰
- شکل ۵-۳۱- منحنی بار-نشست حاصل از آزمایش بارگذاری صفحه ۱۱۱
- شکل ۵-۳۲- منحنی کرنش- مدول الاستیسیته (در شاخه بارگذاری) حاصل از
- آزمایش بارگذاری صفحه ۱۱۱

فهرست جدول ها

جدول ۱-۲-۱- مشخصات کلی مطالعات موردی انجام شده توسط Bryson and Zapata- Medina	۲۳
جدول ۲-۲-۲- اطلاعات اندازه گیری شده توسط Bryson and Zapata-Medina	۲۴
جدول ۱-۳-۱- نتایج آزمایشهای پرسویمتری مطابق گزارش مکانیک خاک	۳۶
جدول ۲-۳-۲- پارامتر α مطابق نشریه ۲۲۳ سازمان مدیریت و برنامه ریزی	۳۸
جدول ۳-۳-۳- مشخصات کلی لایه های خاک محل پروژه براساس گزارش مکانیک خاک	۳۹
جدول ۴-۳-۴- مشخصات فنی انکرهای اجرا شده	۴۱
جدول ۱-۴-۱- مشخصات مهندسی لایه های خاک مطابق راهنمای نرم افزار Plaxis	۴۹
جدول ۲-۴-۲- مشخصات مهندسی دیوار دیافراگمی مطابق راهنمای نرم افزار Plaxis	۴۹
جدول ۳-۴-۳- مشخصات مهندسی بخش آزاد انکرها مطابق راهنمای نرم افزار Plaxis	۵۰
جدول ۴-۴-۴- مشخصات مهندسی بخش گیردار انکرها مطابق راهنمای نرم افزار Plaxis	۵۰
جدول ۵-۴-۵- مقایسه نتایج بدست آمده با مثال حل شده در راهنمای نرم افزار	۵۱
جدول ۶-۴-۶- مشخصات فنی سولجر فلزی 2IPE200	۵۴
جدول ۷-۴-۷- مشخصات ابعادی انکرها (جدول تکراری از فصل ۳)	۵۴
جدول ۸-۴-۸- مشخصات فنی استرندها	۵۴
جدول ۹-۴-۹- مشخصات بتن پاششی به ضخامت حدود ۱۰ سانتی متر	۵۵
جدول ۱۰-۴-۱۰- متوسط عدد SPT در گمانه های حفاری شده	۵۷
جدول ۱۱-۴-۱۱- محاسبه پارامتر ρ براساس نتایج آزمایش پرسویمتری	۵۸
جدول ۱۲-۴-۱۲- نتایج آزمایش های برش مستقیم در خاک ماسه ای	۵۹
جدول ۱۳-۴-۱۳- مقادیر C' در خاک ماسه ای جهت استفاده در آنالیز برگشتی گود	۶۰
جدول ۱۴-۴-۱۴- مقادیر C' و ϕ' انتخاب شده برای خاک رس جهت استفاده در آنالیز برگشتی گود	۶۱
جدول ۱۵-۴-۱۵- مقادیر ضرایب $C1$ و $C2$ در خاک های مختلف	۶۲
جدول ۱۶-۴-۱۶- مقادیر مدول الاستیسیته لایه های خاک به روش های مختلف	۶۳
جدول ۱۷-۴-۱۷- پارامترهای ورودی برای لایه های خاک در مدل رفتاری مور- کولمب	۷۱
جدول ۱۸-۴-۱۸- پارامترهای ورودی برای لایه های خاک در مدل رفتاری سخت شونده	۷۳
جدول ۱۹-۴-۱۹- محاسبه مدول برشی براساس سرعت موج برشی جهت استفاده در مدل رفتاری HSS	۷۴

- جدول ۴-۲۰- متغیرهای تعریف شده در مطالعه پارامتریک ۷۵
- جدول ۵-۱- مقایسه میزان نشست لبه گود در مدل‌های رفتاری مختلف ۸۶
- جدول ۵-۲- میزان تغییرات جابجایی گود نسبت به تغییرات چسبندگی لایه های خاک
..... ۱۰۷
- جدول ۵-۳- میزان تغییرات جابجایی گود نسبت به تغییرات زاویه اصطکاک لایه های
خاک ۱۰۷
- جدول ۵-۴- میزان تغییرات جابجایی گود نسبت به تغییرات سختی لایه های خاک ۱۰۸
- جدول ۵-۵- مقایسه مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش های بارگذاری صفحه،
پرسیومتری، سه محوری و SPT در محدوده ۲/۵ تا ۵ متری نسبت به کف گود ۱۱۲

فصل اول

مقدمه

امروزه با توجه به رشد روز افزون جمعیت، کمبود فضای مناسب شهری و قیمت بالای زمین، ساخت ساختمان های بلند مرتبه افزایش یافته است. از این رو جهت تامین فضای لازم جهت تاسیسات، پارکینگ ها، انباری ها و از طرفی افزایش ظرفیت باربری فونداسیون، بهترین گزینه احداث طبقات زیرزمین می باشد. انجام عملیات گودبرداری عمیق به صورت ایمن با توجه به حساسیت سازه های مجاور از قبیل ساختمان و لوله های تاسیساتی و همچنین کاهش نگرانی از جهت ایمنی گود، مستلزم طراحی دقیق جهت کنترل تغییر شکلهای ناشی از گود بوده، از طرفی با توجه به هزینه بالای عملیات پایدارسازی دیواره گود و همچنین موقت بودن سازه نگهبان ها، ارائه طرح بهینه نیز الزامی می باشد. امروزه از روشهای مختلفی جهت پایدارسازی موقت دیواره گود استفاده می شود که می توان به روشهایی همچون استفاده از خرپا، مهار مایل به کف گود، مهار متقابل^۱ به دیواره گود، احداث شمع های فلزی و بتنی، روش اجرای معکوس، میخ کوبی^۲ و مهاری^۳ اشاره نمود، در سالیان اخیر روش مهاری یا ترکیب مهاری و شمع فلزی یا بتنی به دلیل صرفه اقتصادی، عدم اشغال زمین، سرعت بالای اجرا، امکان پیش تنیده کردن مهارها و محدود کردن مناسب تغییر شکلهای دیواره، مورد توجه بسیاری از مهندسان و طراحان در گودبرداریهای عمیق قرار گرفته است. با توجه به اینکه در طراحی گودهای عمیق کنترل جابجایی حاکم بوده و ضریب اطمینان گسیختگی برشی جوابگو خواهد بود، همواره محاسبه دقیق مقدار تغییر شکلهای دارای اهمیت فوق العاده ای می باشد. در این تحقیق به محاسبه تغییر شکلهای گودهای عمیق پایدار سازی شده با استفاده از روش "مهاری و شمع شناور"^۴ تمرکز شده است. شمع های شناور که دارای طولی کمتر از عمق گود، جهت کنترل تغییر شکل های بالای دیواره گود استفاده می شود.

¹ Strut

² Nailing

³ Anchoring

⁴ anchored soldier pile

روش اجرای گود در سیستم مهاری به صورت اجرای مرحله ای از بالا به پایین می باشد که ابتدا خاکبرداری مقطعی تا رسیدن به تراز اولین مهاری انجام شده، سپس حفاری گمانه مهاری ها در دیواره انجام و مهاری ها که شامل رشته های فولاد پر مقاومت^۱ می باشد نصب می گردد. در مرحله بعد و پس از گیرش اولیه دوغاب تزریق شده در داخل گمانه، کشش استرندها توسط جک هیدرولیکی انجام شده و مهاری تحت نیرو قفل می گردد. بعد از اجرای اولین ردیف مهاری، عملیات خاکبرداری تا رسیدن به تراز مهاری ردیف دوم انجام شده و مطابق روند فوق ردیفهای بعدی مهاری نیز اجرا می گردد. روش مهاری می تواند به صورت ترکیبی و به همراه شمع گذاری (بتنی یا فولادی) یا شمع شناور اجرا گردد. اصول کلی این روش همانند روش مهاری است با این تفاوت که ابتدا بایستی شمع حفاری و اجرا گردد و همچنین سر مهاری بایستی به شمع های اجرا شده تکیه کند. مزیت استفاده از این سیستم ترکیبی افزایش قابل توجه سختی دیواره گود و ایجاد یک پارچگی عملکرد مهاری ها می باشد.

در این تحقیق ابتدا مدلسازی یک پروژه در شهر مشهد توسط نرم افزار Plaxis 8.6 و به روش المان محدود انجام شده و مدل با مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش های پرسیومتری، SPT و سه محوری به صورت جداگانه تحلیل گردیده است. به منظور بررسی مدل های رفتاری خاک و تعیین مدل رفتاری مناسب، لایه های خاک گود مورد مطالعه با سه مدل رفتاری مور-کولمب، سخت شونده و سخت شونده با افزایش سختی در کرنش کوچک تحلیل شد.

سپس تحلیل حساسیت (مطالعه پارامتریک^۲) به منظور بررسی میزان حساسیت گود به پارامترهای مهندسی خاک، انجام شده است.

¹ Strand

² Parametric study

۱-۲- ضرورت انجام پژوهش

امروزه افزایش چشمگیر نیاز به احداث گودبرداری خصوصا در مناطق شهری، ایجاب می کند جهت اجرای ایمن و با صرفه گود، روند مدلسازی از ابتدا تا انتها با دقت فراوان انجام شود، در این تحقیق با استفاده از نتایج پایش گود و به کمک آنالیز برگشتی، جهت برآورد دقیقتر تغییر شکل‌های گود به موارد زیر پرداخته می شود:

انتخاب صحیح پارامترهای مهندسی خاک: مدول الاستیسیته خاک از آزمونهای آزمایشگاهی و صحرایی مختلفی مانند سه محوری، SPT، بارگذاری صفحه، پرسیومتری قابل استخراج بوده که بسته به نوع آزمایش نتایج آن متفاوت خواهد بود. از طرفی تعیین دقیق و بهینه مدول الاستیسته باعث اطمینان از ایمنی گود و همچنین کاهش هزینه های اجرایی آن می گردد. در این پایان نامه جهت انتخاب بهترین روابط که منجر به تعیین دقیق پارامتر ذکر شده می گردد از نتایج مانیتورینگ رفتار گود و آنالیز برگشتی استفاده شده است.

انتخاب مدل رفتاری مناسب: با توجه به اینکه مدل های رفتاری متنوعی جهت بررسی رفتار خاک ها ارائه شده است، در این مطالعه با هدف تعیین مدل رفتاری مناسب در طراحی ایمن و بهینه گود های عمیق، مقایسه بین مدل های رفتاری مور-کولمب (MC) و سخت شونده (HS) و سخت شونده با افزایش سختی در کرنش کوچک (HSS) انجام شده است.

تحلیل میزان حساسیت گود به پارامترهای مهندسی خاک: میزان تغییرات تغییر شکل های محاسباتی گود مورد مطالعه به ازای تغییر در پارامترهای مهندسی خاک، جهت شناخت میزان حساسیت پارامترهای مختلف خاک انجام شده است.

۱-۳- اهداف پژوهش

اهداف تحقیق حاضر به منظور تحلیل بهینه و دقیقتر گودها شامل موارد ذیل می باشد:

- ۱- بررسی امکان استفاده از روش المان محدود جهت پیش بینی دقیق تغییرشکلهای گود.
- ۲- تعیین آزمایش ژئوتکنیکی مناسب در برآورد مدول الاستیسیته خاک جهت محاسبه دقیق تغییر شکل های ناشی از گودبرداری و با روش آنالیز برگشتی
- ۳- بررسی مدل های رفتاری مختلف با استفاده از آنالیز برگشتی به منظور تعیین مدل رفتاری مناسب جهت استفاده در تحلیل جابجایی گود.
- ۴- مطالعه پارمتری جهت بررسی اثر پارامترهای مهندسی خاک (زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، مدول الاستیسیته) بر مقدار تغییر شکلهای محاسباتی و تعیین میزان حساسیت هر پارامتر.

۱-۴- روش انجام تحقیق

در پروژه مورد مطالعه طی عملیات مانیتورینگ از ابتدای گودبرداری تا چند ماه پس از اتمام عملیات، تغییر شکلهای افقی و قائم دیواره گود ثبت گردیده است و همچنین گزارش کامل ژئوتکنیک سایت شامل اطلاعات مفید لایه های خاک موجود می باشد. به منظور نیل به اهداف این پایان نامه از مدل سازی عددی به روش المان محدود و با استفاده از نرم افزار Plaxis v8.6 استفاده شده است.

۱-۵- ساختار پایان نامه

پایان نامه حاضر مشتمل بر ۶ فصل بوده که در ذیل به معرفی اجمالی هر بخش پرداخته شده است.

فصل اول: مقدمه

این بخش شامل مقدمه ای بر موضوع مورد مطالعه، تعاریف اولیه، ضرورت انجام پژوهش، اهداف مطالعه، روش انجام پژوهش و ساختار محتوای پایان نامه می باشد.

فصل دوم: پایدارسازی گود با استفاده از روش مهارتی

در این فصل ابتدا مفاهیم و تعاریف مهم مرتبط با موضوع ارائه شده و سپس مطالعات قبلی انجام گرفته قرار گرفته است.

فصل سوم: معرفی پروژه مورد مطالعه

در این فصل از پایان نامه ابتدا مشخصات کلی پروژه شامل موقعیت و ابعاد پروژه ارائه شده است، سپس به مطالعات ژئوتکنیک انجام شده در پروژه اشاره شده و در نهایت جزئیات سیستم سازه نگهدارنده اجرا شده در پروژه مورد مطالعه معرفی و تشریح می گردد.

فصل چهارم: مدلسازی عددی

در فصل ۴ پایان نامه نخست ابزار استفاده شده جهت بررسی مسئله که شامل استفاده از نرم افزار المان محدود Plaxis می باشد، معرفی شده و پس از تشریح اصول کار و کاربری این نرم افزار، صحت نتایج بدست آمده از نسخه مورد استفاده با حل یک مسئله کنترل شده است. در ادامه این فصل الزامات بکار گرفته شده در مدلسازی شامل ابعاد مدلها، شرایط مرزی، مراحل اجرای سازه نگهدارنده، مدلهای رفتاری خاک و برخی جزئیات تشریح شده است. در انتهای این فصل روند مدلسازی پروژه مورد مطالعه جهت انجام آنالیز برگشتی و مطالعه پارامتری ارائه شده است.

فصل پنجم: بررسی و تفسیر نتایج

در این فصل به ارائه نتایج بدست آمده از حل عددی مدل‌های ساخته شده و تفسیر آنها به کمک نتایج پایش گود مورد مطالعه پرداخته شده است.

فصل ششم: جمع بندی و ارائه پیشنهادات

خلاصه ای از مهمترین یافته های تحقیق به همراه جمع بندی موضوع با توجه به نتایج بدست آمده ارائه شده است. همچنین در پایان این فصل پیشنهاداتی جهت بررسی بیشتر موضوع آورده شده است.

فصل دوم:

پایدارسازی گود به روش مهاری

۲-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا انواع روشهای گودبرداری در مناطق شهری معرفی شده و سپس اجزای سیستم سازه نگهبان به روش مهاري (یا انکرینگ) و مراحل عملیات اجرایی آن تشریح می گردد. در ادامه این فصل به مطالعات پیشین انجام شده در مورد موضوع پایان نامه پرداخته شده است.

۲-۲- معرفی انواع روشهای گودبرداری (سازه نگهبان)

از جمله مهمترین و مر سومترین روشهای پایدار سازی موقت دیواره گود با استفاده از سازه نگهبان می توان به موارد زیر اشاره نمود [Chang-yu ou, 2006].

- احداث شیب پایدار^۱
- روش میخکوبی
- روش مهاري با بلوک^۲
- روش مهاري و شمع گذاری^۳
- استفاده از قید افقی یا مایل^۴
- روش اجرای معکوس^۵
- روش اجرا در وسط یا جزیره ای^۶

انتخاب هر یک از روشهای فوق براساس عمق گود، وضعیت خاک ساختگاه، آب های زیرزمینی، حساسیت ساختمانهای مجاور، محدودیتها و شرایط اجرایی گود و در نهایت بودجه پروژه می باشد

[Chang-yu ou, 2006].

¹ Stable Slope Method

² Anchorage and Block System

³ Anchorage and Piling System

⁴ Braced Excavation

⁵ Top to Bottom Method

⁶ Island Excavation Method

با توجه به نوع سازه نگهبان پروژه مورد مطالعه، در ادامه روشهای پایدارسازی با استفاده از مهاریه شامل روش "مهاریه با بلوک" و "مهاریه و شمع گذاری" تشریح می گردد.

۲-۲-۱- روش مهاریه و بلوک

در این روش از یک سری مهاریه پیش تنیده (کابل فولادی یا میلگرد) که به صورت کششی عمل می کند استفاده می شود. یک سمت مهاریه با استفاده از دوغاب سیمان به توده خاک گیردار می شود و سمت دیگر آن به یک بلوک بتنی یا فلزی مهار می گردد. مهمترین کاربرد مهاریه در ساخت دیوارهای دیافراگمی^۱ یا سپری^۲ به روش دوخت از پشت می باشد. بخشی از مهاریه که به کمک دوغاب تزریق شده نیرو را به توده خاک منتقل می کند طول گیردار^۳ نامیده می شود. به قسمتی از طول مهاریه که در محدوده قسمت گیردار و صفحه باربر یا تکیه گاه در ابتدای مهاریه قرار دارد، ناحیه آزاد^۴ گفته می شود [Craigs, 2012].

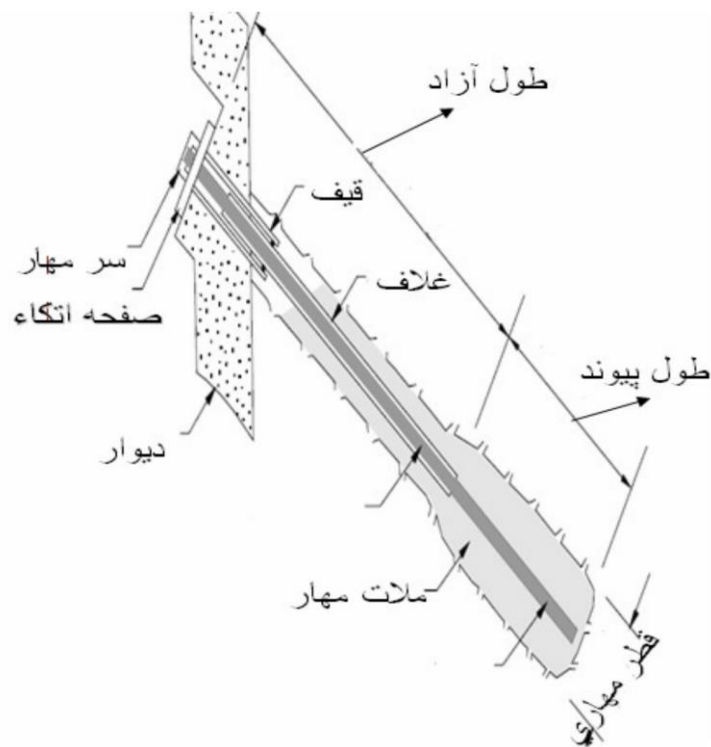
همان طور که گفته شد مهاریه از سه قسمت اصلی سر مهاریه، طول آزاد مهاریه و طول گیردار مهاریه تشکیل شده است. طول گیردار مهاریه در انتهای گمانه حفاری شده قرار می گیرد و در این طول به منظور تامین مقاومت پیوستگی مناسب جهت تامین نیروی مورد نیاز طراحی، لازم است از دوغاب سیمان استفاده شود. طول آزاد در واقع وظیفه انتقال نیرو از طول گیردار به سر مهاریه را دارد. سر مهاریه شامل بلوک بتنی، صفحات فلزی و صفحه گوه به منظور تامین تکیه گاه مناسب می باشد (شکل ۲-۱). مصالح المان مهاریه عمدتاً از کابلهای پرمقاومت (استرند) می باشد. مهمترین مزیت المانهای کابلی، مقاومت مناسب و استفاده از چند کابل در یک گمانه جهت تامین نیروی مورد نیاز می باشد.

¹ Diaphragm wall

² Sheet pile

³ Fixed Length

⁴ Free Length



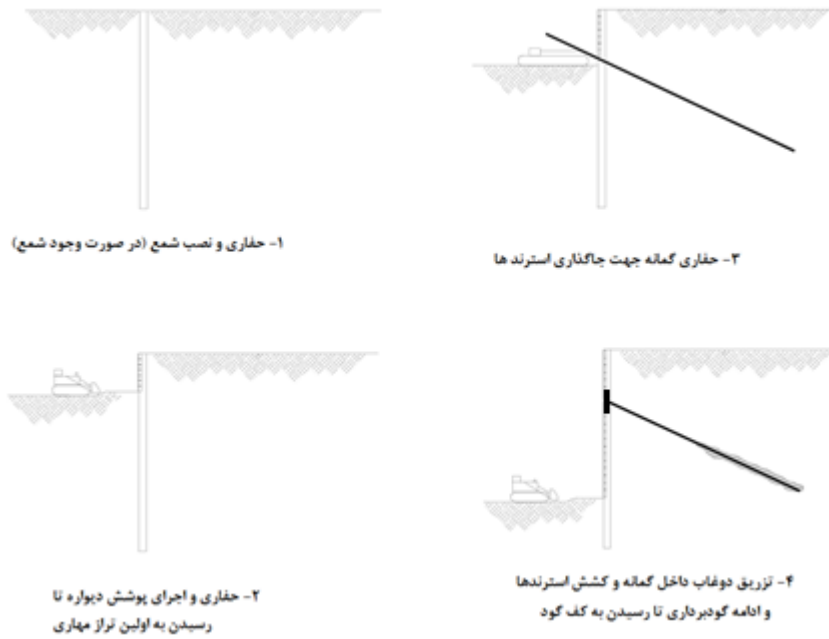
شکل ۲-۱- اجزای تشکیل دهنده مهاری [FHWA-IF-99-015, 1999]

۲-۲-۱- روش اجرای سیستم مهاری و بلوک

روش اجرای این سیستم، به صورت اجرای مرحله ای از بالا به پایین می باشد. ابتدا خاکبرداری مقطعی تا رسیدن به تراز اولین مهاری انجام شده، سپس حفاری گمانه مهاری ها در دیواره انجام و مهاری ها که شامل رشته های فولاد پر مقاومت (استرند) می باشد، نصب می گردد. در مرحله بعد و پس از گیرش اولیه دوغاب تزریق شده در داخل گمانه، کشش استرندها توسط جک هیدرولیکی انجام شده و سپس مهاری تحت کشش قفل شده و بر بلوک بتنی یا فلزی تعبیه شده در دیواره گود تکیه می کند. بعد از اجرا اولین ردیف مهاری و بلوک، عملیات خاکبرداری تا رسیدن به تراز مهاری ردیف دوم انجام شده و مطابق توضیحات فوق ردیفهای بعدی مهاری نیز تا رسیدن به کف گود اجرا می گردد.

مراحل اجرای روش مهاری ها به صورت شماتیک در شکل ۲-۲ ارائه گردیده و یک نمونه مشخصات سر مهاری در شکل ۲-۳ آورده شده است. شکل ۲-۴ نشان دهنده یک نمونه گود مهار شده به روش

مهاری و بلوک می باشد.



شکل ۲-۲- مراحل اجرای مهاری و جزئیات آن [FHWA-IF-99-015, 1999].



شکل ۲-۳- اجزای سر مهاری که توسط دیسک سوراخ دار و انگشتی تحت بار کشش قفل شده است.



شکل ۲-۴- نمونه گود پایدار شده به روش مهاري و بلوک

از مهمترین مزایای این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- کاهش هزینه اجرا: استفاده از المانهای فولادی پر مقاومت (استرند) با ظرفیت باربری بالا باعث افزایش فواصل افقی و قائم مهاري شده که در نهایت منجر به کاهش تعداد المانهای مسلح کننده و کاهش هزینه اجرا می‌گردد.
- کاهش مدت زمان اجرا: افزایش فواصل افقی و قائم بین مهاري منجر به کاهش عملیات اجرایی همچون حفاری و تزریق بخصوص در خاکهای ریزشی می‌گردد. در زمان خاکبرداری نیز به علت فاصله بین مهاري ها و وجود جبهه کار مناسب امکان خاکبرداری سریعتر وجود دارد.
- اعتماد پذیری بسیار بالا به سیستم پایدار سازی در این روش: همان طور که قبلاً نیز بیان شد تمامی مهاري ها تا بار مورد نظر کشیده و قفل می‌شوند، بنابراین بسیج شدن نیروی مورد نظر طراحی مهاري احراز می‌گردد.
- عدم اشغال فضای گود: در روش پایدار سازی به کمک روش مهاري و بلوک از فضای پشت دیواره گود برای پایدارسازی استفاده می‌گردد، بنابراین در انتهای کار هیچگونه معارضی در گود وجود ندارد.

از معایب این روش می توان به نیاز بودن به ماشین آلات مخصوص جهت اجرا و غیر اقتصادی بودن در گودهای به عمق کم، اشاره نمود.

۲-۲-۲- روش مهاری و شمع گذاری (Anchorage and Piling System)

اصول کلی این روش همانند روش بلوک و مهاری است با این تفاوت که بجای استفاده از بلوک در سر مهاری از شمع های قائم استفاده می گردد. در این روش از المان مهاری جهت تامین نیروی محوری و ایجاد نیروی پیش تنیدگی در دیواره گود و از المان قائم شمع بعنوان المان باربر جانبی و ایجاد یکپارچگی عملکرد مهاری ها استفاده می گردد. همچنین در برخی موارد به منظور یکپارچه سازی بهتر سیستم از المانهای افقی در بین شمع ها استفاده می گردد.

در این روش با حفر چاههایی در محل اجرای شمع تا عمق بیشتری نسبت به عمق نهایی گود، المان شمع که می تواند از جنس پروفیل باشد، در چاه قرار داده شده و انتهای آن با استفاده از بتن مسلح گیردار می شود. البته در برخی موارد نیز از شمع های بتنی درجا استفاده می گردد. پس از اجرای شمع ها و خاکبرداری مرحله اول گود، مهاری ها در محل از پیش تعیین شده خود نصب و به اندازه نیروی طراحی کشیده می شوند. روند خاکبرداری و اجرای مهاری ها ادامه می یابد تا اینکه عمق گود به تراز موردنظر برسد. در هر مرحله از خاکبرداری و اجرای مهاری ها فواصل بین شمع ها به کمک یک لایه مش و شاتکریت محافظت می گردد. در برخی مواقع جهت کنترل تغییر مکان های بالای دیواره گود از شمع های فلزی با طول کم (کمتر از عمق گود) استفاده می شود که معمولاً به عنوان "شمع شناور" شناخته می شوند.

از جمله مزایای این روش علاوه بر مزایای روش بلوک و مهاری می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ایجاد یکپارچگی رفتاری بین مهاری ها بدلیل وجود شمع ها
- ضریب اطمینان مناسب در برابر واژگونی کلی و لغزشی دیواره گود
- کنترل مناسب تر تغییر شکل های دیواره گود در مجاورت ساختمانهای حساس به تغییر شکل

البته باید به این نکته توجه داشت که وجود المان شمع در داخل گود باعث ایجاد تداخل با المانهای سازه اصلی شده که نیاز به جانمایی مناسب شمعها دارد.

در شکل های ۵-۲ تا ۸-۲ چند تصویر از گودهای پایدار شده به روش مهاری و شمع آورده شده است.



شکل ۵-۲- پایدارسازی دیواره گود به کمک روش مهاری و شمع فلزی



شکل ۲-۶- پایدارسازی دیواره گود به کمک روش مهارى و شمع بتنى



شکل ۲-۷- انجام عملیات کشش استرند توسط جک هیدرولیکی مخصوص



شکل ۲-۸- استفاده از روش شمع فلزی و مهاری در مجاورت ساختمان همسایه

۲-۳- مروری بر تحقیقات گذشته

۲-۳-۱- جابجایی افقی دیواره گود

نخستین بار [Clough et al., 1989] با استفاده از مطالعه تعدادی از گودهای پایدار شده با استفاده از سپری در رس نرم و به روش المان محدود دو بعدی و در شرایط کرنش صفحه ای^۱، روشی را جهت تخمین مقدار جابجایی افقی دیواره گود ارائه نمود. در این روش با استفاده از پارامترهای سختی موثر سیستم^۲ $\left(\frac{EI}{\gamma_w S_v^4}\right)$ و ضریب اطمینان بالازدگی کف، مقدار جابجایی جانبی دیواره گود محاسبه می گردد. در رابطه فوق الذکر E مدول یانگ دیوار، I ممان اینرسی مقطع دیوار به طول واحد، γ_w وزن مخصوص آب و S_v متوسط فاصله مهارها در راستای قائم می باشد.

روش جدیدی توسط [Bryson and Zapata-medina, 2012] جهت بهبود نقص های روش [Clough et al., 1989]، به کمک مطالعه گودهای پایدار شده به روش شیت پایل و مهار متقابل در خاک رس اشباع ارائه گردید. در این روش پارمتر سختی نسبی^۳ به صورت زیر تعریف شده است:

$$R = \frac{E_s}{E} \cdot \frac{S_h S_v H}{I} \cdot \frac{\gamma_s H e}{S_u} \quad (1-2)$$

که در رابطه فوق

R: سختی نسبی

Es: مدول سکانت خاک به ازای ۵۰ درصد تنش گسیختگی

E: مدول الاستیسیته مصالح دیوار

I: ممان اینرسی مقطع دیوار به طول واحد

S_h و S_v : به ترتیب متوسط فواصل مهارها (استرات ها) در راستای قائم و افق

¹ Plane Strain

² Effective System Stiffness

³ Relative Stiffness Ratio

H: عمق دیوار

He: عمق گود

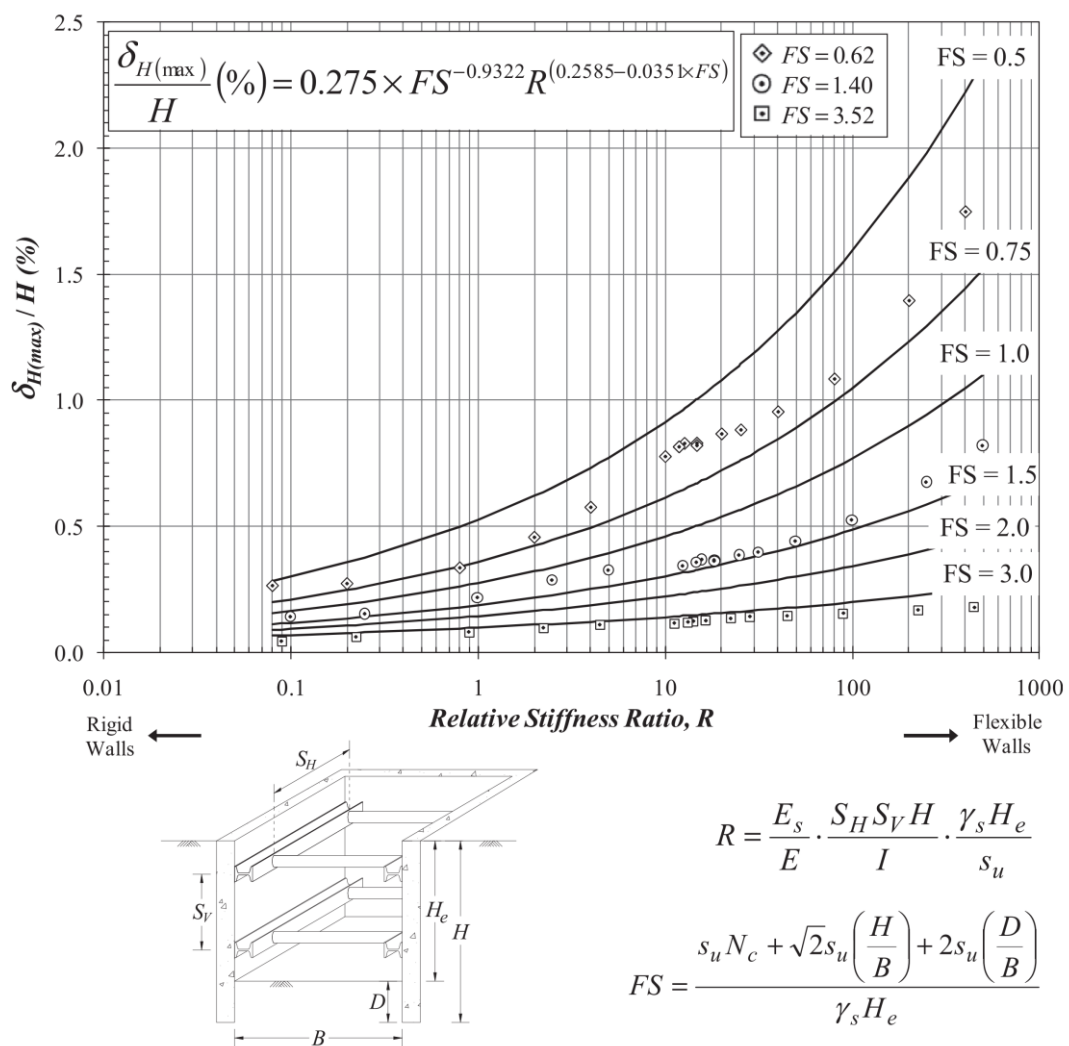
γ_s : متوسط وزن مخصوص خاک

S_u : مقاومت زهکشی نشده خاک در تراز کف گود می باشد.

پارامتر R با نتایج حاصل از مطالعه پارامتریک به روش المان محدود سه بعدی مقایسه گردید. مطابق

نتایج بدست آمده حداکثر جابجایی جانبی دیواره گود مطابق شکل ۲-۹ می باشد، در این نمودار FS

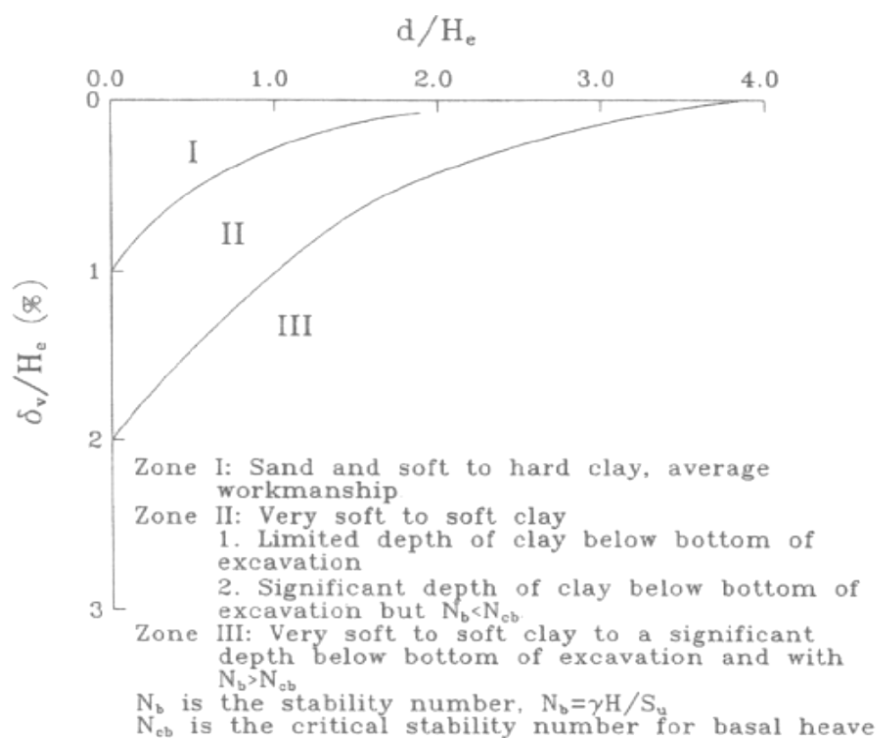
ضریب اطمینان بالازدگی کف می باشد.



شکل ۲-۹- جابجایی حداکثر افقی دیواره گود براساس روش پیشنهادی [Bryson and Zapata-medina, 2012]

۲-۳-۲- نشست سطح زمین ناشی از گودبرداری

اولین روش برای تخمین نشست حاصل از گودبرداری توسط [Peck, 1969] ارائه گردید. در این روش که براساس مطالعات انجام شده بر روی گودهای پایدار شده با سیستم سپری یا سولجر پایل^۱ به وجود آمده است، نشست سطح زمین بسته به نوع خاک براساس فاصله آن از لبه گود توسط نمودارهایی مطابق شکل ۲-۱۰ محاسبه و تخمین زده می شود.



شکل ۲-۱۰- نشست سطح زمین در مجاورت گود [Peck, 1969]

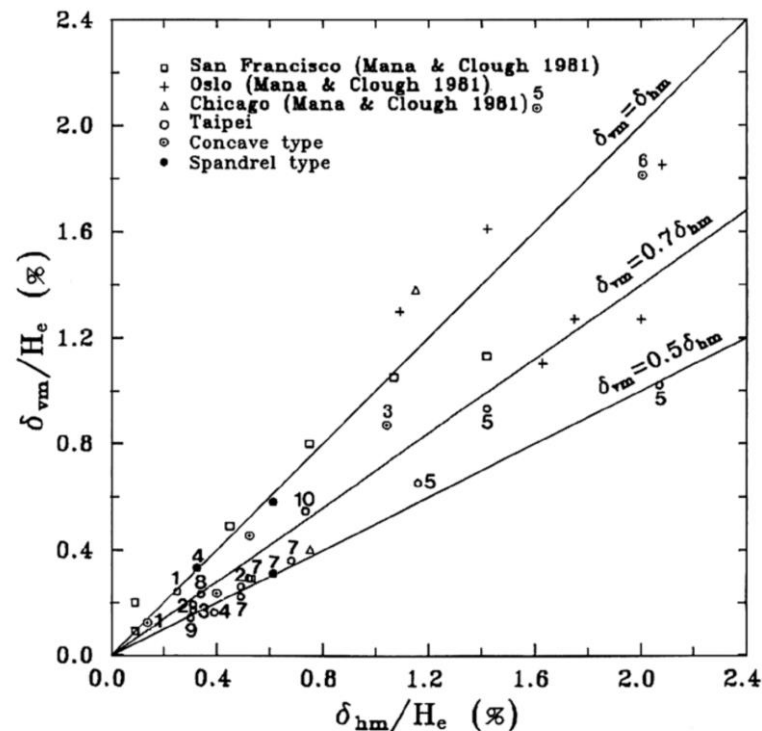
بسیاری از محققین حداکثر مقدار نشست سطح زمین را به صورت تابعی از مقدار حداکثر جابجایی افقی دیواره گود پیشنهاد داده اند.

[Clough and O'Rourke, 1990] و [Hsieh and Ou, 1998]، نشست حداکثر سطح زمین به صورت رابطه (۲-۲) بیان نموده اند:

¹ Soldier pile

$$\delta V(\max) = \alpha \delta H(\max) \quad (2-2)$$

در رابطه فوق δv و δv به ترتیب حداکثر جابجایی افقی و قائم می باشد، α ضریبی بین ۰/۵ تا ۱ بوده که مقدار دقیق آن به شرایط خاک، عملیات اجرایی و سختی دیوار بستگی دارد. شکل ۲-۱۱ نشست حداکثر سطح زمین را نشان می دهد [Hsieh and Ou, 1998].



شکل ۲-۱۱- حداکثر نشست سطح زمین در مجاورت گود براساس مقدار حداکثر جابجایی افقی دیواره (در نمودار فوق H_e ارتفاع گود می باشد) [Hsieh and Ou, 1998]

[Bryson and Zapata-Medina, 2007] اطلاعات جمع آوری شده از چندین پروژه مورد مطالعه را در خاکهای رس نرم، رس متوسط و رس سفت ارائه نمودند. آنها رس نرم را خاک ریزدانه با چسبندگی زهکشی نشده بین صفر تا ۲۵ کیلوپاسکال، تعریف کردند، طبق تعریف، رس متوسط دارای چسبندگی زهکشی نشده بین ۲۵ تا ۵۰ کیلوپاسکال و رس سفت دارای چسبندگی زهکشی نشده بیش از ۵۰ کیلوپاسکال می باشد. جدول ۲-۱ مشخصات کلی مطالعات موردی انجام شده شامل نوع دیوار، فواصل افقی و قائم مهارها، وزن خاک، ممان اینرسی مهارها (استرات ها) و ... را نشان می دهد.

جدول ۱-۲ - مشخصات کلی مطالعات موردی انجام شده توسط [Bryson and Zapata-Medina, 2007]

Soil Type	Case	Reference	Wall Type	S _v [m]	S _h [m]	γ _s [kN/m ³]	s _u [kPa]	I [m ⁴ /m]	E [GPa]	FS _{bh}
Stiff Clay	St1	Ng (1992)	Diaph.	3.2	1.5	20	120	0.01800	31	3.73
	St2	Burland and Hancock (1977)	Diaph.	3.2	3.2	20	170	0.06075	27.6	3.99
	St3	Hsieh and Ou (1998)	Diaph.	3.3	3.3	19	76.5	0.06075	27.6	1.26
	St4	Poh et al. (1997)	Diaph.	4.3	6	20.75	80	0.01800	NA	2.05
	St5	Ou and Shiau (1998)	Diaph.	3.3	3.3	19.7	50	0.01800	12	1.51
	St6	Whittle et al. (1993)	Diaph.	3	slab	20.24	91	0.06075	23	1.32
	St7	Liao and Hsieh (2002)	Diaph.	2.65	1.92	20	77.5	0.04267	27.6	1.38
	St8	Liao and Hsieh (2002)	Diaph.	2.33	1.85	20	65	0.14400	27.6	0.99
	St9	Becker and Haley (1990)	Diaph.	3.35	slab	18	70	0.03516	23.2	1.21
	St10	Ulrich (1989)	Secant	2.45	2.45	20.1	140	0.03516	27.6	3.62
Medium Clay	M1	Ou et al. (1998)	Diaph.	3.4	slab	18.9	50	0.06075	27.6	0.96
	M2	Finno and Roboski (2005)	Sheet	4	2.29	19	36	0.00025	200	1.08
	M3	Finno and Roboski (2005)	Sheet	4	2.29	20	36	0.00025	200	0.80
	M4	Hsieh and Ou (1998)	Diaph. Steel-Conc.	2.85	2.85	19	47.5	0.04267	27.6	0.97
	M5	Miyoshi (1977)	Diaph. Steel-Conc.	2.7	2.7	19	42	0.04267	27.6	0.99
	M6	Finno et al. (1989)	Sheet	2.5	2.5	19	30	NA	200	1.10
	M7	NGI (1962)	Sheet	1.7	1.7	19	30	NA	200	1.16
	M8	Clough and Buchignani (1981)	Diaph.	3	3	17	44	0.08333	25	0.98
	M9	Wang et al. (2005)	Diaph.	4	3	18	35	0.04267	NA	0.85
	M10	Peck (1969)	Sheet	1.68	1.68	19	27.5	NA	200	1.35
Soft Clay	So1	Finno et al. (2002)	Secant	3.8	6.1	19.1	20	0.06075	12.65	0.59
	So2	Goh et al. (2003)	Diaph.	2.5	9	17.6	10	0.04267	30	0.31
	So3	Hu et al. (2003)	Diaph.	3.5	9	18	22	0.04267	21.7	0.73
	So4	Gill and Lukas (1990)	Sheet	2.5	2.5	19	22.7	NA	200	1.93
	So5	Teparaksa (1993)	Sheet	2.5	2.5	16	13.5	0.00025	200	0.62
	So6	Baker et al. (1987)	Diaph.	2.75	2.75	19	21.5	0.03658	26	0.93
	So7	Konstantakos (2000)	Diaph.	3.65	3.65	19	45	0.03658	26	1.25
	So8	Clough and Buchignani (1981)	Soldier	3	3	17	25	0.03516	26	1.69
	So9	Kort (2002)	Sheet	7.75	7.2	14	20	NA	200	1.63
	So10	Koutsofias et al. (2000)	Soldier	3.3	6	16.5	25	0.06280	27.6	1.42

در جدول ۱-۲، S_v و S_h به ترتیب متوسط فواصل قائم و افقی مهارها (استرات ها)، γ_s و S_u به ترتیب وزن مخصوص و چسبندگی زهکشی نشده خاک رس، I و E به ترتیب ممان اینرسی و مدول یانگ مصالح دیوار و FS_{bh} ضریب اطمینان کف گود در مقابل بلند شدگی می باشد. سایر اطلاعات از قبیل مقادیر جابجایی ثبت شده در جدول ۲-۲ آورده شده است.

جدول ۲-۲- اطلاعات اندازه گیری شده توسط [Bryson and Zapata-Medina, 2007]

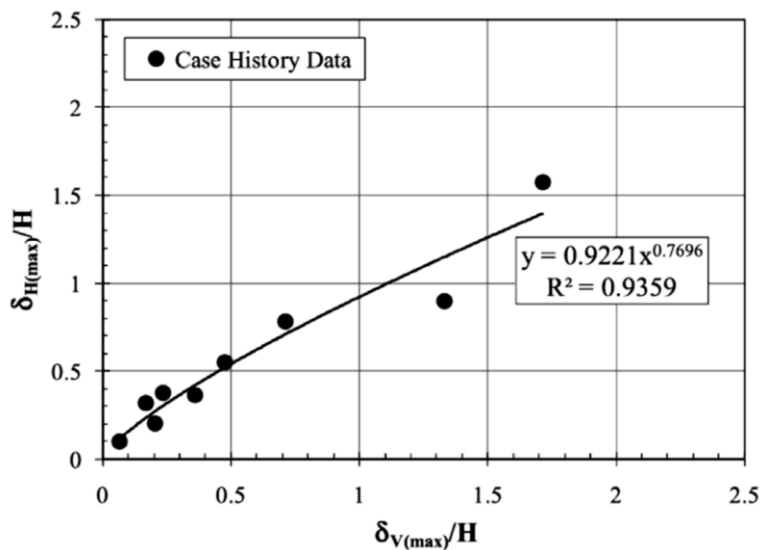
Soil Type	Case	Reference	Wall Type	I [m ⁴ /m]	E [GPa]	$\delta_{H(max)}$ [mm]	$\delta_{V(max)}$ [mm]	$\frac{\delta_{H(max)}}{H}$ [%]	$\frac{\delta_{V(max)}}{He}$ [%]	FS _{bh}
Stiff Clay	St1	Ng (1992)	Diaph.	0.01800	31	17.66	10.13	0.108	0.106	3.73
	St2	Burland and Hancock (1977)	Diaph.	0.06075	27.6	24.06	19.53	0.080	0.106	3.99
	St3	Hsieh and Ou (1998)	Diaph.	0.06075	27.6	124.76	77.76	0.378	0.389	1.26
	St4	Poh et al. (1997)	Diaph.	0.01800	NA	10.02	NA	0.072		2.05
	St5	Ou and Shiau (1998)	Diaph.	0.01800	12	44.53	NA	0.194		1.51
	St6	Whittle et al. (1993)	Diaph.	0.06075	23	53.61	45.00	0.209	0.223	1.32
	St7	Liao and Hsieh (2002)	Diaph.	0.04267	27.6	81.37	NA	0.301		1.38
	St8	Liao and Hsieh (2002)	Diaph.	0.14400	27.6	54.30	NA	0.143		0.99
	St9	Becker and Haley (1990)	Diaph.	0.03516	23.2	47.26	101.60	0.182		1.21
	St10	Ulrich (1989)	Secant	0.03516	27.6	14.75	NA	0.074		3.62
Medium Clay	M1	Ou et al. (1998)	Diaph.	0.06075	27.6	106.51	77.18	0.304	0.392	0.96
	M2	Finno and Roboski (2005)	Sheet	0.00025	200	43.23	NA	0.262		1.08
	M3	Finno and Roboski (2005)	Sheet	0.00025	200	63.48	74.00	0.334	0.578	0.80
	M4	Hsieh and Ou (1998)	Diaph.	0.04267	27.6	62.61	43.16	0.202	0.235	0.97
	M5	Miyoshi (1977)	Conc.	0.04267	27.6	176.56	152.42	0.552	0.897	0.99
	M6	Finno et al. (1989)	Sheet	NA	200	172.64	255.70	0.899	2.096	1.10
	M7	NGI (1962)	Sheet	NA	200	223.58	200.00	1.397	1.818	1.16
	M8	Clough and Buchignani (1981)	Diaph.	0.08333	25	28.25	NA	0.093		0.98
	M9	Wang et al. (2005)	Diaph.	0.04267	NA	48.12	30.90	0.127	0.150	0.85
	M10	Peck (1969)	Sheet	NA	200	228.87	210.00	1.635	2.471	1.35
Soft Clay	So1	Finno et al. (2002)	Secant	0.06075	12.65	38.13	27.43	0.208	0.225	0.59
	So2	Goh et al. (2003)	Diaph.	0.04267	30	38.55	NA	0.124		0.31
	So3	Hu et al. (2003)	Diaph.	0.04267	21.7	15.39	7.00	0.073	0.061	0.73
	So4	Gill and Lukas (1990)	Sheet	NA	200	83.27	NA	0.496		1.93
	So5	Teparaksa (1993)	Sheet	0.00025	200	123.65	NA	0.687		0.62
	So6	Baker et al. (1987)	Diaph.	0.03658	26	37.39	37.00	0.204	0.435	0.93
	So7	Konstantakos (2000)	Diaph.	0.03658	26	3.63	NA	0.026		1.25
	So8	Clough and Buchignani (1981)	Soldier	0.03516	26	107.06	NA	0.351		1.69
	So9	Kort (2002)	Sheet	NA	200	385.38	NA	2.028		1.63
	So10	Koutsoftas et al. (2000)	Soldier	0.06280	27.6	48.10	30.20	0.117	0.231	1.42

در جدول فوق $\delta_{H(max)}$ و $\delta_{V(max)}$ به ترتیب حداکثر جابجایی افقی دیوار و حداکثر نشست

زمین، H و He به ترتیب عمق دیوار و عمق گود می باشد.

در شکل ۲-۱۲ رابطه بین حداکثر نشست و حداکثر جابجایی افقی دیوار طبق اندازه گیری های ثبت شده (جدول ۲-۲) نشان داده شده است. مطابق نتایج بدست آمده حداکثر جابجایی افقی به مشخصات مکانیکی سیستم سازه نگهبان (طول دیوار، سختی دیوار و ...) وابستگی بیشتری دارد در حالیکه نشست

ماکزیمم بیشتر به مشخصات و رفتار خاک مرتبط می باشد [Bryson and Zapata-Medina, 2007].

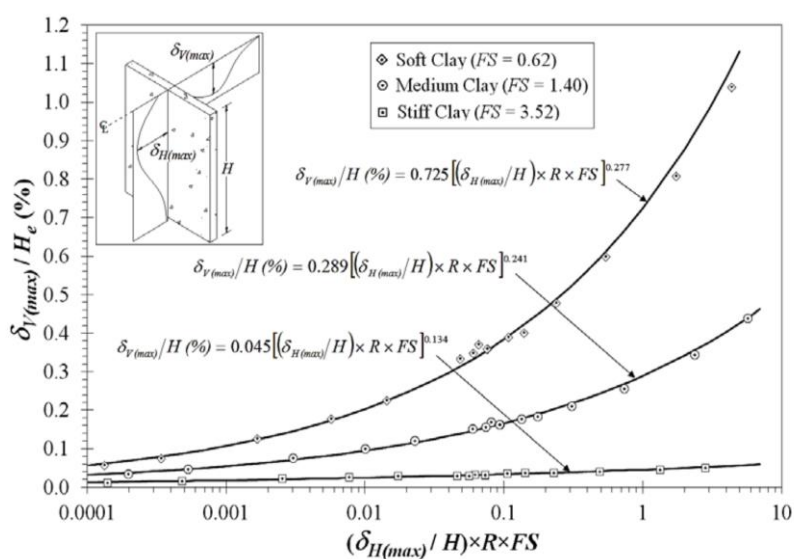


شکل ۲-۱۲- رابطه حداکثر جابجایی افقی و نشست گود براساس نتایج مطالعات موردی انجام شده توسط [Bryson and Zapata-Medina, 2007]

براساس مطالعات بعدی انجام شده توسط [Bryson and Zapata-Medina, 2012]، حداکثر نشست و

جابجایی جانبی ایجاد شده ناشی از گودبرداری را می توان براساس پارامتر سختی نسبی R (رابطه ۲-

۱) و ضریب اطمینان بلند شدگی کف FS_{bh} ، بیان نمود (شکل ۲-۱۳).



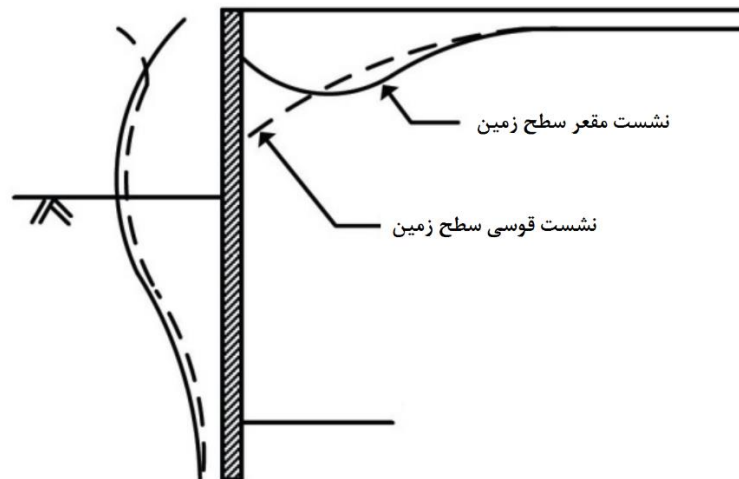
شکل ۲-۱۳- رابطه بین پارامترهای R و FS_{bh} و حداکثر جابجایی افقی و نشست گود [Bryson and Zapata-Medina, 2012]

۲-۳-۳- پروفیل نشست سطح زمین بر اثر گودبرداری

اولین مطالعه در مورد پروفیل نشست سطح زمین در مجاورت گود توسط [Hsieh & ou, 1998] انجام شد، طبق نتایج ارائه شده نشست زمین مجاور گود ممکن است به دو صورت قوسی^۱ و مقعر^۲ باشد. در حالت نشست قوسی بیشترین نشست و بیشترین جابجایی افقی دیواره گود در لبه بالایی دیواره بوجود می آید و در حالت نشست مقعر بیشترین جابجایی افقی دیواره در عمق بوده و بیشترین نشست زمین نیز در فاصله ای از لبه گود اتفاق می افتد.

شکل پروفیل نشست به نحوه جابجایی افقی دیواره وابسته می باشد. در حالتی که بیشترین جابجایی افقی دیواره گود در مراحل ابتدایی گودبرداری اتفاق بیفتد و پس از آن مقدار جابجایی افقی در حین گودبرداری کاهش یابد، پروفیل نشست سطح زمین به صورت قوسی می باشد و در صورتی که در مراحل اولیه گودبرداری تغییر شکل افقی دیواره کم باشد و سپس در مراحل پایانی افزایش یابد، نشست سطح زمین به صورت مقعر خواهد بود [Hsieh & ou, 1998].

شکل ۲-۱۴ دو نوع پروفیل نشست ذکر شده را نشان می دهد.



شکل ۲-۱۴- انواع پروفیل نشست سطح زمین و جابجایی دیواره گود [Hsieh & ou, 1998]

^۱ Spandrel

^۲ Concave

طبق نتایج تحقیقات بعدی انجام شده توسط [Hsieh & ou, 2011] مشخص گردید پارامترهای مختلفی بر مقدار نشست و همچنین محدوده نشست بر اثر گودبرداری در خاک رس نرم تاثیر گذار هستند، این پارامترهای شامل عمق و عرض گودبرداری، عمق لایه خاک نرم و سخت می باشند. بر این اساس پارامترهای PIZ^1 و SIZ^2 معرفی گردید به گونه ای که در داخل محدوده PIZ تغییرات نشست سطح زمین زیاد بوده به گونه ای که ساختمان های مجاور تحت تاثیر نشست ناشی از گودبرداری بوده در حالیکه در محدوده SIZ تغییرات نشست ملایم بوده به گونه ای که نشست ناشی از گودبرداری بر ساختمان های مجاور تاثیری کمی خواهد داشت. براساس مطالعات پارامتریک انجام شده سختی سیستم نگهدارنده دیواره (دیوار دیافراگمی و استرات ها) سبب کاهش نشست سطح زمین شده لیکن بر محدوده ناحیه PIZ تاثیر ناچیزی دارد [Hsieh & ou, 2011].

در صورتی که عمق لایه سخت زیر رس نرم قابل توجه باشد، پارامتر PIZ به صورت ذیل تعریف می گردد:

$$PIZ=2H_e \quad (\text{for } \sqrt{B^2 + H_e^2} < 2H_e) \quad (3-2)$$

$$PIZ=\sqrt{B^2 + H_e^2} \quad (\text{for } \sqrt{B^2 + H_e^2} > 2H_e) \quad (4-2)$$

و در صورتی که لایه سخت زیر لایه رس نرم دارای عمق کمی باشد، پارامتر PIZ به صورت ذیل تعریف می گردد:

$$PIZ=\min(2H_e, H_g) \quad (\text{for } \sqrt{B^2 + H_e^2} < 2H_e) \quad (5-2)$$

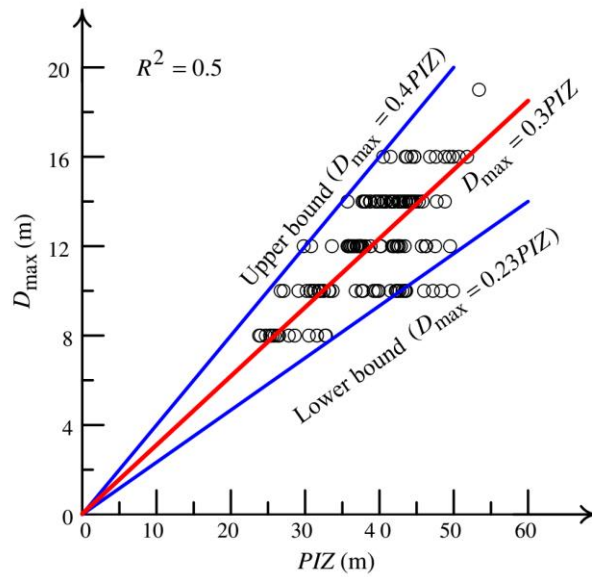
$$PIZ=\min(\sqrt{B^2 + H_e^2}, H_g) \quad (\text{for } \sqrt{B^2 + H_e^2} > 2H_e) \quad (6-2)$$

که در روابط فوق H_e عمق گود، H_g عمق لایه سخت و B عرض گود می باشد.

رابطه حداکثر نشست سطح زمین و پارامتر PIZ در شکل ۲-۱۵ نشان داده شده است [Hsieh & ou,

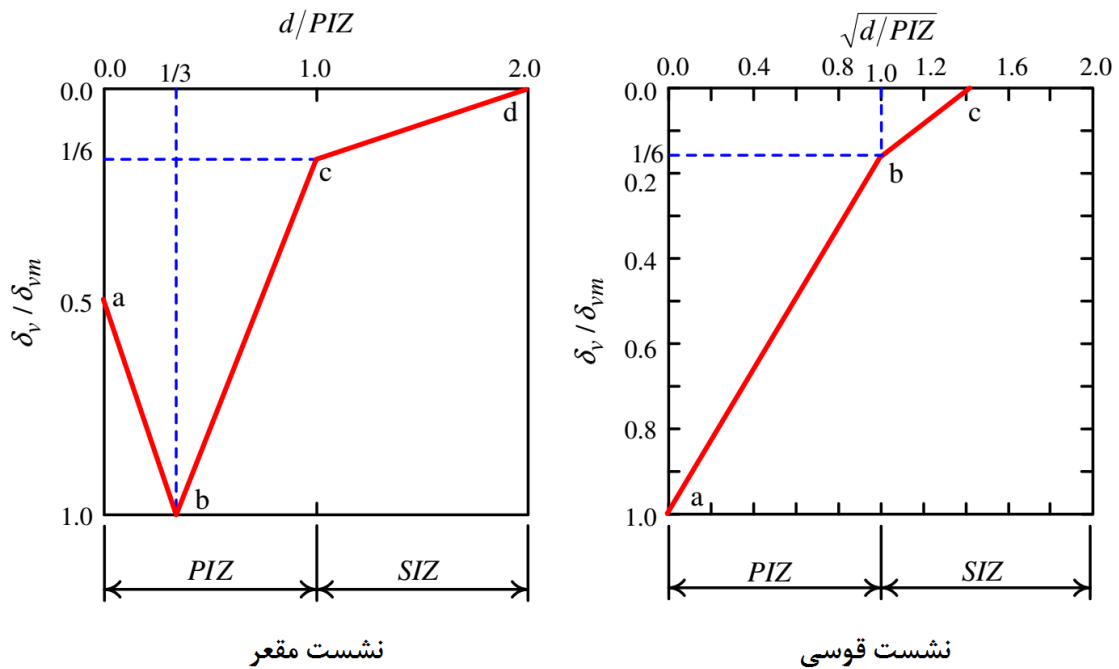
¹ Primarily Influence zone

² Secondary Influence zone



شکل ۲-۱۵- تغییرات موقعیت نشست حداکثر براساس پارامتر PIZ در خاک رس نرم [Hsieh & ou, 2011]

پروفیل نشست زمین در مجاورت گود به صورت شکل ۲-۱۶ ارائه گردید [Hsieh & ou, 2011].



شکل ۲-۱۶- پروفیل نشست سطح زمین در مجاورت گود در خاک رس نرم [Hsieh & ou, 2011]

۲-۳-۴- مسیر تنش

مشخصات مهندسی خاک از قبیل پارامترهای مقاومت برشی و سختی خاک تابع تاریخچه تنش خاک^۱ و حالت تنش^۲ نیز می باشند. به عنوان مثال پیش تحکیمی سبب افزایش سختی (و در نتیجه کاهش تغییر شکل) خاک می گردد. در روابط ارائه شده در مراجع مختلف، سختی خاک (مدول الاستیسیته) با جذر نسبت پیش تحکیمی^۳ نسبت مستقیم دارد. مفهوم مسیر تنش^۴ اولین بار توسط [Lambe, 1967] براساس مطالعات آزمایشگاهی و صحرایی معرفی گردید.

طبق [Lambe, 1967] مسیر تنش المان های کم عمق نزدیک به سطح زمین در مراحل ابتدایی گودبرداری به صورت باربرداری می باشد، به گونه ای که تنش افقی کم شده در حالیکه مقدار تنش قائم ثابت می باشد.

[NG, 1999] مسیر تنش مشاهده شده در خاک مجاور دیوار دیافراگمی در حین گودبرداری را با نتایج حاصل از آزمایش های سه محوری مقایسه نمود. مطابق نتایج بدست آمده مسیر تنش موثر در مجاور دیوار در سمت داخل گود مشابه مسیر تنش در آزمایش های سه محوری کششی زهکشی نشده می باشد، در حالیکه مسیر تنش در خاک پشت دیوار با نتایج آزمایش های سه محوری فشاری مطابقتی نداشت.

[Hashash and Whittle, 2002] از تحلیل المان محدود غیر خطی جهت بررسی فشار جانبی خاک در دیوار دیافراگمی مهار شده (braced diaphragm) و مکانیزم قوس زدگی^۵ خاک استفاده نمود. طبق نتایج بدست آمده خاک جلو دیوار در مرحله نهایی گودبرداری (نقطه E1 در شکل ۲-۱۷) از مسیر گسیختگی حالت مقاوم در شرایط کرنش صفحه ای تبعیت می کند. از سوی دیگر خاک پشت دیوار دارای مسیر تنش پیچیده ای می باشد (شکل ۲-۱۸).

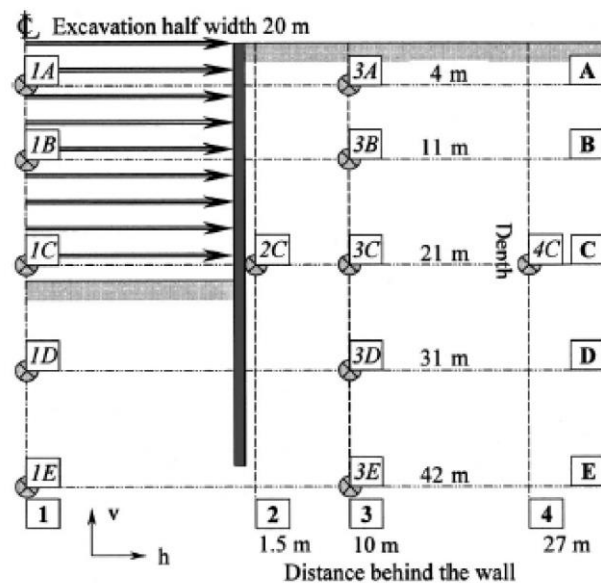
¹ Stress History

² Stress State

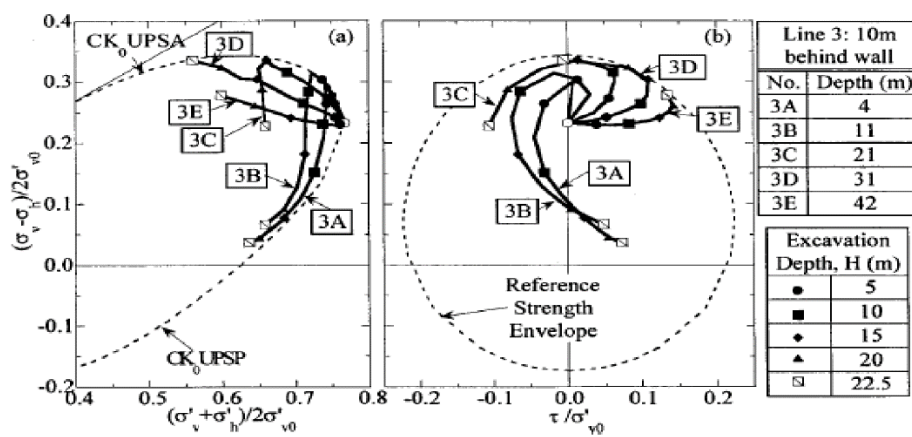
³ Over Consolidation Ratio (OCR)

⁴ Stress Path

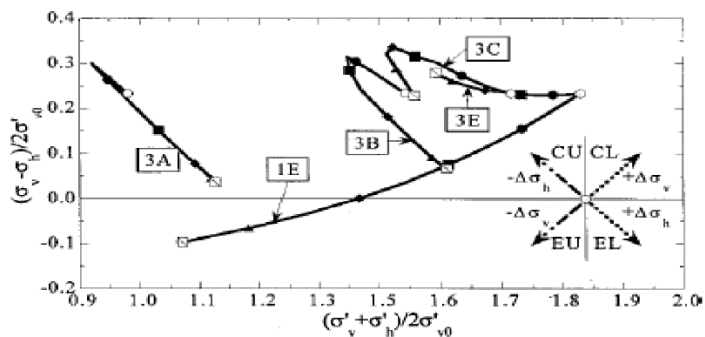
⁵ Arching



شکل ۲-۱۷- موقعیت المان های خاک در مطالعات انجام شده توسط [Hashash and Whittle, 2002]



(a)



(b)

شکل ۲-۱۸- مسیر تنش موثر (شکل a) و مسیر تنش کل (شکل b) برای المان های خاک با فاصله ۱۰ متر از دیوار دیافراگمی [Hashash and Whittle, 2002]

[Lim & ou, 2016] با هدف تعیین دقیق سختی خاک در آنالیز گودبرداری، وضعیت تنش خاک را در حین گودبرداری با استفاده از روش المان محدود مورد مطالعه قرار دادند. مطابق نتایج بدست آمده در مدل رفتاری سخت شونده و در شرایط زهکشی نشده، تنش های خارج صفحه ای سهم بسزایی در مسیر تنش موثر خاک دارد، به علاوه بیشتر خاک پشت و جلو گود دارای رفتار الاستیک می باشند. اگر چه مسیر تنش موثر در خاک مجاور دیوار دیافراگمی دچار تسلیم می شود، لیکن رفتار غالب خاک این محدوده در ناحیه الاستیک می باشد. بنابراین پارامترهای خاک در حالت باربرداری- بارگذاری مجدد در تحلیل گودبرداری حاکم می باشد. در صورتی که مقاومت زهکشی نشده و مدول باربرداری- بارگذاری مجدد خاک به دقت تعیین شوند، مدل رفتاری سخت شونده نیز نتایج قابل قبولی را ارائه می نماید.

۲-۳-۵- تحقیقات انجام شده در خصوص مدل‌های رفتاری خاک در تحلیل گودبرداری

امروزه برنامه های کامپیوتری مختلفی از قبیل PLAXIS، FLAC و ... جهت تحلیل گودبرداری وجود داشته، همچون مدل‌های رفتاری مختلفی از الاستیک خطی تا الاستو-پلاستیک غیر خطی در دهه های اخیر ارائه گردیده اند. با این وجود انتخاب مدل رفتاری مناسب جهت محاسبه تغییر شکل های ناشی از گودبرداری به روش عددی مسئله مهمی می باشد.

[Hsiung and Dao, 2014] با استفاده آنالیز برگشتی یک گود مهار شده با سیستم دیوار دیافراگمی و استرات در خاک ماسه ای توسط نرم افزار PLAXIS، سه مدل رفتاری شامل مور- کولمب (MC)، سخت شونده (HS) و سخت شونده با در نظرگیری اثر کرنش کوچک (HSS) را بررسی نمودند. مطابق نتایج بدست آمده مدل رفتاری HSS بهترین مدل و مدل رفتاری MC کم دقت ترین مدل جهت تخمین تغییر شکل‌های ناشی از گودبرداری می باشد. کاستی های مدل رفتاری MC در تخمین تغییر شکل های پروژه شامل موارد ذیل می باشد:

- نشست سطح زمین در مجاورت دیوار غیر منطقی شده است، به گونه ای که جهت نشست در

نزدیکی دیوار به سمت بالا بوده و سپس تغییر می کند. مقدار نشست سطح زمین در نزدیکی دیوار نیز کمتر از مقادیر اندازه گیری شده می باشد. در حالیکه مدل های رفتاری HS و HSS مقادیر محاسباتی همخوانی بهتری با نتایج اندازه گیری شده دارد.

• طول ناحیه SIZ در مدل رفتاری MC (و همچنین HS) بیش از مقادیر گزارش شده توسط سایر محققین محاسبه گردیده، همچنین مقدار نشست در این ناحیه بیش از مقدار ثبت شده توسط سایر محققین می باشد. لیکن مدل رفتاری HSS نتایج منطقی تری ارائه نموده است. براساس نتایج آنالیز برگشتی مدول الاستیسیته E' در مدل رفتاری MC و مدول الاستیسیته رفرنس E_{50}^{ref} در مدل های رفتاری HS و HSS، براساس عدد SPT توسط روابط زیر تخمین زده شده است (Hsiung and Dao, 2014):

$$E' = 2000 N (kpa) \quad (7-2)$$

$$E_{50}^{ref} = 1200 N (kpa) \quad (8-2)$$

۲-۴- جمع بندی مطالعات پیشین و مقایسه آن با تحقیق حاضر:

در بخش قبل نتایج تحقیق برخی از محققین در رابطه با تحلیل گودبرداری آورده شد. همان طور که مشاهده می گردد تحقیقات قبلی انجام شده در گودهای با سیستم سپری، دیوار دیافراگمی یا مهار متقابل بوده که معمولاً شامل خاک رس نرم اشباع یا ماسه می باشند. موضوع تحقیق حاضر در مورد تغییر شکل های ناشی از گودبرداری در خاک رس سفت خشک و ماسه به روش انکرینگ به همراه شمع شناور می باشد. همچنین در این پایان نامه در خصوص انتخاب آزمایش ژئوتکنیکی مناسب (با تمرکز بر آزمایش پرسیمتری) جهت برآورد مدول الاستیسیته خاک در تحلیل گودبرداری بحث شده است.

فصل سوم:

معرفی پروژه مورد مطالعه

۳-۱- مقدمه

در این بخش ابتدا مشخصات کلی پروژه مورد مطالعه از قبیل موقعیت، ابعاد و ... آورده شده، سپس جهت آشنایی با وضعیت ژئوتکنیکی پروژه به مطالعات ژئوتکنیک انجام شده پرداخته می شود و در ادامه به معرفی سیستم سازه نگهبان اجرا شده در پروژه پرداخته شده است.

۳-۲- مشخصات کلی پروژه

پروژه جهان مال واقع در مشهد ضلع جنوب شرقی میدان جانباز می باشد که در زمینی به مساحت ۶۵۰۰۰ مترمربع واقع شده و دارای ۲۵ الی ۳۰ طبقه خواهد بود که طبقات ۵- تا ۵+ آن با سطح اشغال صد در صد و بقیه طبقات دارای سطح اشغال کمتر خواهد بود. عمق گودبرداری نیز در کل زمین ۲۵ متر می باشد. عملیات حفاری گمانه ها در مهر ماه ۱۳۹۳ آغاز گردید.

۳-۳- مطالعات ژئوتکنیک انجام شده در پروژه

برای انجام مطالعات ژئوتکنیک مجتمع جهان مال، ۳۳ گمانه شامل ۱۳ گمانه ماشینی تا عمق حداکثر ۹۰ متر در میانه‌ی زمین محل پروژه و ۲۰ حلقه گمانه ماشینی تا عمق ۳۰ متر و به روش روتاری حفاری گردید (شکل ۳-۱). مطالعات انجام شده شامل کاوش های صحرایی نظیر آزمایش های نفوذ استاندارد در تمامی گمانه ها (طبق استاندارد ASTM D1586)، آزمایش پرسیمتری در ۳ گمانه BH30-3، BH90-30 و BH90-33 (ASTM D1195) و آزمایش سرعت موج برشی (Downhole) می باشد، شکل ۳-۲ موقعیت گمانه ها را نشان می دهد. آزمون های آزمایشگاهی شامل دانه بندی (ASTM D422)، هیدرومتری (ASTM C117)، سه محوری (ASTM D2850، ASTM D4767)، برش مستقیم (ASTM D3080)، تحکیم (ASTM D2435)، رمبندگی (ASTM D5333)، نفوذپذیری (ASTM D2434)، تورم (ASTM D4546) و آزمایش های شیمی می باشد.

با توجه به اهمیت مدول الاستیسیته خاک در محاسبه میزان تغییر شکل های گود، در ادامه نتایج آزمایش های پرسیومتری (جدول ۳-۱ و شکل های ۳-۳ و ۳-۴) و SPT (جهت برآورد مدول الاستیسیته) آورده شده است. لازم به ذکر است جهت تحلیل نتایج خام آزمایش پرسیومتری به منظور تعیین مدول منارد می توان از نشریه ۲۲۳ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور استفاده نمود.



شکل ۳-۱- حفاری گمانه و انجام آزمایش صحرایی پرسیومتری در محل پروژه

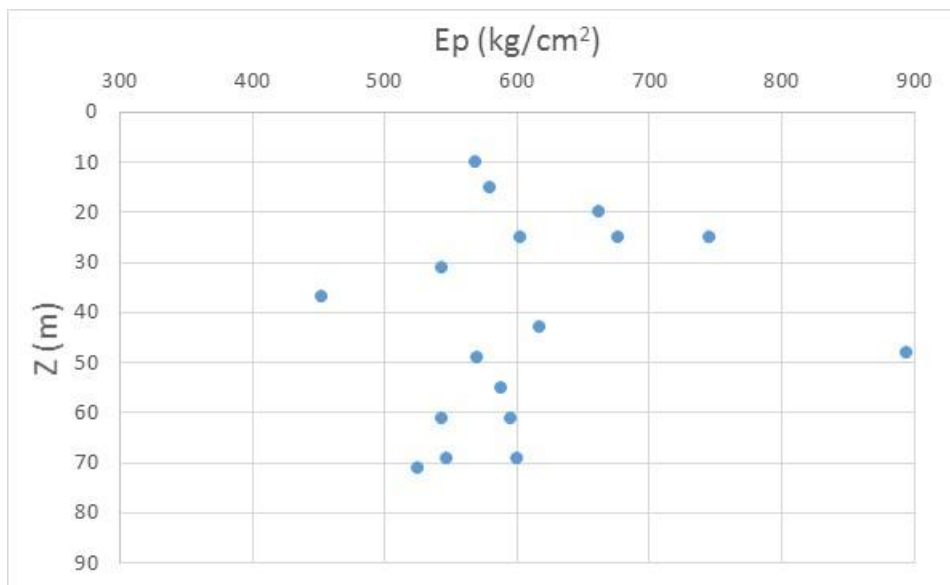


شکل ۳-۲- موقعیت گمانه های حفاری شده در پروژه

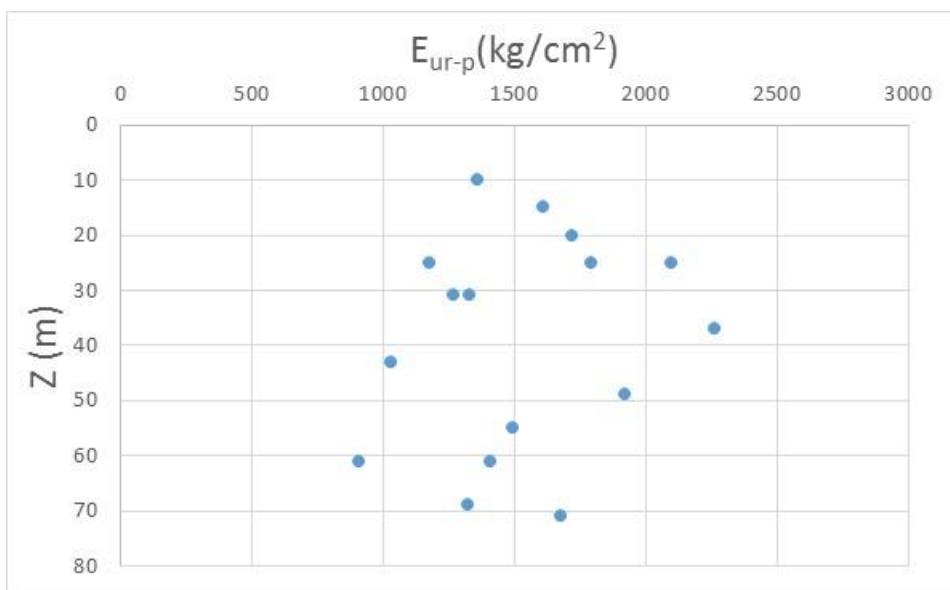
جدول ۳-۱- نتایج آزمایشهای پرسیومتری مطابق گزارش مکانیک خاک

توضیحات	PL	E_{ur-P} (Kg/cm ²)	E_p (Kg/cm ²)	نوع خاک	عمق (متر)
گمانه BH30-3	۲۱/۶	-	۲۵۳	CL-ML	۵
	۴۵/۹	۱۳۶۱	۵۶۹	SM	۱۰
	۳۸/۱	۱۶۱۰	۵۸۰	SC-SM	۱۵
	۵۱/۳	۱۷۲۲	۶۶۲	SC-SM	۲۰
	۶۴/۱	۱۱۷۹	۶۰۲	SC-SM	۲۵
گمانه BH90-30	۵۸/۵	۱۷۹۳	۷۴۵	SC-SM	۲۵
	-	۱۲۶۸	۱۶۰	CL	۳۱
	-	-	۲۵۱	CL	۳۷
	۶۰/۵	۴۸۴۳	۸۹۴	CL-ML	۴۸
	۶۰/۸	۹۱۱	۵۹۵	ML	۶۱
	-	۱۳۲۳	۶۰۰	ML	۶۹
	-	-	۲۲۶	ML	۷۷
گمانه BH90-33	۵۴/۹	۲۰۹۹	۶۷۷	SM	۲۵
	۵۳	۱۳۳۰	۵۴۳	ML	۳۱
	۶۶/۲	۲۲۶۰	۴۵۲	SM	۳۷
	۶۸/۳	۱۰۳۳	۶۱۷	CL-ML	۴۳
	۶۹/۸	۱۹۲۱	۵۷۰	CL	۴۹
	۶۲/۶	۱۴۹۷	۵۸۸	CL	۵۵
	۵۸/۳	۱۴۰۹	۵۴۳	CL	۶۱
	۶۹/۹	-	۵۴۷	CL	۶۹
	۷۰/۴	۱۶۷۷	۵۲۵	CL	۷۱

در جدول فوق E_p مدول منارد یا مدول پرسیومتر و E_{ur} مدول باربرداری-بارگذاری مجدد در حین آزمایش پرسیومتر می باشد.



شکل ۳-۳- نتایج آزمایش های پرسیمتری در محل پروژه- Ep مدول پرسیمتر یا مدول منارد (در حالت بارگذاری) می باشد.



شکل ۳-۴- نتایج آزمایش های پرسیمتری در محل پروژه- Eur مدول بابررداری- بارگذاری مجدد پرسیمتر می باشد.

۳-۳-۱- تبدیل مدول پرسیومتری به مدول الاستیسیته

برخی مراجع از جمله نشریه ۲۲۳ سازمان مدیریت و برنامه ریزی با عنوان "دستور العمل آزمایش پرسیومتری"، رابطه زیر را جهت تبدیل مدول پرسیومتری به مدول اودئومتر پیشنهاد نموده است:

$$E_{oed} = E_p / \alpha \quad (۱-۳)$$

که پارامتر α برای خاکهای مختلف مطابق جدول زیر پیشنهاد شده است:

جدول ۳-۲- پارامتر α مطابق نشریه ۲۲۳ سازمان مدیریت و برنامه ریزی

نوع خاک	رس	لای	ماسه
α	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$

جهت تبدیل مدول اودئومتر به مدول الاستیسیته خاک، می توان از رابطه بهره برد:

$$E_{oed} = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \quad (۲-۳)$$

برای خاک محل پروژه با فرض ضریب پواسن برابر $0/۳۳$ ، ضریب تبدیل مدول پرسیومتر به مدول خاک ماسه ای برابر ۲، برای سیلت برابر $۱/۳۳$ و برای رس برابر ۱ بدست می آید.

لازم به ذکر است برخی مراجع از جمله [فاخر، ۱۳۹۲] مقدار مدول الاستیسیته خاک را معادل مدول منارد بیان نموده اند، در پروژه حاضر با توجه به مقادیر مدول منارد برای خاک ماسه ای ضریب تبدیل دو برای تبدیل آن به مدول الاستیسیته خاک، دست بالا به نظر می رسد. در این پایان نامه مدول الاستیسیته خاک برابر با مدول منارد فرض شده است. صحت فرض فوق براساس نتایج آنالیز برگشتی مورد تأیید می باشد.

مشخصات کلی لایه های خاک محل پروژه براساس گزارش مکانیک خاک در جدول ۳-۳ آورده شده است.

جدول ۳-۳- مشخصات کلی لایه های خاک محل پروژه براساس گزارش مکانیک خاک

C' (kg/cm ²)	φ°		N SPT	PI %	درصد رطوبت	دانسته خشک (g/cm ³)	درصد ریزدانه (0.074mm): %	نوع خاک	عمق لایه (متر)
	آزمایشگاهی	پرسیومتری							
-	-	-	۲۰~۲۵	NP	۱۰	۱/۵	ML:65~80 SM:25~35	ML& SM	۰-۲
۰/۱۴	۲۸	-	۳۵~۴۰	2~12	۱۸/۵	۱/۶۱	65~80	CL-ML & ML	۲-۹
۰/۱۰	۳۱	۴۲	۳۵~۴۰	0~6	۶	۱/۹	25~35	SM & SC-SM	۹-۱۵
۰/۱۰	۳۱	۴۲	۴۰~۵۰	0~6	۶	۱/۹	25~35	SM & SC-SM	۱۵-۳۰
۰/۱۲	۲۸	-	۵۰~۶۰	4~12	۲۲	۱/۶	65~80	CL & ML	۳۰-۴۴
۰/۱۴	۲۷	-	۶۰~۷۵	4~12	۲۶	۱/۵۸	65~80	CL & ML	۴۴-۹۰

در جدول فوق پارامترهای زاویه اصطکاک داخلی خاک به دو روش آزمایشگاهی (سه محوری و برش مستقیم) و پرسیومتری ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود نتایج حاصل از آزمایش صحرایی پرسیومتری مقادیر بالاتری نسبت به دو روش دیگر دارد. سطح آب زیرزمینی در گمانه های حفاری شده در تراز ۴۴ متری واقع شده است.

۳-۴- مشخصات فنی سازه نگهبان اجرا شده

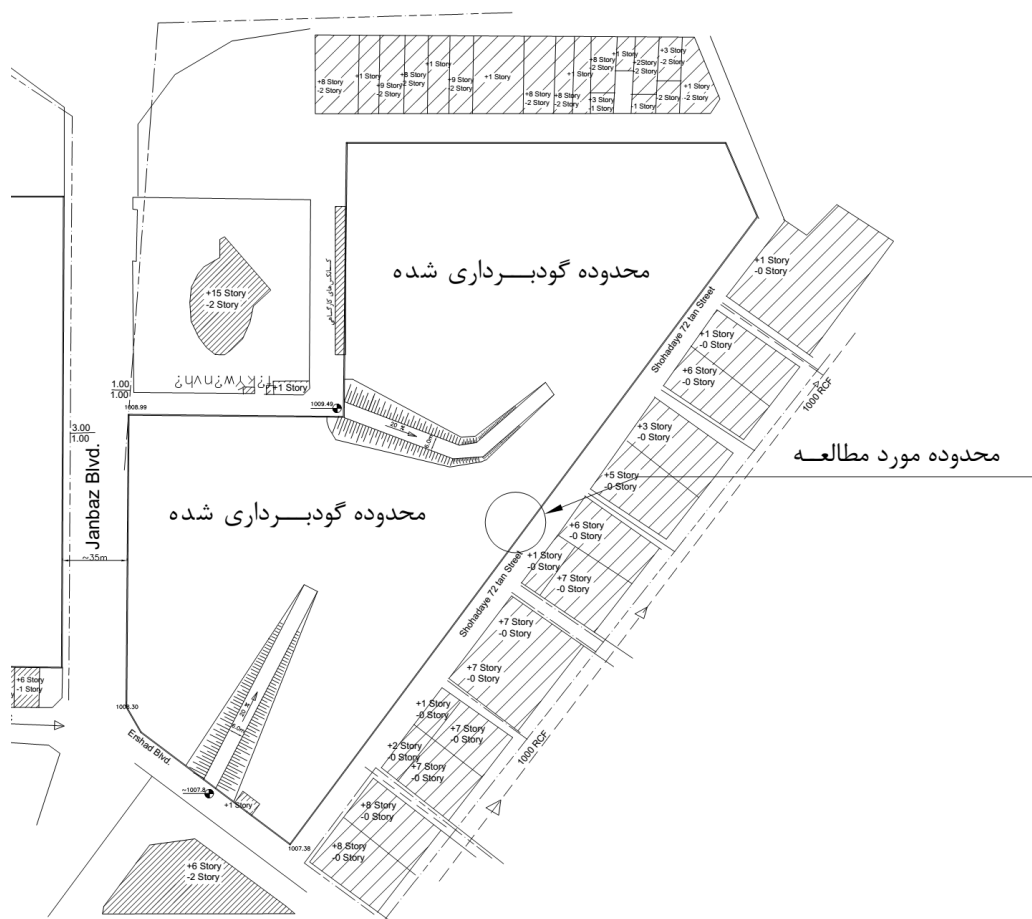
جهت پایدارسازی دیواره گود پروژه مورد نظر از سیستم شمع شناور (سولجر^۱) فولادی با مقطع 2IPE200 + انکر در بخش بالایی دیواره (۱۲ متر بالایی) و انکر + بلوک بتنی به ابعاد یک متر و ضخامت ۴۰ سانتی متر در بخش های پایینی استفاده شده است. کلیات روش های مذکور در ابتدای فصل ۲ آورده شده است. در ادامه مشخصات فنی سازه نگهبان استفاده شده آورده شده است.

¹ Soldier

عمق گود: ۲۵ متر

وضعیت سربارهای مجاور گود: خیابان به عرض حدود ۱۵ متر و سپس ساختمان مسکونی دارای ۶ طبقه مثبت بدون زیرزمین

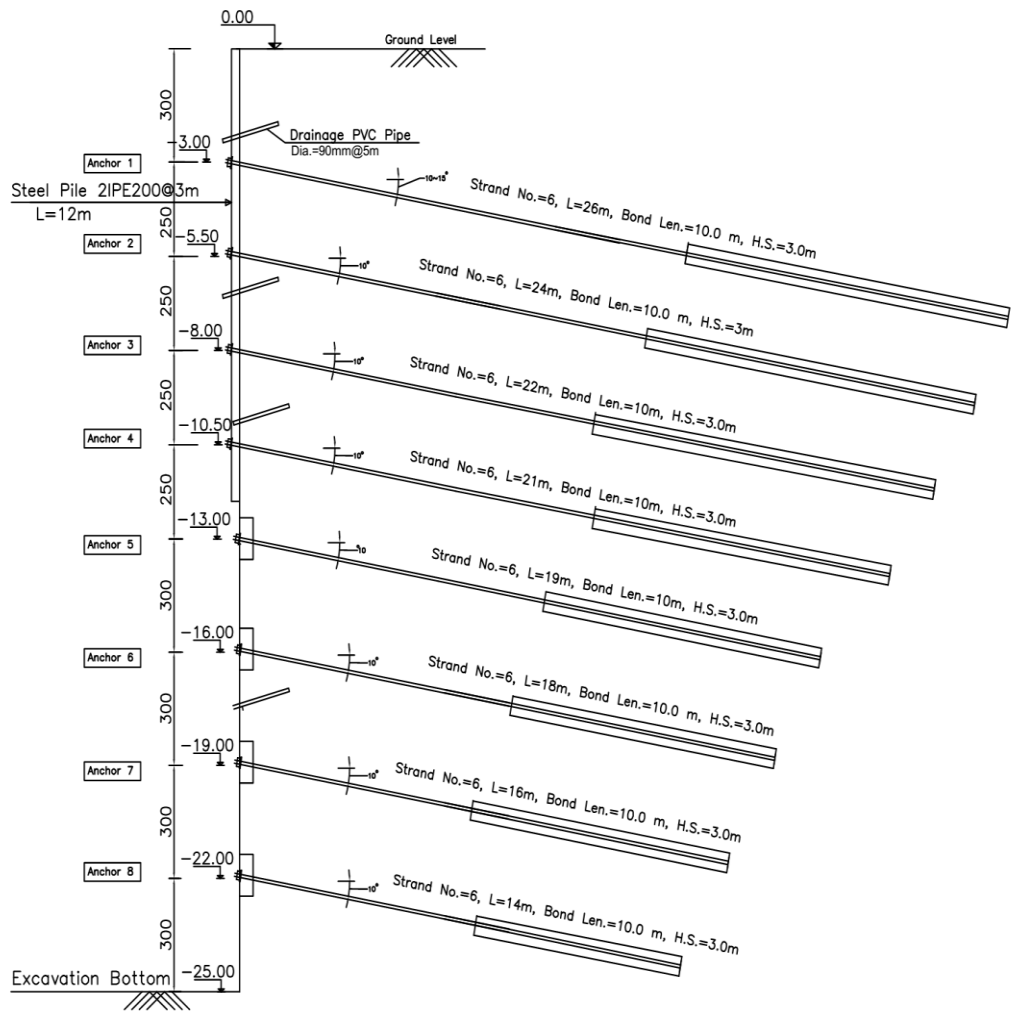
با توجه به مدلسازی پروژه به روش المان محدود ۲ بعدی و تحت شرایط کرنش صفحه ای، محدوده مورد مطالعه در وسط ضلع پروژه انتخاب گردیده تا فاصله کافی از گوشه ها داشته باشد. در شکل ۳-۵ محدوده انتخاب شده جهت مدلسازی و در شکل ۶-۶ جزئیات سیستم سازه نگهبان نشان داده شده است.



شکل ۳-۵- پلان گودبرداری پروژه- محدوده مورد مطالعه نیز در شکل فوق نشان داده شده است.

جدول ۳-۴- مشخصات فنی انکرهای اجرا شده

نیروی پیش تنیدگی (تن)	تعداد رشته استرند	طول آزاد (متر)	طول گیرداری (متر)	طول کلی انکر (متر)	تراز انکر (متر)	ردیف انکر
۹۰	۶	۱۶	۱۰	۲۶	۳	ردیف اول
۹۰	۶	۱۴	۱۰	۲۴	۵/۵	" دوم
۹۰	۶	۱۲	۱۰	۲۲	۸	" سوم
۹۰	۶	۱۱	۱۰	۲۱	۱۰/۵	" چهارم
۹۰	۶	۱۹	۱۰	۱۹	۱۳	" پنجم
۹۰	۶	۸	۱۰	۱۸	۱۶	" ششم
۹۰	۶	۶	۱۰	۱۶	۱۹	" هفتم
۹۰	۶	۴	۱۰	۱۴	۲۲	" هشتم



شکل ۳-۶- نقشه مشخصات فنی سیستم سازه نگهدارنده اجرا شده

فصل چهارم:

مدلسازی عددی

۴-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا ابزار تحقیق و بررسی مسئله که شامل استفاده از نرم افزار المان محدود جهت مدل‌سازی رفتار گود می باشد، معرفی خواهد شد. بدین منظور با توجه به الزامات و ویژگی های مسئله از نرم افزار عددی Plaxis 2D که قابلیت مدل‌سازی و تحلیل انواع مسائل پیچیده ژئوتکنیکی را دارد، استفاده شد. در ادامه این فصل پس از معرفی نرم افزار مورد استفاده، روند مدل‌سازی انجام شده به همراه الزامات و نکات رعایت شده در این تحقیق، تشریح شده است.

۴-۲- انتخاب روش مناسب تحقیق

طراحان گود در طی سالیان متمادی از روش های تحلیل اولیه شامل روش های تجربی، تحلیلی ساده و ... استفاده می کردند. اگر چه این روش ها بسیار ساده بودند لیکن دارای نقایص بسیاری بوده اند.

با پیشرفت قابلیت‌های رایانه ها، روش های پیچیده عددی به کمک طراحان آمده و بنابراین گودبرداری می تواند خیلی واقعی تر مدل‌سازی و تحلیل شود. از مزیت های بسیار مهم روش‌های عددی می توان به قابلیت مدل‌سازی و تحلیل رفتار غیرخطی خاک و هندسه های پیچیده (مانند خاک های لایه ای و شرایط مختلف سربار های مجاور گود) اشاره نمود. در نظر گیری اثر گام‌های خاکبرداری و مراحل نصب مهار ها، یکی از ملزومات تحلیل دقیق تغییر شکل ها و نیروهای داخلی اعضای سازه ای می باشد که این مهم به خوبی توسط مدل‌سازی عددی، دست یافتنی خواهد بود.

در این تحقیق با توجه به موارد فوق از نرم افزار المان^۱ محدود Plaxis 2D استفاده شده است.

¹ Finite element method

- مدل رفتاری مور- کولمب
- مدل رفتاری سخت شونده^۱
- مدل رفتاری سخت شونده با افزایش سختی در کرنش کوچک^۲
- مدل رفتاری Modified Cam Clay
- مدل نرم شونده^۳

علاوه بر موارد فوق امکان تعریف مدل رفتاری جدید توسط کاربر در نرم افزار فراهم شده است. رفتار مصالح در نرم افزار PLAXIS در شرایط زهکشی شده، زهکشی نشده و بدون خلل و فرج^۴ قابل تعریف می باشد.

در این تحقیق مطابق توضیحات بخش ۴-۱۰ از مدل های رفتاری مور- کولمب، سخت شونده و سخت شونده با کرنش کوچک استفاده شده است.

۴-۳-۱- روش المان محدود

روش المان محدود (یا اجزاء محدود) که به اختصار FEM نامیده می شود، روشی عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و انتگرال ها می باشد. اساس کار این روش یا حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده سازی آنها به معادلات دیفرانسیل معمولی، که با روشهای عددی مثل اویلر حل می شوند، می باشد. در حل معادلات دیفرانسیل جزئی مسئله مهم این است که به معادله ساده ای که از نظر عددی پایدار است (به این معنا که خطا در داده های اولیه و در حین حل آنقدر نباشد که به

¹ Hardening soil model

² Hardening soil model with small strain stiffness

³ Soft soil creep model

⁴ Non-porous

نتایج نامفهوم منتهی شود) برسیم. روشهایی با مزایا و معایب مختلف برای این امر وجود دارد، که روش اجزاء محدود یکی از بهترین آنهاست.

پیدایش روش اجزاء محدود به حل مسائل پیچیده الاستیسیته و تحلیل سازهها در مهندسی عمران و هوافضا برمی گردد. این روش حاصل کار الکساندر هر نیکوف^۱ (۱۹۴۱) و ریچارد کورانت^۲ (۱۹۴۲) می باشد (محمود فرهادی، ۱۳۸۹). با این که روش کار این دو دانشمند کاملاً متفاوت بود، اما ویژگی مشترک آنها تقسیم یک دامنه پیوسته به یک سری زیردامنه به نام المان (اجزاء) بود.

روش تفاضل محدود یکی دیگر از روشهای عددی مورد استفاده برای حل مجموعه ای از معادلات دیفرانسیل می باشد که در آن مقادیر اولیه یا مقادیر مرزی معلوم هستند. در روش تفاضل محدود، هر مشتق موجود در مجموعه معادلات حاکم، مستقیماً توسط یک عبارت جبری معادل جایگزین می شود. این عبارت جبری خود بر حسب متغیرهای مسأله (برای مثال تنش یا کرنش) در نقاط مجزایی از فضا می باشد. این متغیرها در هر جای دیگر غیر از این نقاط، نامعین و تعریف نشده می باشند. در مقایسه با روش تفاضل محدود، روش المان محدود یک ویژگی اساسی دارد و آن اینکه متغیرهای مسأله در داخل هر المان بر طبق یک روند از قبل تعیین شده و توسط توابع معینی تغییر می کنند. این توابع خود توسط پارامترهایی کنترل می شوند که فرمولی نویسی مسأله در جهت تصحیح این پارامترها به منظور رسیدن به حداقل خطا، انرژی محلی و یا انرژی کلی شکل می گیرد [Itasca Consulting Group Inc., 2000].

در هر دو روش یک سری معادلات جبری تولید می شوند که بایستی حل شوند. با وجود این که معادلات به روشهای کاملاً متفاوتی حاصل شده اند، به راحتی می توان نشان داد که معادلات منتهی برای هر دو روش یکسان هستند. بنابراین بی فایده است اگر بخواهیم در مورد مزایای نسبی المان های محدود یا

^۱ Alexander Hrennikoff

^۲ Richard Courant

تفاضل های محدود بحث کنیم، چرا که در هر صورت معادلات منتهجه یکسان هستند [Itasca Consulting Group Inc., 2000].

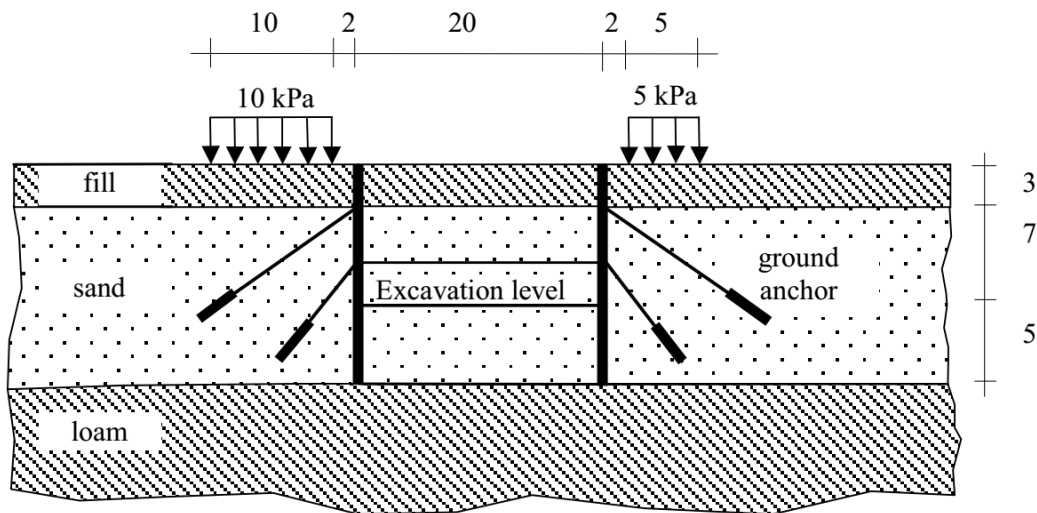
۴-۳-۲- کالیبراسیون نسخه PLAXIS مورد استفاده

جهت اطمینان از صحت نتایج ارائه شده توسط نرم افزار مورد استفاده، از نتایج مثال حل شده توسط نرم افزار که جزئیات مدلسازی آن در راهنمای^۱ نرم افزار plaxi موجود است، استفاده گردید. بدین منظور یک مدل از یک گود مهار شده به روش دیوار دیافراگمی و انکرینگ با عمق ۱۰ متر ساخته شد و نتایج حاصل از نرم افزار شامل تغییر شکل های دیواره و سطح زمین با نتایج ارائه شده برای مدل مذکور در راهنمای نرم افزار مقایسه شد.

۴-۳-۲-۱- مشخصات مدل ساخته شده جهت کالیبراسیون نرم افزار

مطابق راهنمای نرم افزار عمق و عرض گود به ترتیب برابر ۱۰ متر و ۲۰ متر می باشد. دیواره گود توسط دیوار دیافراگمی بتنی به ضخامت ۰/۳۵ متر به علاوه دو ردیف انکر در تراز های ۳ متری و ۷ متری پایدار شده است. طول کلی انکر ردیف اول برابر ۱۴/۵ متر (و با زاویه ۳۳/۷ درجه نسبت به افق) و طول کلی انکر ردیف دوم برابر ۱۰ متر (و با زاویه ۴۵ درجه نسبت به افق) می باشد. شکل ۴-۲ مشخصات مدل را براساس راهنمای نرم افزار نشان می دهد. مشخصات مهندسی لایه های خاک و اعضای سازه ای استفاده شده نیز در ادامه آورده شده است.

^۱ Tutorial manual



شکل ۴-۲- تصویر مدل ساخته شده در راهنمای نرم افزار plaxis

جدول ۴-۱- مشخصات مهندسی لایه های خاک مطابق راهنمای نرم افزار Plaxis

Parameter	Name	Fill	Sand	Loam	Unit
Material model	<i>Model</i>	MC	MC	MC	-
Type of material behaviour	<i>Type</i>	Drained	Drained	Drained	-
Soil unit weight above p.l.	γ_{unsat}	16	17	17	kN/m ³
Soil unit weight below p.l.	γ_{sat}	20	20	19	kN/m ³
Horizontal permeability	k_x	1.0	0.5	0.1	m/day
Vertical permeability	k_y	1.0	0.5	0.1	m/day
Young's modulus	E_{ref}	8000	30000	20000	kN/m ²
Poisson's ratio	ν	0.30	0.30	0.33	-
Cohesion	c_{ref}	1.0	1.0	8.0	kN/m ²
Friction angle	ϕ	30	34	29	°
Dilatancy angle	ψ	0.0	4.0	0.0	°
Interface reduction factor	R_{inter}	0.65	0.70	Rigid	-

جدول ۴-۲- مشخصات مهندسی دیوار دیافراگمی مطابق راهنمای نرم افزار Plaxis

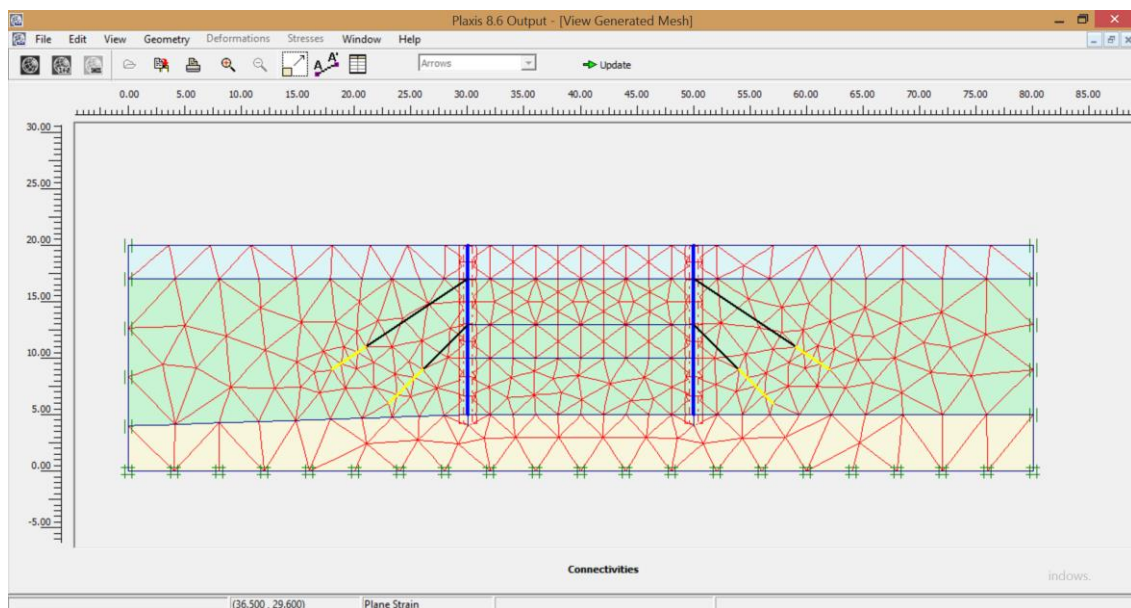
Parameter	Name	Value	Unit
Type of behaviour	<i>Material type</i>	Elastic	-
Normal stiffness	EA	$12 \cdot 10^6$	kN/m
Flexural rigidity	EI	$0.12 \cdot 10^6$	kNm ² /m
Equivalent thickness	d	0.346	m
Weight	w	8.3	kN/m/m
Poisson's ratio	ν	0.15	-

جدول ۴-۳- مشخصات مهندسی بخش آزاد انگرها مطابق راهنمای نرم افزار Plaxis

Parameter	Name	Value	Unit
Type of behaviour	<i>Material type</i>	Elastic	-
Normal stiffness	<i>EA</i>	$2 \cdot 10^5$	kN
Spacing out of plane	<i>L_s</i>	2.5	m
Maximum force	<i>F_{max,comp}</i>	$1 \cdot 10^{15}$	kN
	<i>F_{max,tens}</i>	$1 \cdot 10^{15}$	kN

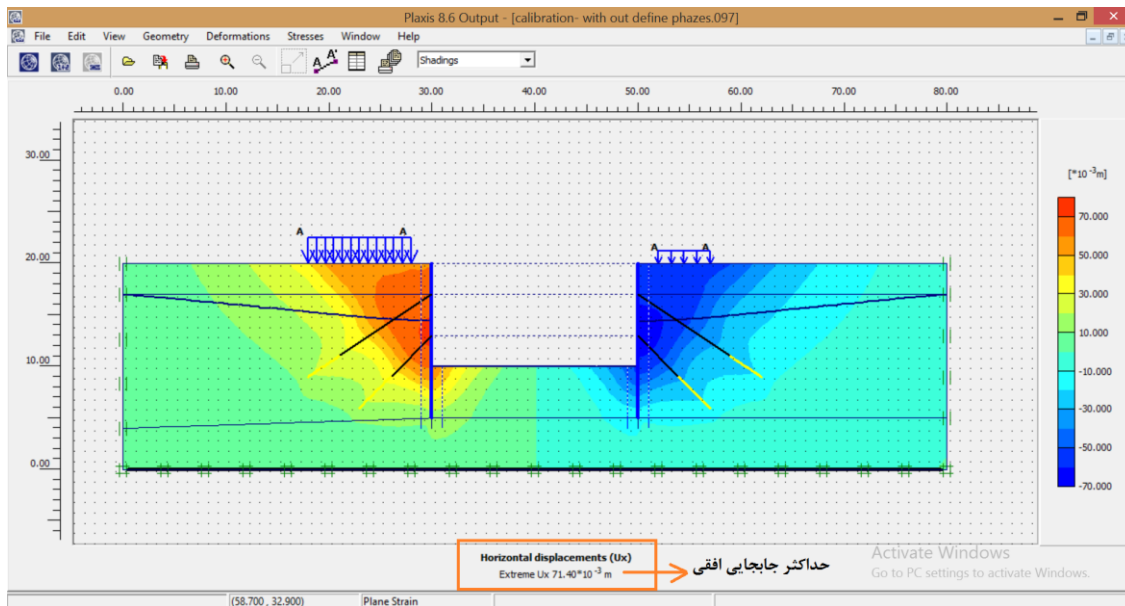
جدول ۴-۴- مشخصات مهندسی بخش گیردار انگرها مطابق راهنمای نرم افزار Plaxis

Parameter	Name	Value	Unit
Normal stiffness	<i>EA</i>	$1 \cdot 10^5$	kN/m

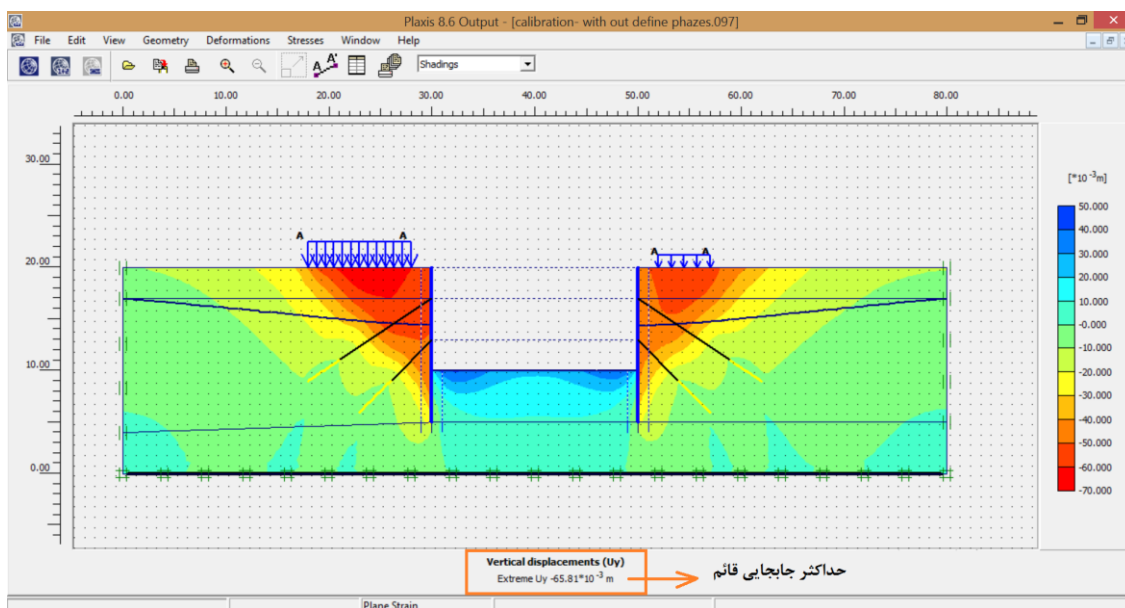


شکل ۴-۳- شبکه المان بندی شده در مدل ساخته شده جهت صحت سنجی نتایج

مدلسازی نمونه جهت کالیبراسیون با رعایت تمامی موارد ذکر شده در راهنمای نرم افزار انجام شد و مدل آنالیز گردید. جدول ۴-۵ نتایج تحلیل مدل ساخته شده را به همراه نتایج مثال حل شده در نرم افزار نشان می دهد، مطابق جدول ۴-۵ اختلاف مقادیر تغییر شکل حداکثر دیواره و سطح زمین در مدل ساخته شده و مثال حل شده در راهنمای نرم افزار کمتر از ۲ درصد بوده و این امر صحت نتایج تحلیل نسخه نرم افزار Plaxis استفاده شده در این پایان نامه را نشان می دهد.



شکل ۴-۴ - میزان جابجایی افقی مدل



شکل ۴-۵ - میزان جابجایی قائم مدل

جدول ۴-۵ - مقایسه نتایج بدست آمده با مثال حل شده در راهنمای نرم افزار

حداکثر نشست سطح زمین (mm)	حداکثر جابجایی افقی دیوار (mm)	نوع تحلیل
۶۵/۸	۷۱/۴	مدل ساخته شده جهت صحت سنجی
۶۶/۴	۷۲/۶	مثال حل شده در راهنمای نرم افزار

۴-۴- ابعاد در مدلسازی عددی

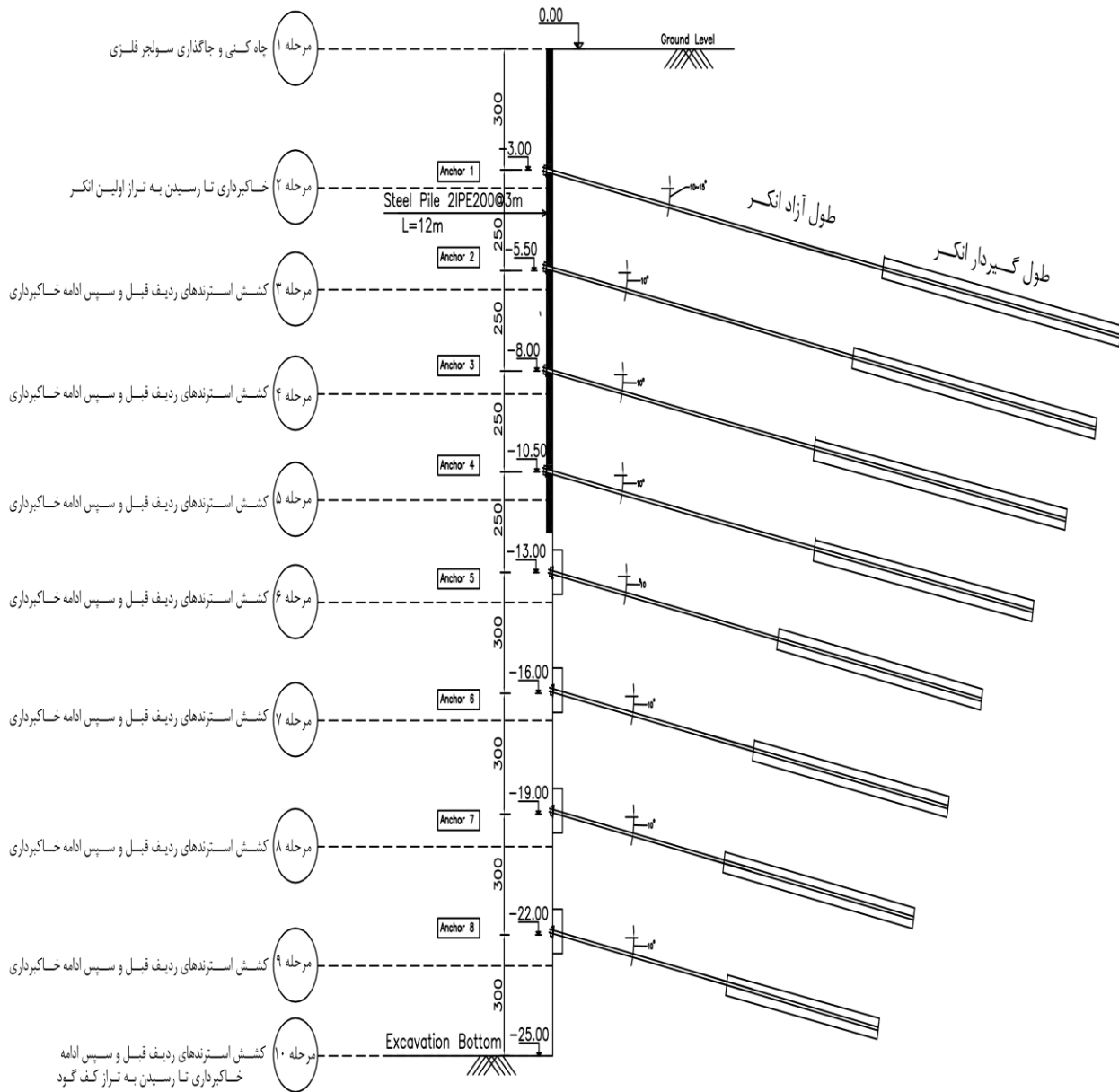
در مدلسازی عددی انتخاب شرایط مرزی مناسب و ابعاد مدل جهت دستیابی به نتایج دقیق، اهمیت به سزایی دارد. در گوده‌های مدل شده در این پایان نامه جهت جلوگیری از اثرگذاری مرزهای بسته شده مدل بر روی تغییر شکل‌ها و تنش‌ها، لازم است فاصله مرزها تا مدل دارای فاصله مناسبی باشد. مطابق [khoiri and ou, 2013] فاصله مرزهای افقی مدل دو بعدی ۷ برابر عمق گود انتخاب گردید. همچنین ابعاد مدل در جهت قائم به صورت ۳ برابر عمق گود در نظر گرفته شده است.

۴-۵- روند خاکبرداری و اجرای سازه نگهبان در پروژه مورد مطالعه

از آنجا که رفتار خاک اطراف گود به صورت غیر خطی است، روند حفاری و اجرای سازه نگهبان (پیش تنیده کردن انکرها) بر روی تغییر شکل‌های گود تاثیر گذار است. در پروژه مورد مطالعه روند خاکبرداری و اجرای سازه نگهبان مطابق ذیل می باشد:

- ابتدا عملیات چاه کنی در محیط زمین انجام شده و سولجر فلزی (شمع شناور) جاگذاری می شود.
- خاکبرداری تا رسیدن به تراز حدود نیم متر پایین تر اولین انکر (عمق حدود ۳/۵ متر) انجام شده و سپس گمانه جهت جاگذاری المان‌های کششی انکر حفاری می گردد.
- بعد از تزریق داخل گمانه و گیرش اولیه دوغاب سیمان کشش انکرها جهت پیش تنیده کردن آنها انجام می شود.
- سپس خاکبرداری تا رسیدن به تراز حدود نیم متر پایین تر از انکرهای ردیف بعد انجام گردیده و گمانه ردیف بعد حفاری شده و سپس کشش انجام می شود. روند فوق تا رسیدن به کف گود به صورت تکراری انجام می گردد.

در شکل ۴-۶ مراحل اجرایی گودبرداری نشان داده شده است.



شکل ۴-۶- مراحل خاکبرداری و اجرای سازه نگهدارنده گودبرداری مورد مطالعه

۴-۶- مشخصات مهندسی اعضای سازه نگهبان

مشخصات مهندسی اعضای سازه نگهبان شامل سولجر فلزی (2IPE200)، طول آزاد و گیردار مهارتی، قطر استرندها، ابعاد پدهای بتنی، بتن پاششی دیواره^۱ و ... در جداول ذیل نشان داده شده است.

جدول ۴-۶- مشخصات فنی سولجر فلزی 2IPE200

Material Model	I (inertia moment) (m ⁴)	E (Kg/cm ²)	A (cm ²)
Linear elastic	3.8E-5	2.1E6	57

جدول ۴-۷- مشخصات ابعادی انکرها (جدول تکراری از فصل ۳)

ردیف انکر	تراز انکر (متر)	طول کلی انکر (متر)	طول گیرداری (متر)	طول آزاد (متر)	تعداد رشته استرندها	نیروی پیش تنیدگی (تن)
ردیف اول	۳	۲۶	۱۰	۱۶	۶	۹۰
" دوم	۵/۵	۲۴	۱۰	۱۴	۶	۹۰
" سوم	۸	۲۲	۱۰	۱۲	۶	۹۰
" چهارم	۱۰/۵	۲۱	۱۰	۱۱	۶	۹۰
" پنجم	۱۳	۱۹	۱۰	۱۹	۶	۹۰
" ششم	۱۶	۱۸	۱۰	۸	۶	۹۰
" هفتم	۱۹	۱۶	۱۰	۶	۶	۹۰
" هشتم	۲۲	۱۴	۱۰	۴	۶	۹۰

جدول ۴-۸- مشخصات فنی استرندها

Material Model	E (KN/mm ²)	Area (mm ²)	Dia. (in)
Linear elastic	195~200	140	0.6

¹ Shotcrete

جدول ۴-۹- مشخصات بتن پاششی به ضخامت حدود ۱۰ سانتی متر

Material Model	γ (Kg/m ³)	E (Kg/cm ²)	d (cm)
Linear elastic	≈2200	≈2.0E7	10

ابعاد پدهای بتنی جهت تکیه گاه انکر بر روی دیواره گود به صورت مربعی با طول ۱ متر و ضخامت ۴۰ سانتی متر می باشد.

مشخصات مهندسی لایه های خاک در ادامه بررسی شده و مقادیر مناسب استخراج می شود.

۴-۷- تفاوت اثر مقدار پارامترهای مختلف بر نتایج طراحی و آنالیز برگشتی

(تفاوت طراحی و آنالیز برگشتی)

امروزه جهت تعیین پارامترهای مهندسی خاک آزمایش های صحرایی و آزمایشگاهی متعددی مورد استفاده قرار می گیرد، لیکن نتایج آزمایش های مختلف جهت تعیین یک پارامتر خاص لزوما یکسان نمی باشد. پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک را می توان از آزمون های آزمایشگاهی (برش مستقیم و سه محوری) و صحرایی (برش مستقیم برجا و SPT و ...) استخراج نمود که براساس تجارب موجود، آزمون های آزمایشگاهی معمولا نتایج دست پایین تری ارائه می دهد. همچنین مدول الاستیسیته خاک می تواند توسط آزمایش های متعددی (سه محوری آزمایشگاهی، SPT، پرسیومتری، بارگذاری صفحه و ...) تعیین گردد که نتایج حاصل از هر آزمایش متفاوت می باشد، به عنوان مثال در پروژه مورد مطالعه آزمایش پرسیومتری بیشترین مقدار و سه محوری کمترین مقدار را ارائه می نماید.

در مرحله طراحی گود، مقادیر پارامترهای ϕ ، c و E_s اثر مثبت دارند (یعنی در صورتی که مقادیر آنها کمتر از مقدار واقعی در نظر گرفته شوند طرح در جهت اطمینان خواهد بود). لیکن در مرحله آنالیز

برگشتی (به عنوان مثال اگر هدف پیدا کردن پارامتر مدول الاستیسیته خاک باشد) سایر پارامترهایی که در طراحی اثر مثبت داشته اند (نظیر C و φ)، اثر منفی دارند، به این معنی که در صورتی که مقادیر C و φ کمتر از مقادیر واقعی در نظر گرفته شوند، مقدار مدول الاستیسیته محاسبه شده دست بالا، غیر واقعی و خلاف جهت اطمینان محاسبه می گردد. بنابراین در آنالیز برگشتی جهت اجتناب از نتایج دست بالا و غیر واقعی بایستی مقادیر سایر پارامترها (به خصوص C و φ) دقیق و ترجیحا به کمک نتایج آزمایش های صحرایی انتخاب گردد.

با توجه به اهمیت موضوع فوق، مقادیر پارامترهای تاثیرگذار در پروژه مورد مطالعه به روش های مختلف (آزمایشگاهی، صحرایی و روابط تجربی) استخراج شده و مقدار مناسب جهت آنالیز برگشتی انتخاب شده است (موضوع بخش بعد).

۴-۸- استخراج پارامترهای مهندسی لایه های خاک (جهت انجام آنالیز برگشتی)

با توجه به توضیحات بخش ۴-۷، در این بخش پارامترهای مهندسی خاک، به روش های مختلف محاسبه شده و مقدار مناسب هر پارامتر جهت انجام آنالیز برگشتی انجام می گردد. با توجه به اینکه یکی از هدف های این پایان نامه بررسی مدول الاستیسیته خاک به روش آنالیز برگشتی می باشد، پارامترهای زاویه اصطکاک داخلی خاک و چسبندگی لازم است به صورت دقیق تعیین شود که در ادامه به آن پرداخته شده است.

۴-۸-۱- استخراج پارامترهای مقاومت برشی C' و φ' ماسه جهت استفاده در آنالیز برگشتی

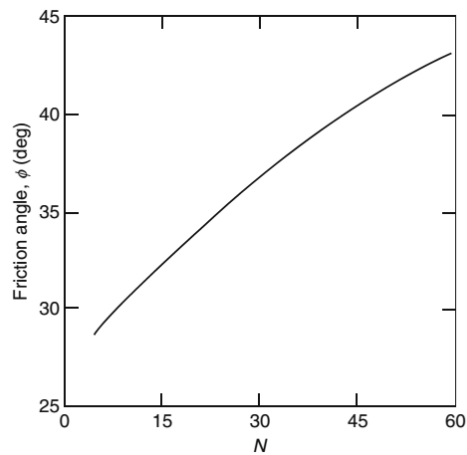
جهت تخمین زاویه اصطکاک داخلی لایه ماسه ای در عمق ۹ تا ۳۰ متر می توان از روابط تجربی براساس عدد SPT، نتایج آزمایشگاهی و پرسویمتری عمل نمود که در ادامه به آن پرداخته شده است.

مطابق گزارش مکانیک خاک، عدد SPT در لایه های مختلف مطابق جدول ذیل می باشد.

جدول ۱۰-۴- متوسط عدد SPT در گمانه های حفاری شده

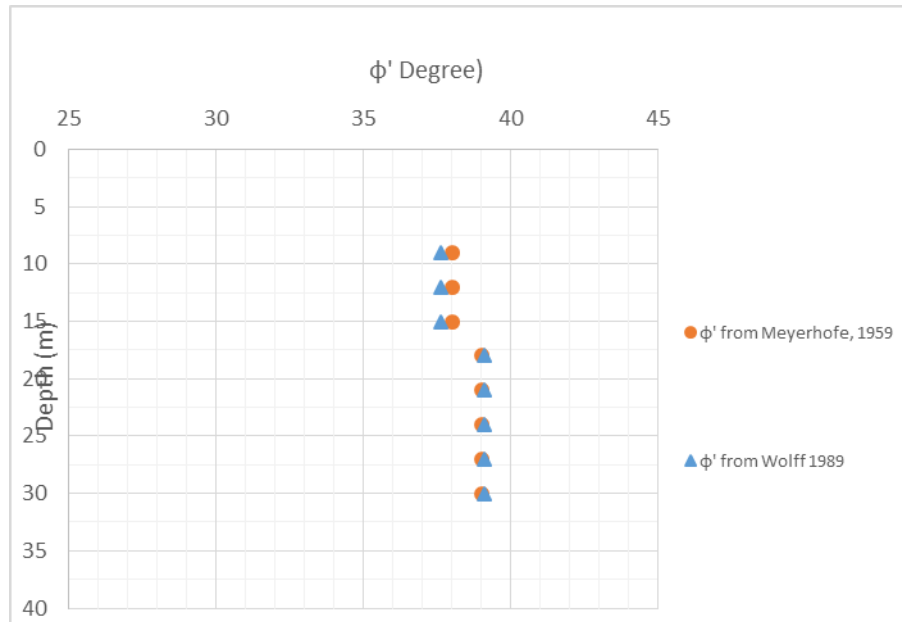
N_{160}	N	نوع خاک	عمق (متر)
25-30	20-25	SM & ML	۰-۲
27-33	35-40	CL-ML & ML	۲-۹
25-30	30-40	SM & SC-SM	۹-۱۵
28-33	40-50	SM & SC-SM	۱۵-۳۰
25-30	50-60	CL & CL-ML	۳۰-۴۴
25-30	60-75	CL & ML	۴۴-۷۵

براساس رابطه پیشنهاد شده توسط [Das, 2016]، (رابطه ۴-۱) و نمودار ۴-۷، زاویه اصطکاک داخلی ماسه با استفاده از عدد spt محاسبه گردید که مقادیر آن در شکل ۴-۸ آورده شده است.



شکل ۴-۷- تخمین زاویه اصطکاک داخلی ماسه براساس عدد N_{spt} [Das, 2016]

$$\phi^{\circ} = 27.1 + 0.3N_1 - 0.00054N_1^2 \quad (1-4)$$



شکل ۴-۸- تخمین زاویه اصطکاک داخلی لایه های ماسه ای براساس عدد spt

نشریه ۲۲۳ سازمان مدیریت و برنامه ریزی رابطه (۲-۴) را جهت تخمین زاویه اصطکاک ماسه براساس نتایج آزمایش پرسیومتری ارائه نمود، در این رابطه از چسبندگی ماسه صرفه نظر شده است، به همین دلیل در خاکهای ماسه ای که دارای چسبندگی نیز می باشند، زاویه اصطکاک داخلی کمی دست بالا محاسبه می گردد.

$$P_l - P_0 = 250 * (2)^{\frac{\phi - 24}{4}} \quad (2-4)$$

در رابطه بالا P_0 و P_1 به ترتیب فشار حدی و فشار جانبی خاک در حالت سکون است که از آزمایش پرسیومتری بدست می آید. در جدول ۴-۱۱ مقادیر زاویه اصطکاک داخلی لایه های ماسه ای براساس آزمایش پرسیومتری نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۱- محاسبه پارامتر ϕ براساس نتایج آزمایش پرسیومتری

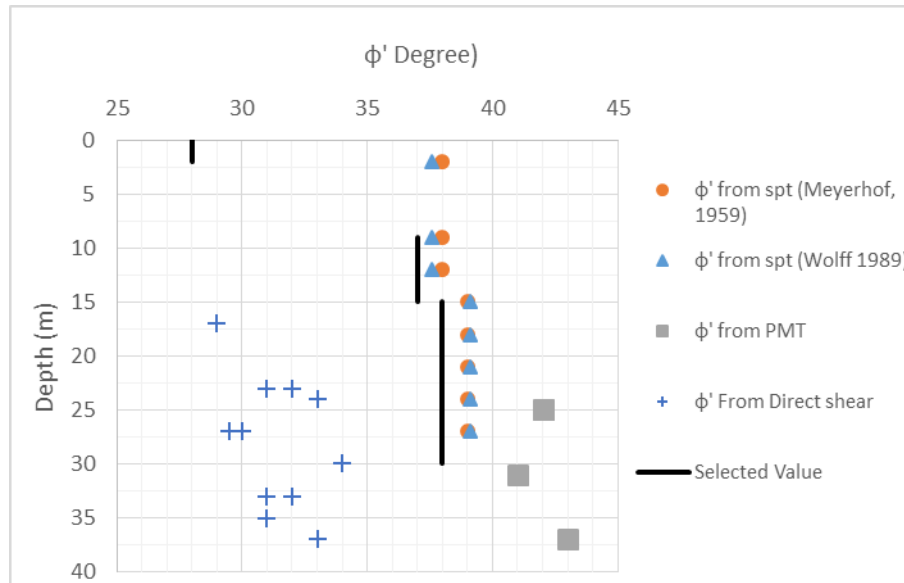
ϕ°	P_0 (kg/cm ²)	P_1 (kg/cm ²)	عمق (متر)	گمانه
۴۲	۲	۵۸/۵	۲۵	BH90-30
۴۲	۱/۶	۵۴/۹	۲۵	BH90-33
۴۱	۲/۲۵	۵۳	۳۱	
۴۳	۱/۷۵	۶۶/۲	۳۷	

در پروژه مورد مطالعه آزمون آزمایشگاهی برش مستقیم (بر روی نمونه های بازسازی شده و در حالت اشباع و با سرعت بارگذاری تند و کند) جهت محاسبه پارامترهای برشی خاک ماسه ای انجام شده است که نتایج آن در جدول ۴-۱۲ آورده شده است. مطابق نتایج بدست آمده، مقدار زاویه اصطکاک داخلی ماسه در آزمایشگاه کمتر از مقادیر آزمایش های صحرایی (SPT و پرسیومتری) بوده که علت آن را می توان به ماهیت آزمون آزمایشگاهی که شامل خطاهای ناشی از نمونه گیری و دست خوردگی خاک ماسه ای است، نسبت داد.

جدول ۴-۱۲- نتایج آزمایش های برش مستقیم در خاک ماسه ای

عمق (متر)	ϕ°
۱۷	۲۹
۲۷	۲۹
۲۵	۳۰/۵~۳۲
۳۰~۴۰	۳۰~۳۳

انتخاب مقدار نهایی زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی ماسه جهت استفاده در تحلیل گود:
 در بخش قبل زاویه اصطکاک داخلی ϕ' خاک ماسه ای موجود در محل، به روش های آزمایشگاهی، SPT و پرسیومتری محاسبه شد، با توجه به اینکه در آزمایش پرسیومتری از چسبندگی خاک ماسه ای صرفه نظر می شود، مقدار محاسبه شده برای ϕ در این روش کمی دست بالا می باشد. در این پایان نامه مقادیر انتخاب شده برای ϕ جهت استفاده در تحلیل گود به مقادیر حاصل از آزمایش spt نزدیک تر می باشد (شکل ۴-۹). مقدار انتخاب شده برای چسبندگی زهکشی شده 'C' لایه های ماسه جهت استفاده در آنالیز برگشتی گود غالباً براساس نتایج آزمونهای آزمایشگاهی بوده که مقادیر آن در جدول ۴-۱۳ آورده شده است.



شکل ۴-۹- انتخاب مقدار نهایی ϕ' ماسه جهت استفاده در آنالیز برگشتی گود (منحنی ممتد در شکل فوق)

جدول ۴-۱۳- مقادیر C' در خاک ماسه ای جهت استفاده در آنالیز برگشتی گود

C' (kg/cm ²)	نوع خاک	عمق (متر)
۰/۱	SM & ML	۰-۲
۰/۱	SM & SC-SM	۹-۱۵
۰/۱	SM & SC-SM	۱۵-۳۰

۴-۸-۲- استخراج پارامترهای مقاومت برشی C' و ϕ' در خاک ریزدانه

در این بخش پارامترهای c' و ϕ' خاک رس براساس آزمون های آزمایشگاهی (سه محوری) و روابط تجربی استخراج شده است. جدول ۴-۱۴ مقادیر پارامترهای c' و ϕ' لایه های رس را براساس نتایج آزمایش سه محوری CU نشان می دهد. همچنین بسیاری از مراجع معتبر زاویه اصطکاک داخلی رس در شرایط زهکشی شده ϕ' ، را براساس تابعی از نشانه خمیری^۱ مطابق روابط ذیل پیشنهاد نموده اند
 :[Das, 2016]

^۱ Plasticity index

$$\varphi'(peak) = 45 - 14 \log(PI) \quad \text{for } 4 < PI < 50 \quad (3-4)$$

$$\varphi'(peak) = 26 - 3 \log(PI) \quad \text{for } 50 < PI < 150$$

روابط فوق برای رس عادی تحکیم و پیش تحکیم قابل استفاده می باشد.

برای پروژه حاضر، با توجه به مطالعات انجام شده در گزارش مکانیک خاک، PI خاک ریزدانه در محدوده ۴~۱۲ گزارش شده که در اینجا برابر ۸ فرض شده است (مشخصات کلی لایه های خاک محل در جدول ۳-۳ آورده شده است).

مقادیر پارامترهای فوق الذکر به هر دو روش (آزمایشگاهی و تجربی) محاسبه گردید که نتایج آن در جدول ۴-۱۴ نشان داده شده است، مقادیر انتخاب شده برای پارامترهای فوق جهت استفاده در آنالیز برگشتی نیز در جدول ۴-۱۶ آورده شده است. با توجه به تجربه نگارنده در چندین پروژه مشابه، مقادیر φ' بدست آمده از آزمایش سه محوری دست پایین بوده، لذا مقادیر انتخاب شده جهت استفاده در آنالیز برگشتی به مقادیر روابط تجربی نزدیکتر می باشد.

جدول ۴-۱۴- مقادیر C' و φ' انتخاب شده برای رس جهت استفاده در آنالیز برگشتی گود

C' (kg/cm ²)	φ' °	C' (kg/cm ²)	φ' °		PI %	نوع خاک	عمق (متر)
			تجربی	سه محوری			
۰/۱۵	۳۱	۰/۱	۳۲	۲۸	۸	CL-ML & ML	۲-۹
۰/۱۵	۳۱	۰/۱۴	۳۱	۲۸	۱۰	CL & CL-ML	۳۰-۴۴
۰/۱۵	۳۱	۰/۱۴	۳۱	۲۷	۱۰	CL & ML	۴۴-۷۵

۴-۸-۳- مقادیر مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش های مختلف

در این قسمت براساس مطالعات انجام شده در پروژه، مدول الاستیسیته لایه های خاک به سه روش آزمایش های سه محوری، SPT و پرسیومتری آورده شده است (جدول ۴-۱۶). جهت محاسبه مدول الاستیسیته به کمک عدد SPT از رابطه ارائه شده توسط [Mezenbach, 1961] استفاده شده است.

$$E_s = C_1 + C_2 N \quad (4-4)$$

که N عدد SPT (اصلاح نشده) می باشد. ضرایب C1 و C2 از جدول ۴-۱۵ براساس نوع خاک انتخاب می گردد.

جدول ۴-۱۵- مقادیر ضرایب C1 و C2 در خاک های مختلف [Mezenbach, 1961]

Soil type	C1 (kg/cm ²)	C2 (kg/cm ²)
Fine sand (above G.W.T)	52	3.3
Fine sand (below G.W.T)	71	4.9
Sand (medium)	39	4.5
Coarse sand	38	10.5
Sand + gravel	43	11.8
Silty sand	24	5.3
silt	12	5.8

مقادیر مدول الاستیسیته لایه های مختلف براساس عدد spt به کمک رابطه فوق محاسبه گردید و در جدول ۴-۱۶ آورده شده است. مقادیر مدول الاستیسیته حاصل از سایر آزمایش ها (سه محوری و پرسیومتری) نیز در جدول ۴-۱۶ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۶- مقادیر مدول الاستیسیته لایه های خاک به روش های مختلف

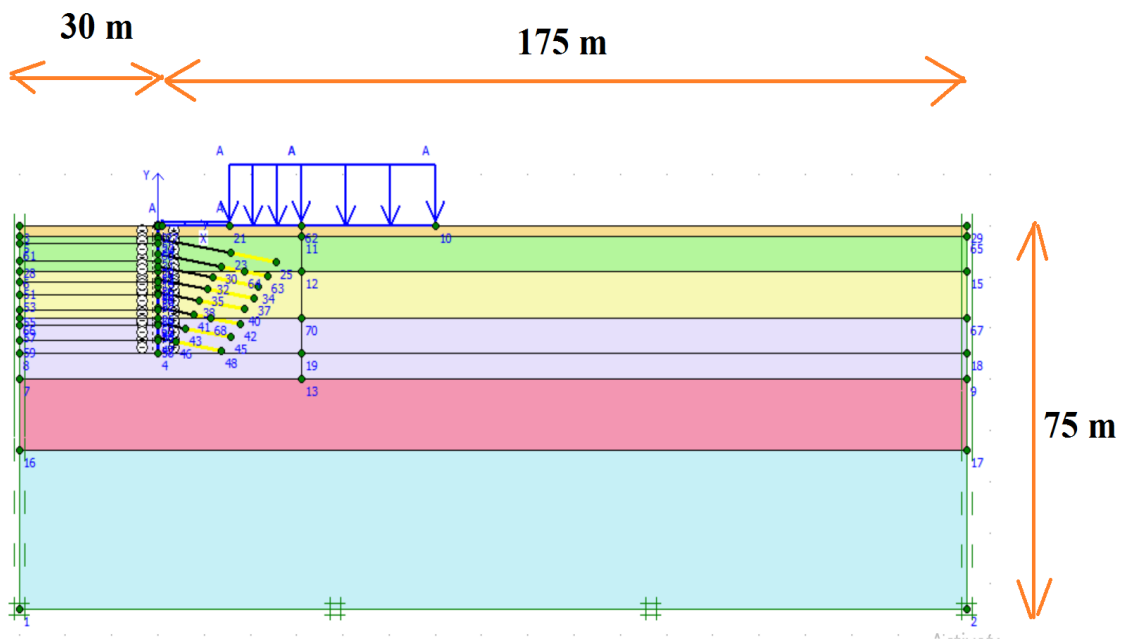
E (kg/cm ²)				نوع خاک	عمق (متر)
آزمایش پرسیومتری (مدول باربرداری - بارگذاری مجدد)	آزمایش پرسیومتری (مدول بارگذاری)	به کمک spt	آزمایش سه محوری		
-	-	۱۴۰	۱۰۰	SM & ML	۰-۲
۱۸۰۰	۶۰۰	۲۲۵	۱۴۰	CL-ML & ML	۲-۹
۱۶۰۰	۵۵۰	۲۸۰	۲۴۰	SM & SC-SM	۹-۱۵
۱۹۰۰	۷۰۰	۳۰۰	۲۴۰	SM & SC-SM	۱۵-۳۰
۱۵۰۰	۵۵۰	۳۳۰	۱۰۲	CL & CL-ML	۳۰-۴۴
۱۵۰۰	۵۵۰	۴۰۰	۱۳۵	CL & ML	۴۴-۷۵

در جدول فوق مدول منارد حاصل از آزمایش پرسیومتری و مدول الاستیسته خاک یکسان فرض شده است (به بخش ۳-۲-۱ مراجعه گردد). در این پژوهش صحت این فرض براساس نتایج آنالیز برگشتی بررسی شده است.

۴-۹- روند مدلسازی گودبرداری با نرم افزار Plaxis 2D

۴-۹-۱- ابعاد مدلها

با رعایت توصیه [Khoiri and ou 2013] مطابق بخش ۴-۴ پایان نامه در خصوص ابعاد مدل، در این پایان نامه ابعاد مدل به صورت شکل ۴-۱۰ در نظر گرفته شده است.



شکل ۴-۱۰- ابعاد مدل در تحلیل گود (عمق گود برابر ۲۵ متر می باشد)

۴-۹-۲- وضعیت سربارهای مجاور گود

همان طور که در شکل ۳-۶ نشان داده شد در مجاورت گود، خیابانی به عرض ۱۵ متر و سپس ساختمان مسکونی ۶ طبقه بدون زیر زمین (در آن طرف خیابان) قرار دارد. جهت طراحی گود سربار معادل هر طبقه ساختمان معمولاً به صورت بار گسترده 1 ton/m^2 اعمال می گردد. همچنین سربار ناشی از ترافیک خیابان را نیز بایستی لحاظ نمود. از آنجاییکه هدف این پایان نامه آنالیز برگشتی است (نه طراحی)، به نظر می رسد مقادیر فوق کمی دست بالا بوده و منجر به خطا در نتایج شود. بدین ترتیب مقدار سربار هر طبقه ساختمان را برابر $0/8$ تن بر متر مربع و سربار حاصل از ترافیک برابر $0/3$ تن بر متر مربع در نظر گرفته شد.

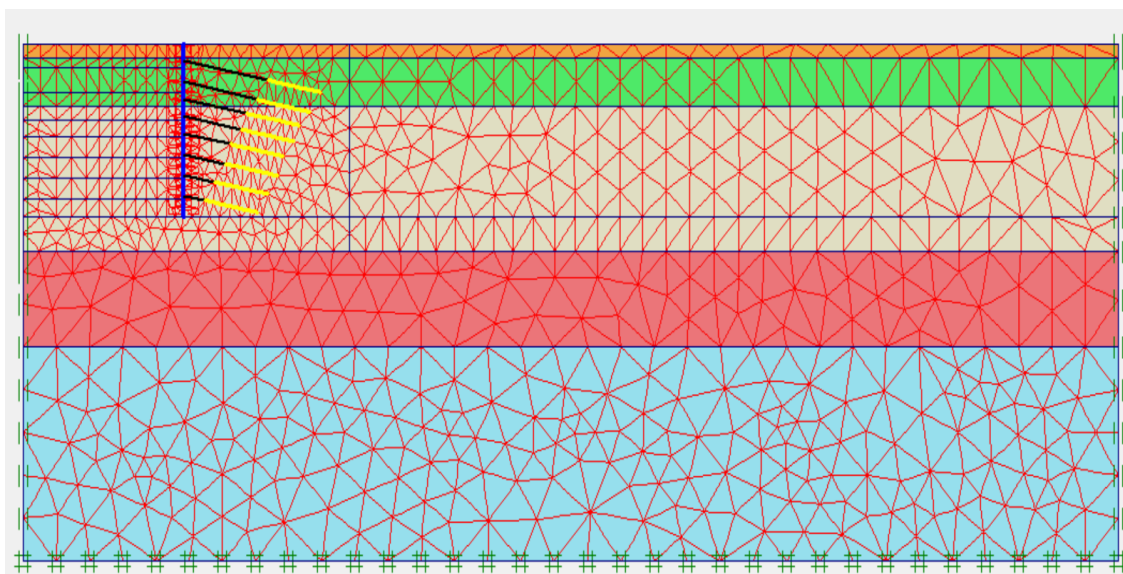
۴-۹-۳- شرایط مرزی مدل

شرایط مرزی اعمال شده بر تمامی مدل ها یکسان بوده و شامل تغییر مکان صفر در وجوه جانبی و در جهت عمود بر همان وجه (معادل تکیه گاه غلتکی) و همچنین تغییر مکان صفر در هر سه جهت (معادل تکیه گاه گیردار) برای کف مدل می باشد.

۴-۹-۴- سایر مشخصات مدل

تنش اولیه: جهت اعمال شرایط اولیه تنش ها بر مدل، پارامتر ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون K_0 بر لایه های خاک اختصاص داده شده و مقادیر تنش های اولیه با اجرای دستور Initial condition توسط نرم افزار محاسبه می شود. مقدار پارامتر K_0 از رابطه $1-\sin(\varphi)$ محاسبه می گردد.

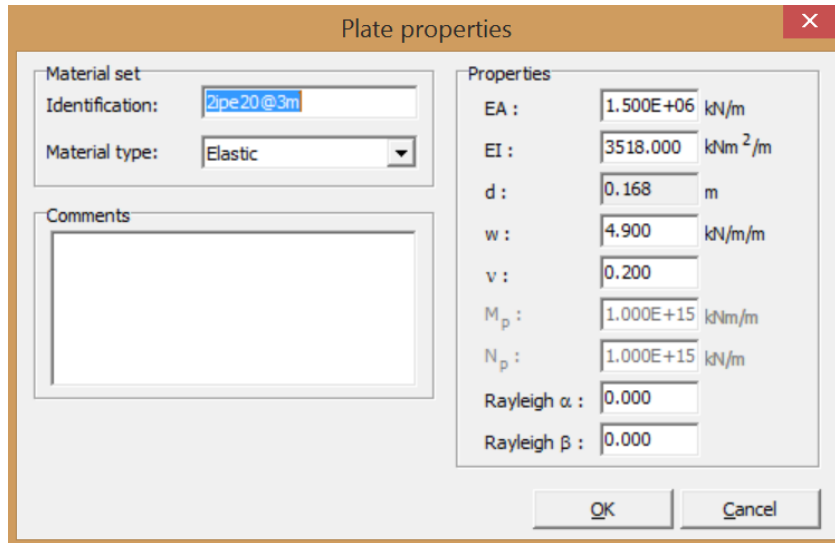
شبکه المان بندی: در شکل ۴-۱۱ المان بندی انجام شده توسط نرم افزار نشان داده شده است. در این پایان نامه ابعاد المان ها به صورت "بسیار ریز" (Very fine) تنظیم شده است. جهت افزایش دقت محاسبات در محدوده خاک پشت دیواره، ابعاد المان ها توسط ابزار Refine cluster در نرم افزار یک درجه ریز تر شده است. المان بندی محیط اطراف گود با استفاده از المان های مثلثی ۱۵ گرهی و در شرایط کرنش صفحه ای انجام شده است.



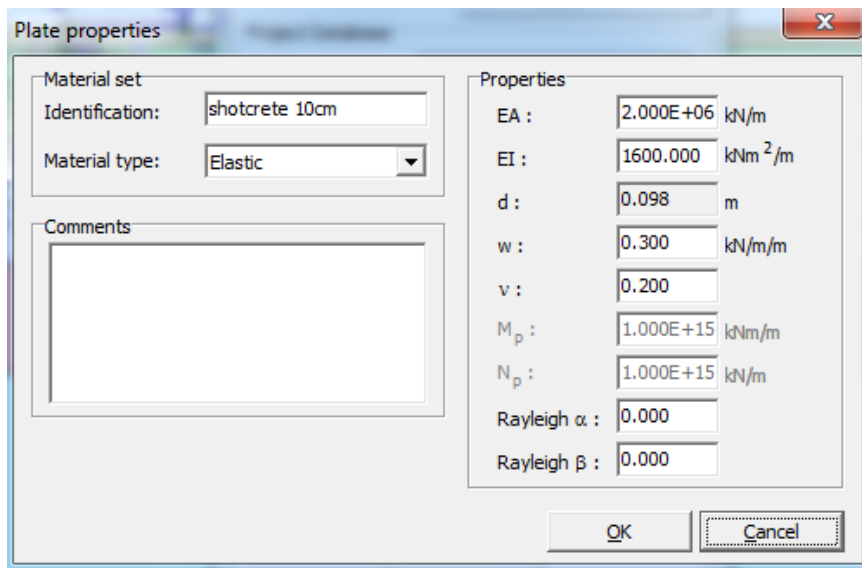
شکل ۴-۱۱- المان بندی انجام شده توسط نرم افزار

مدلسازی اعضای سازه ای: جهت مدلسازی سولجرهای فلزی (با مقطع 2IPE200 و فواصل افقی ۳ متر) و بتن پاششی دیواره (به ضخامت حدود ۱۰ سانتی متر) از ابزار صفحه استفاده گردید. مشخصات مهندسی اعضای فوق قبلا در جداول ۴-۶ و ۴-۹ آورده شده است. شکل های ۴-۱۲ و ۴-۱۳ به ترتیب نشان دهنده مشخصات سولجرهای فلزی و بتن پاششی در محیط نرم افزار می باشد. مطابق Hsiung and ou (2013) در محاسبه وزن مخصوص المان صفحه (بتن پاششی) در نرم افزار Plaxis بایستی وزن مخصوص خاک کسر گردد، علت این امر این است که المان صفحه به صورت بدون حجم^۱ در نظر گرفته می شود، لذا جهت اینکه وزن خاک دوبار لحاظ نگردد لازم است وزن خاک از وزن مخصوص صفحه کسر گردد. با توجه به مطلب فوق با توجه به اینکه در ۱۲ متر بالایی دیواره (بخش سولجر فلزی)، مابین سولجرهای فلزی بتن پاششی نیز اجرا شده است، در محاسبه وزن مخصوص سولجرها، وزن مخصوص خاک کسر و وزن مخصوص بتن پاششی اضافه شده است.

¹ Non- volume



شکل ۴-۱۲- تعریف سولجر فولادی به مقطع 2IPE200 و به فواصل افقی ۳ متر

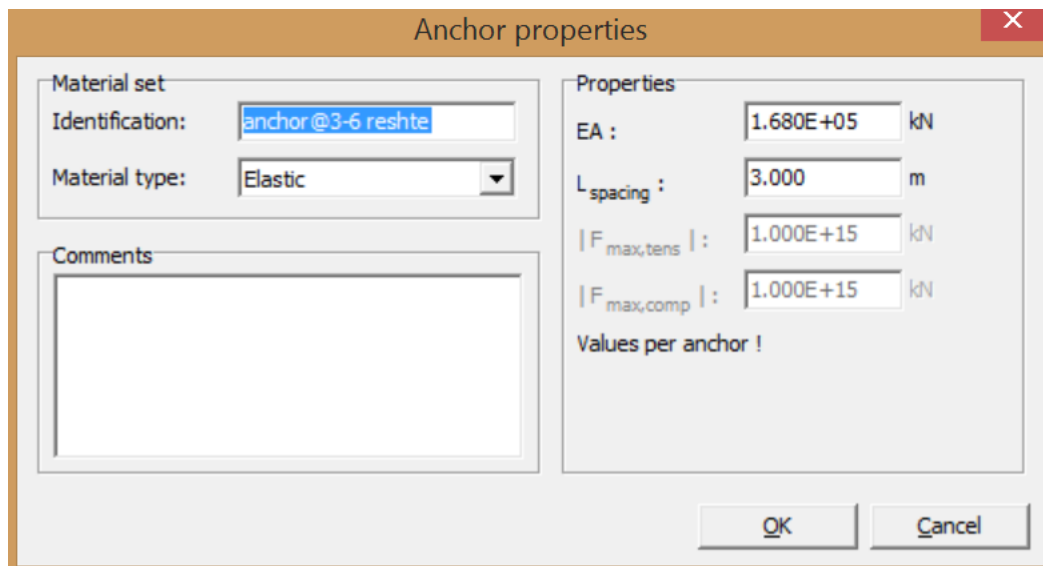


شکل ۴-۱۳- تعریف بتن پاششی دیواره به ضخامت ۱۰ سانتی متر

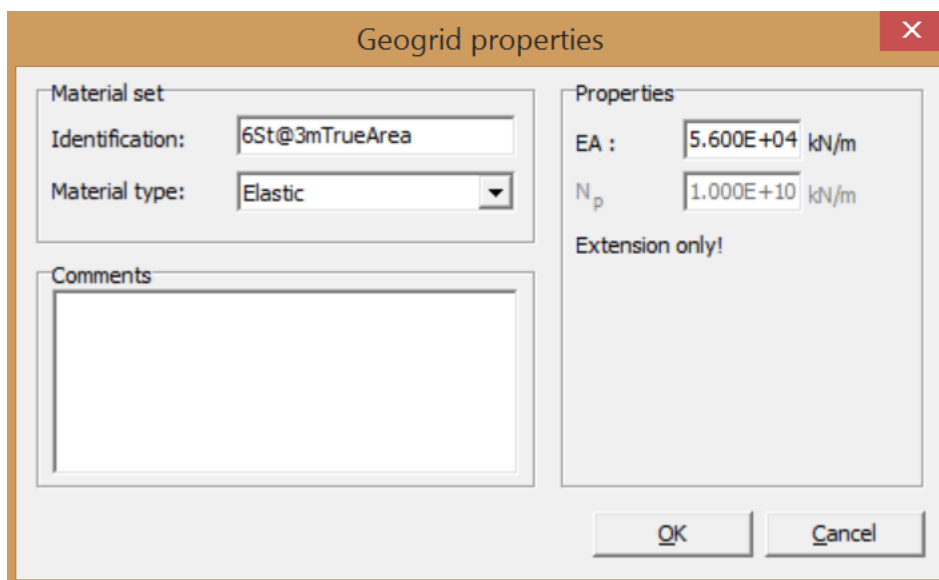
مدلسازی انکرها در طول آزاد توسط ابزار Node-to-node anchor و در طول گیردار توسط ابزار Geogride تعریف شده است. شکل ۴-۱۴ و ۴-۱۵ به ترتیب مشخصات تعریف شده برای طول آزاد و طول گیردار انکرها در محیط نرم افزار Plaxis را نشان می دهد.

مدلسازی انکرهای پیش تنیده: انکرهای پروژه حاضر به صورت ۶ رشته بوده که تحت بار ۹۰ تن (۱۵ تن به ازای هر رشته استرند) پیش تنیده شده اند، مقدار پیش تنیدگی انکرها، با توجه به اینکه در

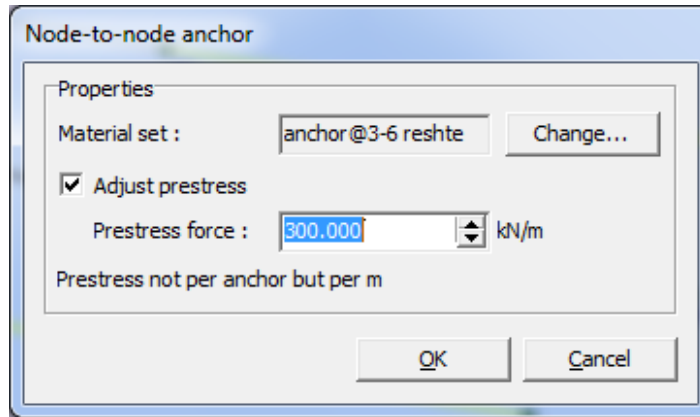
نرم افزار مقدار نیروی پیش تنیدگی به صورت نیرو در طول دیوار بایستی وارد شود، مقدار نیروی کل (۹۰ تن) بر فاصله افقی انکرها (۳ متر) تقسیم شده و سپس در نرم افزار وارد می گردد (شکل ۴-۱۶).



شکل ۴-۱۶- مشخصات طول آزاد انکرهای ۶ رشته به فواصل افقی ۳ متری



شکل ۴-۱۵- تعریف طول گیردار انکرهای ۶ رشته به فواصل افقی ۳ متری



شکل ۴-۱۶- اعمال پیش تنیدگی انکرها به میزان ۳۰۰ کیلوپاسکال (۳۰ تن)

اینترفیس: سطح تماس سولجرها و بتن پاششی تعریف شده با خاک توسط المان اینترفیس^۱ مدل شده است. مقدار ضریب اینترفیس مطابق توصیه راهنمای برنامه برابر $R_{inter}=0.67$ وارد شده است.

مرحله calculation: مدلسازی گودبرداری به صورت اجرای مرحله ای (staged Construction) و در ۱۹ مرحله انجام شد. جهت محاسبه صحیح تغییر شکل های گودبرداری لازم است جابجایی های ناشی از سایر عوامل از جمله ساختمان همسایه حذف گردد، بدین منظور به کمک ابزار موجود در نرم افزار (Reset displacement to zero) تغییر شکل های فازهای تعریف شده تا رسیدن به مرحله خاکبرداری صفر شده است. با اینکار اثر ساختمان همسایه بر گودبرداری حذف نمی گردد، بلکه تغییر شکل های ناشی از آن در مرحله قبل از شروع گودبرداری حذف می شود. همچنین نوع تحلیل به صورت الاستیو- پلاستیک در نظر گرفته شده است.

۴-۱۰- مدل‌های رفتاری استفاده شده در تحلیل

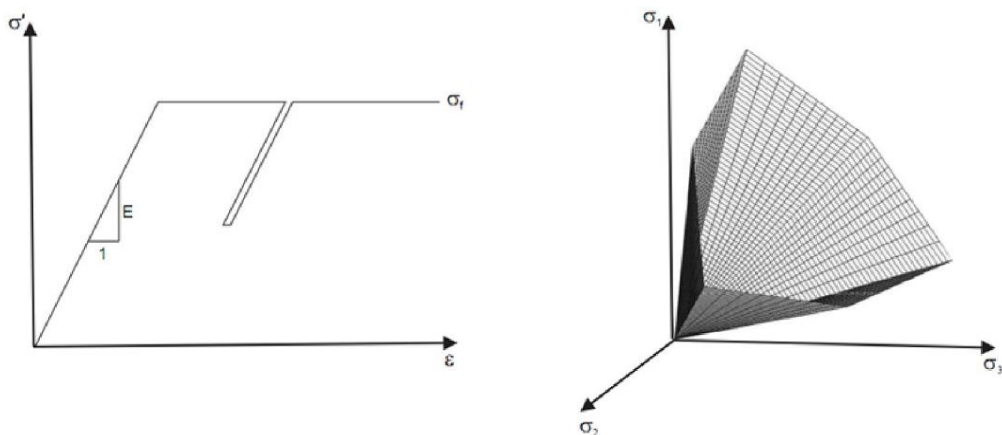
در این پایان نامه جهت بررسی و مقایسه توانایی مدل های رفتاری مختلف در محاسبه جابجایی های گودبرداری، از سه مدل رفتاری مور- کولمب (MC)، سخت شونده (HS) و سخت شونده با افزایش

¹ Interface

سختی در کرنش کوچک (HSS) استفاده شده است. در ادامه به جزئیات هر مدل رفتاری به همراه پارامترهای در نظر گرفته شده در هر کدام پرداخته می شود.

۴-۱۰-۱- مدل رفتاری مور- کولمب (MC)

رفتار مصالح در مدل رفتاری مور- کولمب به صورت الاستیک خطی- کاملاً پلاستیک می باشد. همان طور که در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است، در بارگذاری اولیه رفتار تنش-کرنش تا تنش گسیختگی معین به صورت الاستیک با سختی ثابت مدل می شود. به طور مشابه رفتار باربرداری- بارگذاری مجدد نیز با همان رفتار و سختی بارگذاری اولیه می باشد. هنگامی که تنش به حد تنش گسیختگی برسد، تغییر شکل های کاملاً پلاستیک به وقوع می پیوندد که منجر به ایجاد کرنش های برگشت ناپذیر می شود. به منظور تعیین وقوع تغییر شکل های پلاستیک؛ توابع گسیختگی تعریف شده اند. همان طور که در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است گسیختگی مصالح می تواند به صورت یک سطح گسیختگی شش وجهی بسته در فضای تنش های اصلی نشان داده شود.



شکل ۴-۱۷- رفتار تنش- کرنش مصالح در مدل مور- کولمب (سمت راست) و سطح گسیختگی مور- کولمب در فضای تنش های اصلی (سمت چپ) [محمود فرهادی، ۱۳۸۹]

پارامترهای لایه های خاک در مدل رفتاری مور-کولمب در جدول ذیل نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۷- پارامترهای ورودی برای لایه های خاک در مدل رفتاری مور-کولمب

Ψ (degree)	ν'	E' (kg/cm ²)				C' (kg/cm ²)	ϕ' (degree)	نوع خاک	عمق
		حالت ۴: پرسیومتري (باربرداري)	حالت ۳: پرسیومتري (بارگذاري)	حالت ۲: SPT	حالت ۱: سه محوري				
0	0.3	900	300	140	100	0.1	28	SM & ML	۰-۲
1	0.3	1800	600	225	140	0.15	31	CL-ML & ML	۲-۹
7	0.3	1600	550	280	240	0.1	37	SM & SC-SM	۹-۱۵
7	0.3	1900	700	300	240	0.1	38	SM & SC-SM	۱۵-۳۰
1	0.3	1500	550	330	102	0.15	31	CL & ML	۳۰-۴۴
1	0.3	1500	500	400	135	0.15	31	CL & ML	۴۴-۷۵

۴-۱۰-۲- مدل رفتاری سخت شونده (HS)

معيار گسيختگی در مدل رفتاری سخت شونده مشابه مدل مور-کولمب بوده با این تفاوت که رابطه تنش-کرنش در مدل سخت شونده به صورت هذلولوی^۱ شکل می باشد. مهمترین تفاوت مدل سخت شونده استفاده از سه پارامتر جهت محاسبه تغییر شکل ها در حالات مختلف می باشد، که شامل مدول الاستیسیته رفرنس (یا E_{50}^{ref})، مدول الاستیسیه باربرداري- بارگذاري مجدد رفرنس (یا E_{ur}^{ref}) و فشار رفرنس (P_{ref}) بوده که به طور پیش فرض مقدار آن برابر ۱۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته می شود. پارامترهای E_{50}^{ref} و E_{ur}^{ref} براساس نتایج بدست آمده از آزمایش سه محوری می باشد. در مدل رفتاری سخت شونده، سختی خاک به کمک پارامتر m با افزایش عمق، افزایش می یابد (برخلاف مدل رفتاری مور-کولمب که سختی هر لایه خاک مقدار ثابتی می باشد). شایان ذکر است با افزایش عمق، تنش همه جانبه وارده بر خاک افزایش یافته و در نتیجه می توان انتظار داشت که سختی خاک نیز افزایش

^۱ Hyperbolic

یابد. مدل رفتاری سخت شونده از روابط ذیل جهت افزایش مدول الاستیسیته در عمق استفاده می کند:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \cdot \left(\frac{c' \cos \phi' + \sigma_3' \sin \phi'}{c' \cos \phi' + P_{ref} \sin \phi'} \right)^m \quad (5-4)$$

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \cdot \left(\frac{c' \cos \phi' + \sigma_3' \sin \phi'}{c' \cos \phi' + P_{ref} \sin \phi'} \right)^m \quad (6-4)$$

که در روابط فوق σ_3' فشار موثر افقی و P_{ref} فشار رفرنس می باشد. پارامتر m بایستی به کمک آزمایش سه محوری CD برای هر پروژه به صورت مجزا تعیین گردد، هر چند برخی مراجع از جمله راهنمای نرم افزار مقدار m در حالت کلی عددی بین ۰/۵ تا ۱ عنوان شده است. لیکن براساس تجربیات حاصل از انجام آزمایش های صحرایی پرسیومتری در محل پروژه مورد مطالعه، مقادیر مدول الاستیسیته خاک در عمق افزایش کمی داشته است به گونه ای که می توان گفت که سختی هر لایه خاک تقریباً ثابت مانده است.

در این تحقیق در استفاده از مقادیر مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش پرسیومتری، پارامتر m برابر صفر فرض شده است (زیرا فرض شده است که اثرات تنش همه جانبه در آزمایش انجام شده دیده شده است). پارامترهای ورودی لایه های خاک در مدل سخت شونده در جدول ۴-۱۸ آورده شده است، لازم به ذکر است پارامترهای c' ، ϕ' ، Ψ با مدل رفتاری مور-کولمب مشترک بوده و لذا از نوشتن مجدد آنها خودداری شده است. همچنین مدول الاستیسیته باربرداری-بارگذاری مجدد به روش های سه محوری و spt، به صورت سه برابر مدول بارگذاری در نظر گرفته شده است.

جدول ۴-۱۸- پارامترهای ورودی برای لایه های خاک در مدل رفتاری سخت شونده (سایر پارامترهایی که در جدول آورده نشده است با مدل مور-کولمب مشترک می باشد)

مدول الاستیسیته به روش های مختلف:			نوع خاک	عمق
حالت ۳: پرسویمتری	حالت ۲: SPT	حالت ۱: سه محوری		
$E_{50}^{ref}=300$ $E_{ur}^{ref}=900$	$E_{50}^{ref}=140$ $E_{ur}^{ref}=420$	$E_{50}^{ref}=100$ $E_{ur}^{ref}=300$	SM & ML	۰-۲
$E_{50}^{ref}=600$ $E_{ur}^{ref}=1800$	$E_{50}^{ref}=225$ $E_{ur}^{ref}=675$	$E_{50}^{ref}=140$ $E_{ur}^{ref}=420$	CL-ML & ML	۲-۹
$E_{50}^{ref}=550$ $E_{ur}^{ref}=1600$	$E_{50}^{ref}=280$ $E_{ur}^{ref}=840$	$E_{50}^{ref}=240$ $E_{ur}^{ref}=720$	SM & SC-SM	۹-۱۵
$E_{50}^{ref}=700$ $E_{ur}^{ref}=1900$	$E_{50}^{ref}=300$ $E_{ur}^{ref}=900$	$E_{50}^{ref}=240$ $E_{ur}^{ref}=720$	SM & SC-SM	۱۵-۳۰
$E_{50}^{ref}=550$ $E_{ur}^{ref}=1500$	$E_{50}^{ref}=330$ $E_{ur}^{ref}=990$	$E_{50}^{ref}=102$ $E_{ur}^{ref}=306$	CL & ML	۳۰-۴۴
$E_{50}^{ref}=550$ $E_{ur}^{ref}=1500$	$E_{50}^{ref}=400$ $E_{ur}^{ref}=1200$	$E_{50}^{ref}=135$ $E_{ur}^{ref}=405$	CL & ML	۴۴-۷۵

۴-۱۰-۳- مدل رفتاری سخت شونده با در نظرگیری سختی در کرنش کم (HSS)

این مدل رفتاری پیشرفته که بر مبنای تحقیقات Benz (2006) ابداع شده است در حقیقت اصلاح شده مدل رفتاری سخت شونده (HS) بوده که علاوه بر مزیت های مدل HS، در آن اثر افزایش سختی خاک در کرنش های کوچک نیز لحاظ شده است. به دلیل رفتار غیر خطی خاک، در کرنش های کوچک شاهد سختی بیشتری هستیم و هر چه مقدار کرنش بیشتر می شود سختی خاک کاهش می یابد. مدل های رفتاری پیشین (MC و HS) قادر به در نظرگیری اثر کرنش بر مدول الاستیسیته نبوده و فقط مدل رفتاری سخت شونده HS اثرات تنش همه جانبه (افزایش عمق) را لحاظ می کند.

در مدل HSS علاوه بر پارامترهای مورد نیاز در مدل HS، دو پارامتر اضافی دیگر جهت در نظرگیری سختی خاک در کرنش های کوچک مورد نیاز است. این پارامترهای شامل مدول برشی رفرنس یا G_0^{ref} و کرنش برشی به ازای نسبت G_s/G_0 برابر 0.7 ، یا 0.7% می باشد.

جهت تعیین مقادیر این دو پارامتر منابع کمی در دسترس می باشد، در این پایان نامه مقدار پارامتر 0.7% براساس [Vucetic and Dobry, 1991] برابر 0.001 فرض گردیده است، همچنین مقدار G_0^{ref}

به کمک سرعت موج برشی حاصل از آزمایش ژئوفیزیک به روش درون گمانه ای^۱ در محل پروژه، به صورت ذیل تعیین شده است:

$$G_s = \rho V_s^2 = \frac{\gamma}{g} V_s^2 \quad (7-4)$$

مقادیر پارامتر G_0^{ref} برای لایه های مختلف به کمک سرعت موج برشی در محل پروژه محاسبه گردید و نتایج آن در جدول ۴-۱۹ آورده شده است (سایر پارامترهای ورودی مدل HSS که در جدول ۴-۱۹ آورده نشده است مطابق پارامترهای مدل رفتاری HS در جدول ۴-۱۸ می باشد). توجه شود در پروژه حاضر فرض گردیده اثر تنش همه جانبه در آزمایش ژئوفیزیک دیده شده است، لذا $m=0$ بوده و در نتیجه $G_0 = G_0^{ref}$ می باشد.

جدول ۴-۱۹ - محاسبه مدول برشی براساس سرعت موج برشی جهت استفاده در مدل رفتاری HSS

عمق	نوع خاک	Vs (m/s)	G ₀ = G ₀ ^{ref} (kg/cm ²)
۰-۲	SM & ML	۲۲۵	۱۰۹۰
۲-۹	CL-ML & ML	۳۳۵	۲۰۶۰
۹-۱۵	SM & SC-SM	۳۸۳	۲۷۰۰
۱۵-۳۰	SM & SC-SM	۴۷۲	۴۲۰۰
۳۰-۴۴	CL & ML	۶۵۰	۷۷۰۰
۴۴-۷۵	CL & ML	۷۲۰	۹۵۰۰

براساس ورودی های ارائه شده در قبل (جداول ۴-۱۷، ۴-۱۸ و ۴-۱۹)، تحلیل گود در حالات مختلف جهت تعیین آزمایش مناسب (سه محوری، SPT و پرسیومتری) برای انتخاب مدول الاستیسیته خاک در تحلیل گودبرداری و همچنین بررسی توانایی مدل های رفتاری مور- کولمب (MC)، سخت شونده (HS) و سخت شونده با در افزایش سختی در کرنش کوچک (HSS)، انجام شد و با نتایج پایش در محل پروژه مقایسه گردید.

¹ Downhole

۴-۱۱- تحلیل حساسیت تغییر شکل های گود به مشخصات مهندسی خاک

پس از تحلیل گود در حالات مختلف و مقایسه نتایج محاسبه شده توسط Plaxis با مقادیر جابجایی واقعی گود براساس نتایج پایش، مشاهده گردید که در صورت استفاده از نتایج آزمایش پرسویمتری و با بکارگیری مدل‌های رفتاری پیشرفته HS و HSS، جابجایی محاسبه شده توسط نرم افزار Plaxis دقیق و منطبق بر واقعیت می باشد. در این بخش جهت شناسایی میزان حساسیت پارامترهای مختلف خاک (شامل چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مدول الاستیسیته) بر تغییر شکل ها، مطالعه پارامتریک انجام شده است.

متغیرهای تعریف شده در مطالعه پارامتری در جدول ۴-۲۰ نشان داده شده است. در هر تحلیل یک پارامتر به عنوان متغیر انتخاب شده (که مقادیر آن مطابق جدول ۴-۲۰ در محدوده ۷۰ تا ۱۳۰ درصد مقدار اولیه متغیر می باشد) و سایر پارامترها ثابت باقی مانده اند (مجموعاً ۱۳ تحلیل توسط نرم افزار Plaxis انجام شد).

جدول ۴-۲۰- متغیرهای تعریف شده در مطالعه پارامتری

محدوده تغییرات					علامت	متغیر
-	$0.85 \varphi'$	$1.0 \varphi'$	$1.15 \varphi'$	-	φ'	زاویه اصطکاک
$0.7 E_{50}^{ref}$	$0.85 E_{50}^{ref}$	$1.0 E_{50}^{ref}$	$1.15 E_{50}^{ref}$	$1.3 E_{50}^{ref}$	E_{50}^{ref}	سختی خاک
&	&	&	&	&	&	
$0.7 E_{ur}^{ref}$	$0.85 E_{ur}^{ref}$	$1.0 E_{ur}^{ref}$	$1.15 E_{ur}^{ref}$	$1.3 E_{ur}^{ref}$	E_{ur}^{ref}	
$0.7 C'$	$0.85 C'$	$1.0 C'$	$1.15 C'$	$1.3 C'$	C'	چسبندگی

فصل پنجم:

بررسی و تفسیر نتایج

۵-۱- مقدمه

در این فصل نتایج بدست آمده از تحلیل عددی مدل‌های مختلف به منظور شناخت رفتار گود از نظر مقدار جابجایی دیواره، ارائه خواهد شد. در بخش اول این فصل نتایج حاصل از مدل‌های رفتاری مختلف و با استفاده از نتایج مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش‌های پرسیومتری، spt و سه محوری، بررسی و تفسیر شده است. همان‌طور که در ادامه تشریح خواهد شد مدل‌های رفتاری پیشرفته نظیر HS و HSS تونایی بهتری نسبت به مدل‌های رفتاری قدیمی تر مانند مور-کولمب خواهند داشت که سبب تخمین صحیح میزان جابجایی دیواره گود می‌گردد. همچنین استفاده از مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش صحرایی پرسیومتری، با توجه به ماهیت آن نسبت به سایر آزمایش‌های رایج موجود، مزیت‌های ویژه‌ای دارد.

در بخش بعدی این فصل نتایج حاصل از مطالعه پارامتریک به منظور بررسی میزان حساسیت گود به پارامترهای مهندسی خاک (شامل مدول الاستیسیته، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی)، ارائه و بحث شده است.

۵-۲- نتایج آنالیز برگشتی گود با مدل‌های رفتاری مختلف و براساس مدول

الاستیسیته حاصل از آزمایش‌های مختلف

همان‌طور که در فصل قبل گفته شد جهت تعیین مدول الاستیسیته E خاک روش‌های آزمایشگاهی و صحرایی مختلف وجود دارد. مقادیر حاصل برای پارامتر E در هر آزمایش متفاوت می‌باشد. برخی از دلایل اختلاف در مقادیر E در آزمایش‌های مختلف را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- مقدار کرنش اعمال شده در حین آزمایش: مهمترین علت اختلاف E حاصل از آزمایش‌های مختلف، به غیر خطی بودن رفتار خاک مربوط می‌شود. در این صورت مقدار مدول

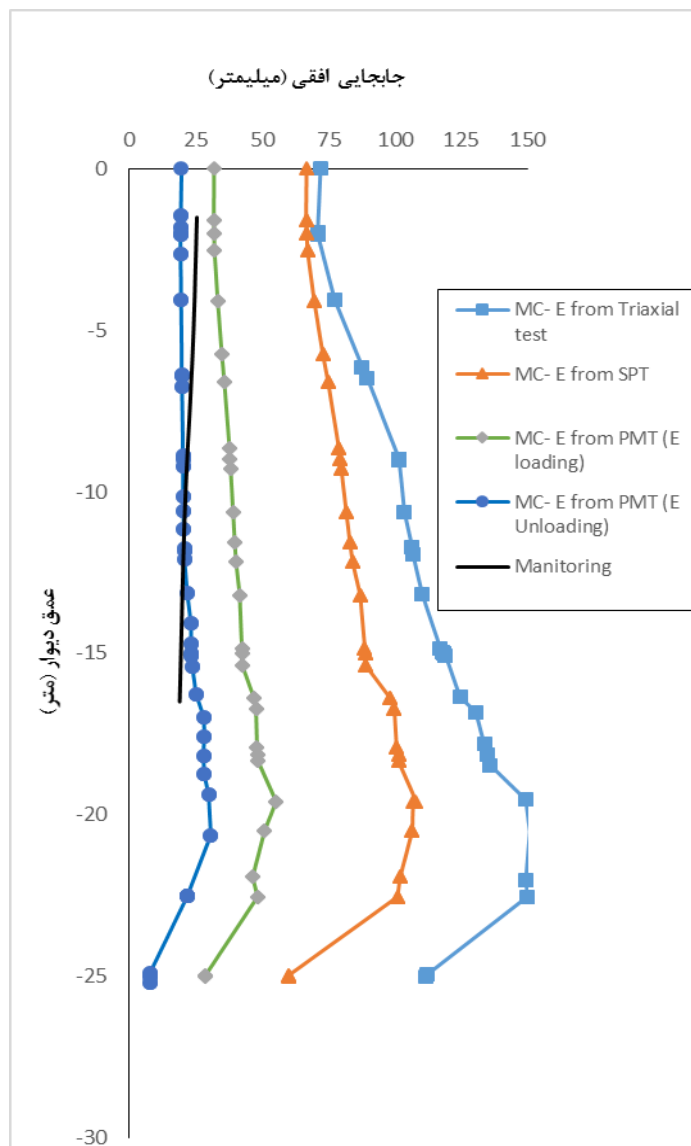
- الاستیسیته برای خاک تابعی از میزان کرنش اعمال شده به نمونه خواهد بود. سختی خاک با افزایش کرنش کم می شود زیرا به تدریج شیب منحنی تنش-کرنش در خاک کاهش می یابد.
- **اثر عمق یا تنش همه جانبه:** هر چه عمق نمونه خاک بیشتر باشد، تحت فشار همه جانبه بیشتری ناشی از وزن خاک فوقانی قرار خواهد داشت. به همین دلیل انتظار می رود مدول الاستیسیته خاک با عمق افزایش یابد.
 - **غیر ایزوتروپ بودن رفتار خاک:** خاک واقعی معمولاً غیر یکنواخت است، لذا مشخصات مهندسی آن از جمله مدول الاستیسیته می تواند در جهات مختلف غیر یکسان می باشد. بسته به ماهیت آزمایش های ژئوتکنیکی، مدول می تواند در جهت افقی یا قائم بدست آید.
 - **پیش تحکیمی:** پیش تحکیمی سبب افزایش سختی و افزایش فشار افقی در خاک می گردد. مراجع مختلف رابطه مدول الاستیسیته و ضریب فشار افقی خاک در حالت عادی تحکیم و پیش تحکیم را به صورت $E_{oc} = \sqrt{ocr} \times E_{nc}$ و $k_{0-oc} = \sqrt{ocr} \times k_{0-nc}$ بیان نموده اند. به علاوه در خاکهای پیش تحکیم یافته مقدار مدول الاستیسیته در جهت افقی E_{s-h} می تواند بسیار بیشتر از مدول الاستیسیته در راستای قائم E_{s-v} باشد.
 - **دستخوردگی:** انجام آزمون های آزمایشگاهی همواره در مرحله نمونه گیری و حمل به دلیل بهم خوردن بافت خاک مخصوصاً در خاک درشت دانه، دارای خطا می باشد. به همین دلیل نتایج آزمایش های صحرایی (SPT و پرسیومتری) معتبر تر از آزمایشگاهی می باشد.
 - **غیر محلی بودن روابط تجربی:** روابط تجربی مختلفی جهت تخمین E برحسب مدول الاستیسیته براساس عدد SPT ارائه شده است، لیکن این روابط براساس آزمایش های انجام شده در مناطق دیگر بدست آمده است که استفاده از آن ممکن است باعث خطا در نتایج گردد. ضمن اینکه آزمایش SPT قادر به تعیین مستقیم مدول الاستیسیته نبوده، لذا دقیق بودن

مدول الاستیسیته در این روش به دقت آزمایشی بستگی دارد که E حاصل آن برای ارائه همبستگی با نتایج SPT بکار رفته است.

۵-۲-۱- نتایج آنالیز برگشتی دیواره گود در شرایط مختلف

در این بخش نتایج تحلیل دیواره گود (جابجایی افقی) با استفاده از مدول های بدست آمده از آزمایش های سه محوری، SPT و پرسیومتری و با مدل های رفتاری مور-کولمب (MC)، سخت شونده (HS) و سخت شونده با افزایش سختی در کرنش کوچک (HSS) ارائه شده است. در نمودارهای ارائه شده در این بخش، مقادیر واقعی جابجایی افقی دیواره براساس متوسط گیری از نتایج نقاط مانیتورینگ شده توسط دوربین نقشه برداری، آورده شده است.

در شکل ۵-۱ مقدار جابجایی دیواره گود در خاک با مدل رفتاری مور-کولمب و به ازای مقادیر Es حاصل از آزمایش های سه محوری، SPT و پرسیومتری آورده شده است. مقادیر واقعی جابجایی دیواره براساس نتایج مانیتورینگ تا عمق ۱۷ متر نیز در شکل فوق نشان داده شده است. مطابق شکل فوق جابجایی محاسبه شده در مدل رفتاری مور-کولمب از بالا به پایین دیوار افزایش می یابد، در حالیکه نتایج مانیتورینگ روندی عکس دارد. علت این امر به مدل رفتاری استفاده شده مربوط می شود، از آنجاییکه مدل مور-کولمب فقط از یک Es استفاده می کند و مدول باربرداری- بارگذاری مجدد در آن لحاظ نمی گردد، مقدار تورم ناشی از گودبرداری در اطراف گود بیش از مقدار واقعی محاسبه می گردد. این مقدار زیاد تورم سبب جابجایی افقی زیاد در پایین دیواره گود شده است. حداکثر جابجایی محاسبه شده برای دیواره در مدل رفتاری مور-کولمب در عمق $0.75H \sim 0.9H$ رخ داده است، لیکن طبق نتایج مانیتورینگ حداکثر جابجایی دیواره در تراز سطح زمین اتفاق افتاده است.



شکل ۵-۱- مقادیر جابجایی دیواره گود براساس E_s حاصل از آزمایش های سه محوری، spt و پرسیومتری (مدول بارگذاری و باربرداری) و با استفاده از مدل رفتاری مور-کولمب

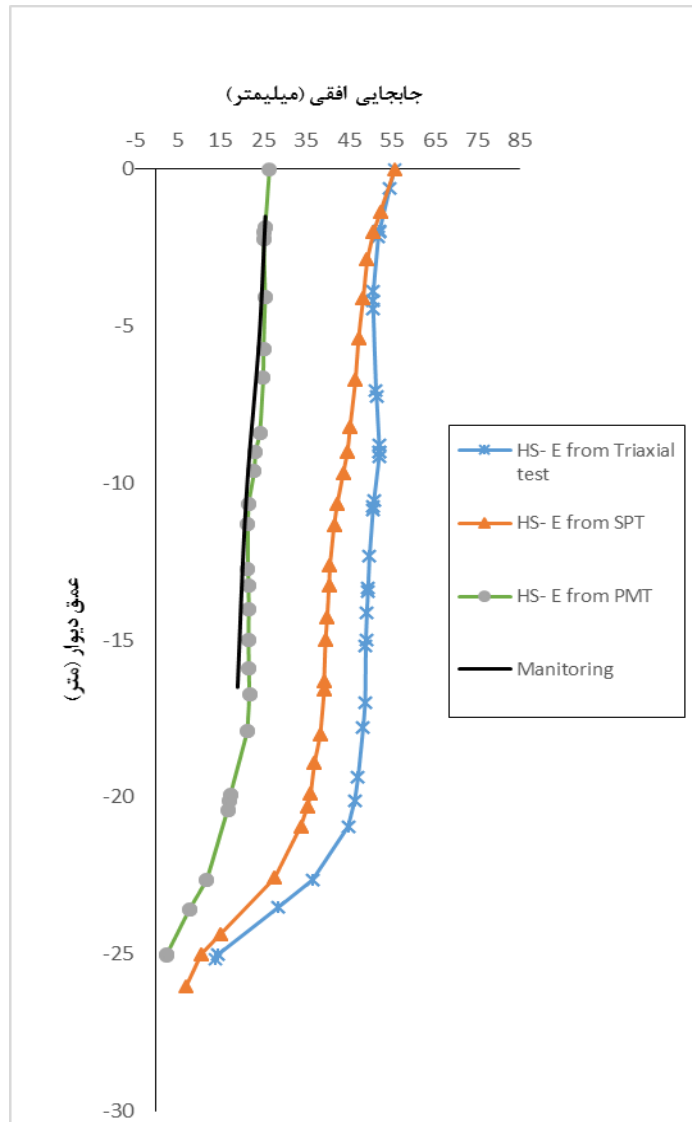
در صورتی که از مدول باربرداری منارد (مدول باربرداری-بارگذاری مجدد) حاصل از آزمایش صحرایی پرسیومتری استفاده شود، مقدار جابجایی افقی محاسبه شده در بالای دیواره به مقادیر واقعی نزدیک خواهد بود، لیکن جابجایی قسمت پایینی دیوار بیش از مقدار واقعی محاسبه می گردد.

اگر از Es حاصل از آزمایش پرسیومتری در شاخه بارگذاری (مدول بارگذاری) استفاده شود، میزان تغییر شکل‌های محاسباتی توسط نرم افزار در بالای دیواره، کمی بیشتر از مقادیر واقعی می باشد.

در صورت استفاده از Es حاصل از آزمایش‌های سه محوری و SPT، جابجایی دیواره بسیار دست بالا محاسبه می گردد، لذا استفاده از آزمایش های سه محوری و روابط تجربی در محاسبه Es، در تحلیل گودهای عمیق به هیچ عنوان توصیه نمی شود.

شکستگی های جزئی مشاهده شده در منحنی های جابجایی محاسبه شده توسط نرم افزار در شکل ۵-۱، ناشی از نیروی پیش تنیدگی انکرها بوده که به صورت نقطه ای وارد شده است.

در شکل ۵-۲ مقدار جابجایی محاسبه شده برای دیواره گود در خاک با مدل رفتاری سخت شونده و به ازای مقادیر Es حاصل از آزمایش های سه محوری، spt و پرسیومتری به همراه نتایج مانیتورینگ دیواره آورده شده است. با توجه به اینکه مدل رفتاری سخت شونده از دو مدول الاستیسیته متفاوت در ناحیه بارگذاری و باربرداری-بارگذاری مجدد استفاده می کند، مقدار تورم ناشی از خاکبرداری در اطراف دیواره به صورت صحیح محاسبه شده و مانند مدل مور-کولمب شاهد تغییر شکل بیش از اندازه در پایین دیواره گود نیستیم.



شکل ۵-۲- مقادیر جابجایی دیواره گود براساس E_s حاصل از آزمایش های سه محوری، SPT و پرسیومتری و با استفاده از مدل رفتاری سخت شونده HS

با توجه به موارد فوق و براساس نتایج بدست آمده در شکل فوق می توان گفت در صورت استفاده از E_s و E_{ur} (مدول بارگذاری و مدول بابررداری-بارگذاری مجدد) حاصل از آزمایش پرسیومتری، جابجایی دیواره با دقت خوبی محاسبه گردیده، به گونه ای که با نتایج مانیتورینگ دیواره نیز همخوانی خوبی خواهد داشت.

منحنیهای جابجایی محاسبه شده در طول دیواره در مدل رفتاری سخت شونده مشابه نتایج مانیتورینگ روندی نزولی داشته و حداکثر جلوآمدگی دیواره در تراز سطح زمین می باشد.

در صورت استفاده از مقادیر مدول حاصل از حاصل از آزمایشهای سه محوری و SPT در مدل سخت شونده، جابجایی دیواره بیش از مقدار واقعی محاسبه شده است.

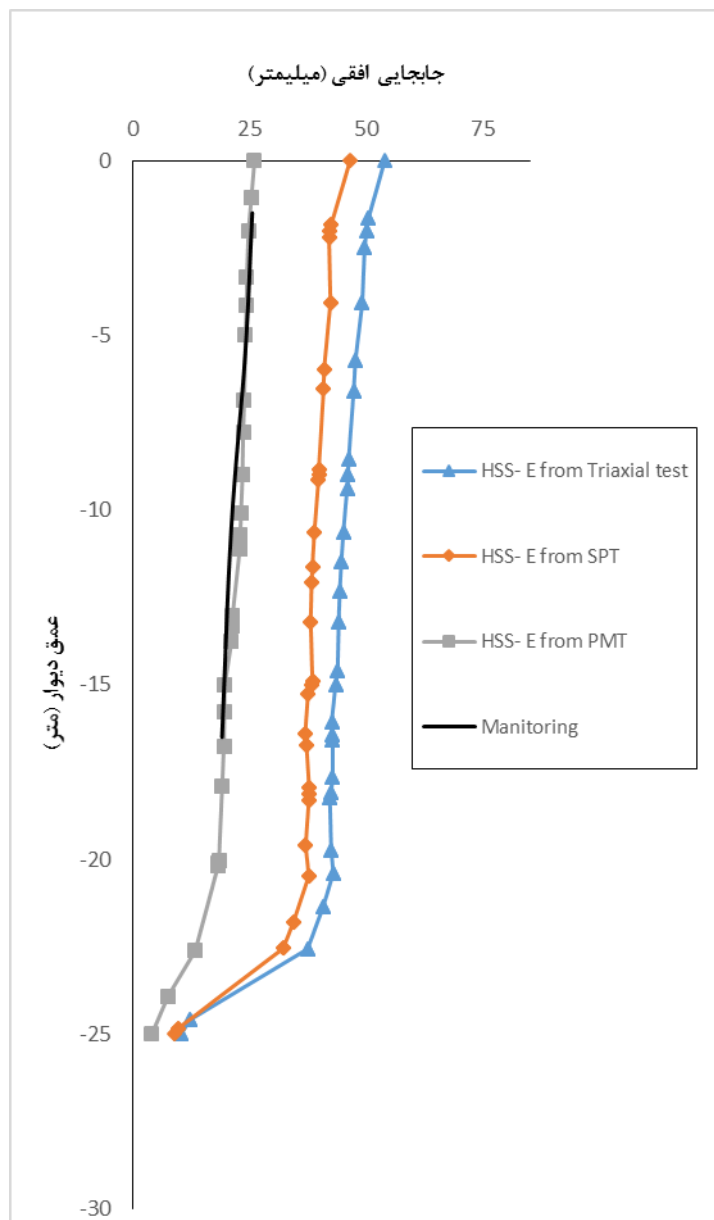
با توجه به اینکه در جابجایی دیواره گود، مدول الاستیسیته افقی مد نظر می باشد، لذا یک مزیت آزمایش پرسیومتری نسبت به سایر آزمایش ها (سه محوری و SPT) در تعیین مدول الاستیسیته خاک در جهت افقی E_s-h می باشد.

با مقایسه نتایج بدست آمده در مدل رفتاری مور-کولمب و سخت شونده (شکل های ۵-۱ و ۵-۲)، نتیجه می شود مدل رفتاری سخت شونده نسبت به مور-کولمب دقیق تر بوده، به خصوص با اعمال مدول باربرداری در مدل سخت شونده، معایب اصلی مدل مور-کولمب برطرف می شود. مزیت دیگر مدل سخت شونده، امکان در نظرگیری اثر تنش همه جانبه در مدل می باشد که سبب می شود مدول الاستیسیته با افزایش عمق، افزایش یابد.

مقادیر جابجایی محاسبه شده برای دیواره گود در خاک با مدل رفتاری HSS یا "سخت شونده با افزایش سختی در کرنش کم" در شکل ۵-۳ آورده شده است. تغییر شکل‌های محاسباتی در مدل رفتاری HSS نسبت به مدل رفتاری HS کمی بهبود یافته است، مانند مدل رفتاری سخت شونده، تورم ناشی از باربرداری اعمال گردیده است. به گونه ای که جابجایی در قسمت بالایی دیوار بسیار نزدیک به واقعیت بوده است.

علت کاهش جزئی جابجایی محاسباتی افقی دیواره در مدل رفتاری HSS نسبت به مدل رفتاری HS، در نظرگیری افزایش سختی خاک در کرنش های کوچک می باشد.

به طور کلی می توان نتیجه گرفت در محاسبه جابجایی دیواره گود توسط نرم افزار Plaxis، مدل رفتاری HS از مدل رفتاری MC بهتر بوده و مدل HSS، از مدل رفتاری HS نیز بهتر می باشد.



شکل ۳-۵- مقادیر جابجایی دیواره گود براساس E_s حاصل از آزمایش های سه محوری، spt و پرسیومتری و با استفاده از مدل رفتاری "سخت شونده با افزایش سختی کرنش کوچک" (HSS)

۵-۲-۲- نتایج آنالیز برگشتی جهت محاسبه نشست بالای دیواره در شرایط مختلف

در طی مانیتورینگ انجام شده در محل پروژه، جابجایی افقی دیواره در ترازهای مختلف ثبت گردیده است لیکن مقدار نشست فقط در بالای دیواره گود برداشت شده است، در این بخش به بررسی نشست سطح زمین در بالای گود پراخته شده است.

در جدول ۵-۱ مقدار نشست واقعی در لبه گود براساس نتایج مانیتورینگ و همچنین نشست محاسبه شده توسط نرم افزار در مدل‌های رفتاری مختلف آورده شده است.

جدول ۵-۱- مقایسه میزان نشست لبه گود در مدل‌های رفتاری مختلف

مقدار نشست واقعی (میلیمتر)	MC				HS			HSS			مدل رفتاری
	Tria.	SPT	PMT (E _{loading})	PMT (E _{unloading})	Tria.	SPT	PMT	Triaxial	SPT	PMT	نوع آزمایش تعیین E
۲۲~۳۲	-۶۰ (تورم)	-۳۸ (تورم)	۶	۱۲	۱۵	۳۵	۱۲	۲۶	۳۶	۲۲	مقدار نشست بر حسب میلیمتر

مقدار نشست واقعی لبه گود براساس نتایج پایش در محدوده ۲۲~۳۲ میلیمتر می باشد. همان طور که مشاهده می گردد در مدل رفتاری مور-کولمب (و در صورت استفاده از E با مقادیر پایین مانند آزمایش های سه محوری و SPT) مقدار نشست محاسبه شده سطح زمین غیر منطقی می باشد به گونه ای که نشست به صورت منفی محاسبه شده که به معنی تورم می باشد. علت این امر به دلیل تورم بیش از حد خاک در در مدل مور-کولمب در اثر باربرداری ناشی از گود می باشد. پس می توان نتیجه گیری نمود مدل رفتاری مور-کولمب مقدار نشست سطح زمین مجاور گود را کمتر از مقادیر واقعی محاسبه می کند.

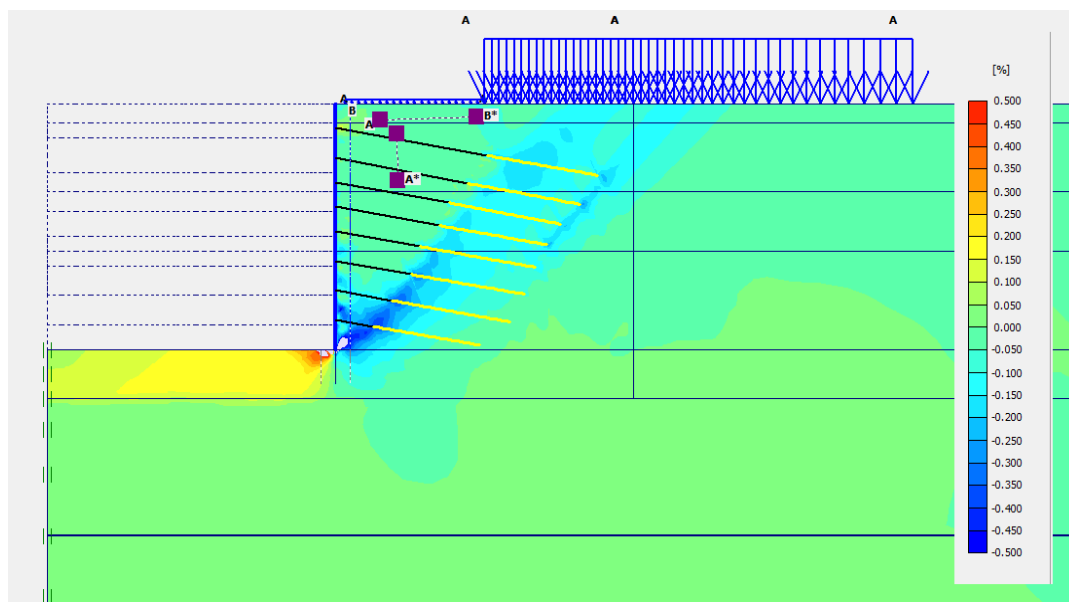
در صورت مدلسازی خاک با مدل رفتاری سخت شونده، نتایج بهبود اساسی یافته است به گونه ای که مقدار جابجایی محاسباتی به مقادیر واقعی نزدیک تر شده، هر چند هنوز از مقدار واقعی اندکی کمتر می باشد. در حقیقت توانایی مدل سخت شونده در محاسبه دقیق تورم ناشی از باربرداری سبب منطقی شدن نتایج نسبت به مدل مور-کولمب شده است.

بهترین نتایج برای نشست سطح زمین، در مدل رفتاری HSS بدست آمده است. این مدل رفتاری علاوه بر مزیت های مدل رفتاری HS، اثرات سطح کرنش را در سختی خاک لحاظ کرده است به گونه ای که مدول الاستیسیته در کرنش های کوچک افزایش داده شده است، لذا مقدار تورم در جهت واقعی شدن نتایج، کاهش یافته و در نتیجه نشست ناشی از گودبرداری افزایش یافته و در محدوده مقادیر پایش شده قرار گرفته است.

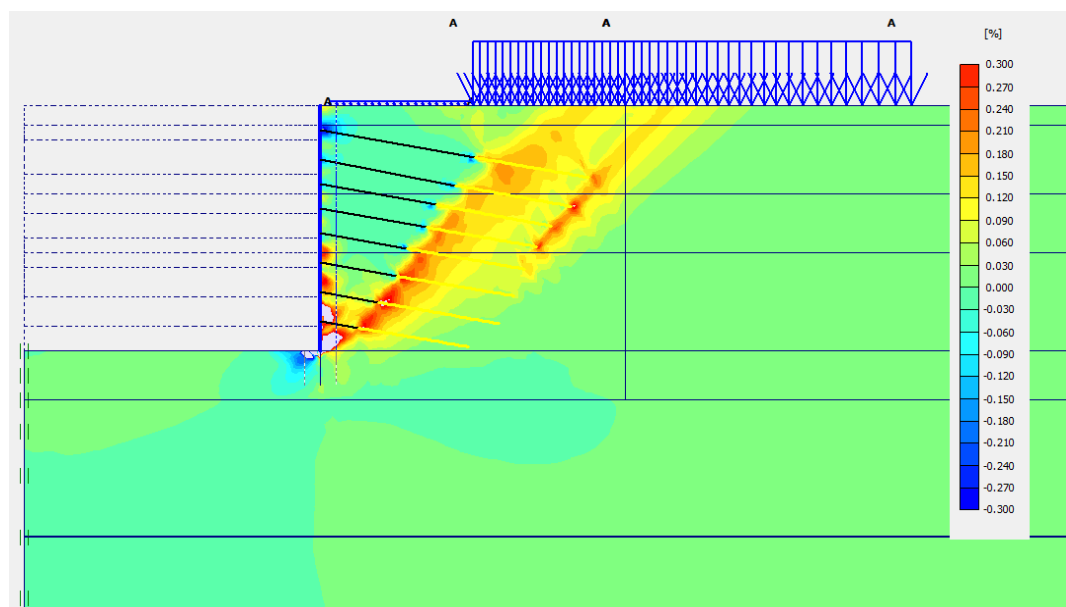
با توجه به مطالب بالا می توان بدین صورت جمع بندی کرد که مدل رفتاری مور-کولمب مقدار نشست سطح زمین را کمتر از واقعیت ارائه می دهد به گونه ای که ممکن است سطح زمین به جای نشست، تورم نماید. مدل رفتاری HS و HSS، مقادیر منطقی ارائه می نمایند، لیکن مدل HSS نسبت به مدل HS به دلیل در نظرگیری اثرات سطح کرنش بر سختی خاک، نتایج دقیق تری ارائه می نماید.

در شکل های ۴-۵ و ۵-۵ مقادیر کرنش محوری در جهت های قائم و افقی (براساس مدل رفتاری HSS و استفاده از آزمایش پرسیمتری) آورده شده است. مقدار کرنش محوری در جهت های افقی و قائم در فاصله دیواره گود تا بخش گیردار انکرها در محدوده $0/08 \sim 0/01$ درصد می باشد (در برخی نقاط محدود مانند محل اتصال انکرها به دیواره، به دلیل وجود بار متمرکز وارد شده به دیواره، مقادیر کرنشهای محوری افقی و کرنش برشی تا حدود $0/5$ درصد افزایش یافته است)، سپس در محدوده گیردار انکرها، کرنشهای محوری به مقدار حداکثر $0/35 \sim 0/1$ افزایش یافته و در نقاط بعد از طول گیردار انکرها، مقادیر کرنشها دوباره کاهش یافته و سپس صفر می گردد. مقادیر کرنش برشی در نقاط مختلف نیز در محدوده کرنشهای محوری افقی و قائم می باشد (شکل ۵-۶).

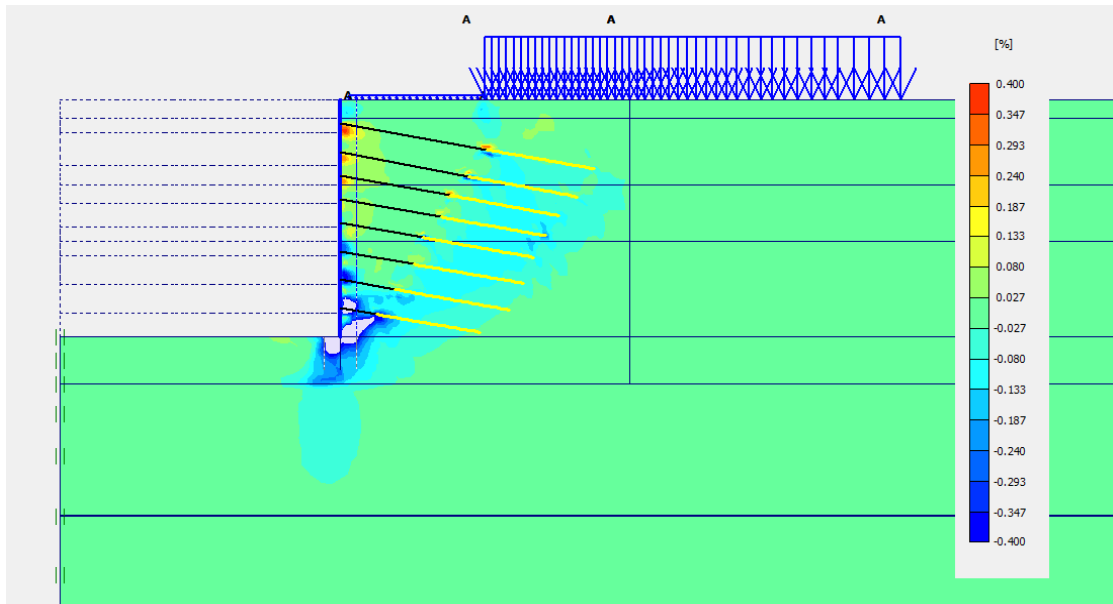
مطابق [فاخر، ۱۳۹۲] در اکثر سازه های ژئوتکنیکی کرنش محوری در زمین های معمولی در محدوده زیر ۰/۱ درصد و گاهی تا ۰/۵ درصد می باشد. همان طور که قبلا گفته شد، مقدار کرنش محوری در پروژه مورد مطالعه (خصوصا در پشت دیواره) کمتر از ۰/۱ درصد می باشد.



شکل ۴-۵- مقادیر کرنش محوری قائم در پروژه مورد مطالعه (در مدل رفتاری HSS)



شکل ۵-۵- مقادیر کرنش محوری افقی در پروژه مورد مطالعه (در مدل رفتاری HSS)



شکل ۵-۶- مقادیر کرنش برشی در پروژه مورد مطالعه (در مدل رفتاری HSS)

۵-۲-۳- جمع بندی نتایج و پیشنهاد روش مناسب جهت تحلیل تغییرشکل‌های گودبرداری

در بخش های قبل نتایج تحلیل دیواره و نشست بالای گود در حالات مختلف (مدلهای رفتاری MC، HS و HSS و براساس مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش های مختلف) بررسی شد و با نتایج حاصل از مانیتورینگ رفتار گود مقایسه گردید. براساس نتایج حاصل می توان نتیجه گیری نمود که در صورت بکارگیری مدل رفتاری HSS و استفاده از مقادیر مدول الاستیسیته بارگذاری E_s و باربرداری-بارگذاری مجدد E_{ur} حاصل از آزمایش پرسیومتری، تغییر شکل محاسباتی توسط نرم افزار با مقادیر واقعی مطابقت خواهد داشت.

همچنین براساس نتایج آنالیز برگشتی، برای خاک ماسه ای پروژه مورد مطالعه (SM و SC-SM)، ضریب تبدیل مدول منارد در آزمایش پرسیومتری به مدول الاستیسیته خاک، برابر یک می باشد (به بخش ۳-۲-۱ مراجعه گردد).

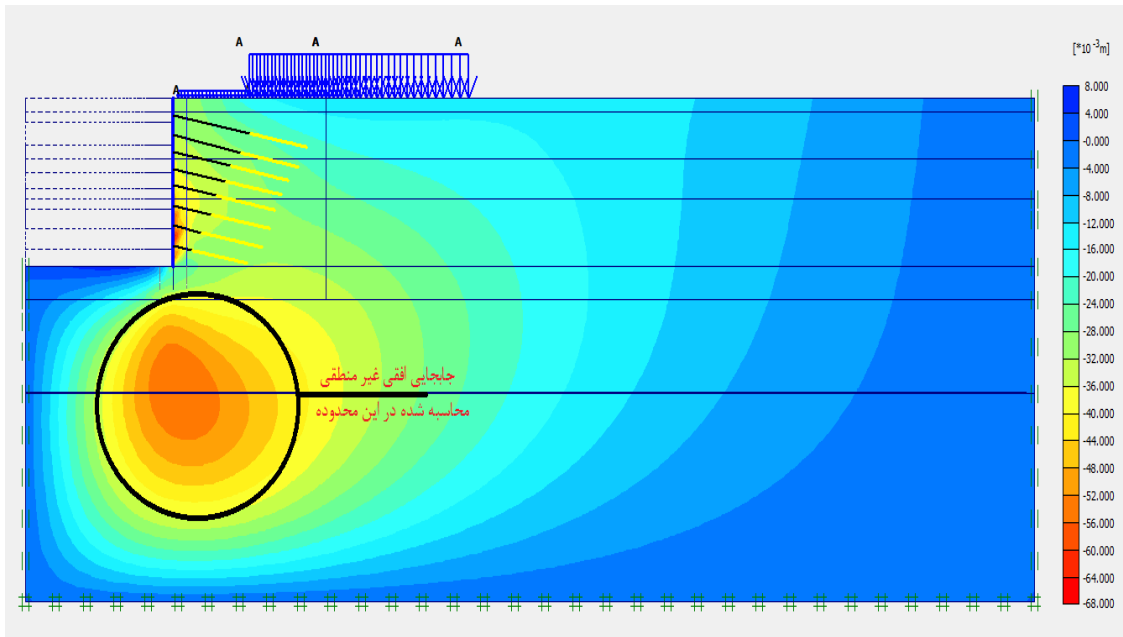
۵-۳- مقایسه کیفی کانتورهای جابجایی افقی در مدل های رفتاری مختلف

در بخش ۵-۲ مقادیر جابجایی محاسبه شده توسط نرم افزار در مدل های رفتاری مختلف ارائه گردید. در این قسمت به برخی تفاوت های کانتورهای جابجایی محاسبه شده در مدل های رفتاری مختلف پرداخته می شود.

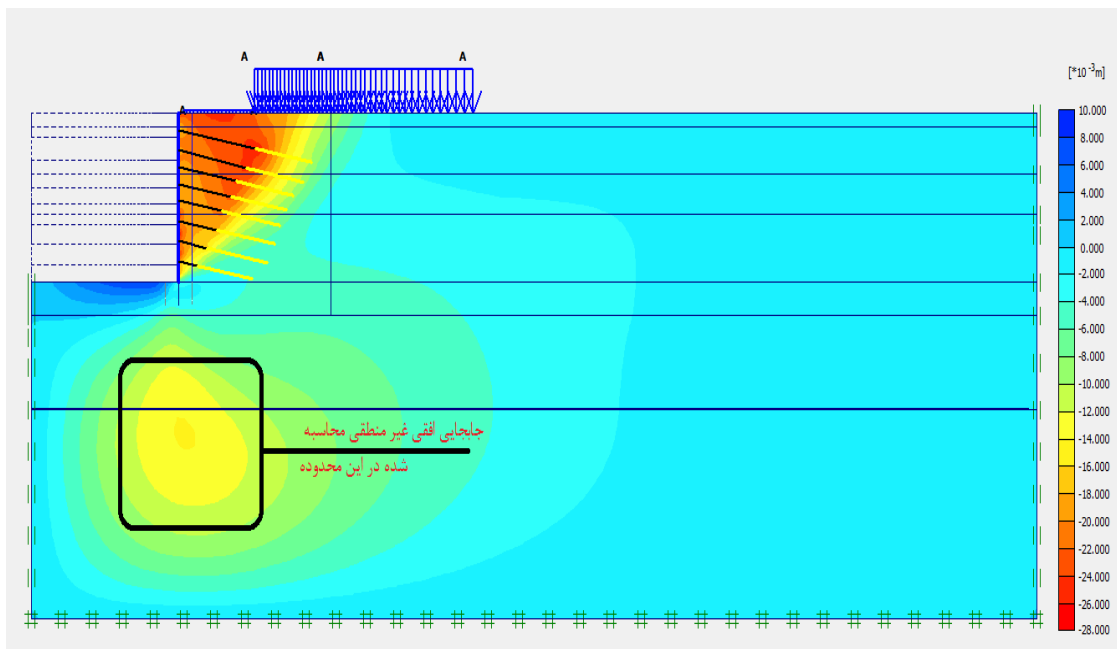
مطابق شکل ۵-۷ در مدل رفتاری مور- کولمب جابجایی افقی تا فاصله حدود ۱۵۰ متر (۶ برابر عمق گود) از دیواره گود ادامه دارد. در حالیکه در مدل های رفتاری HS و HSS در فواصل بیش از حدود ۴۰ متر (معادل ۱/۷ عمق گود) میزان جابجایی افقی قابل چشم پوشی است.

در مقایسه مدل رفتاری HS و HSS می توان گفت مدل رفتاری HSS مقادیر جابجایی افقی را در فواصل زیاد از گود برابر صفر ارائه داده است، در حالیکه در مدل رفتاری HS در فواصل طولانی از گود، مقدار جابجایی غیر صفر (در حدود ۱~۳ میلی متر) محاسبه شده است. علت این امر در نظرگیری سطح کرنش در محاسبه سختی خاک می باشد، به گونه ای که کرنش در فواصل طولانی بسیار کم بوده لذا مدول الاستیسیته خاک نیز مقادیر بالاتری خواهد داشت.

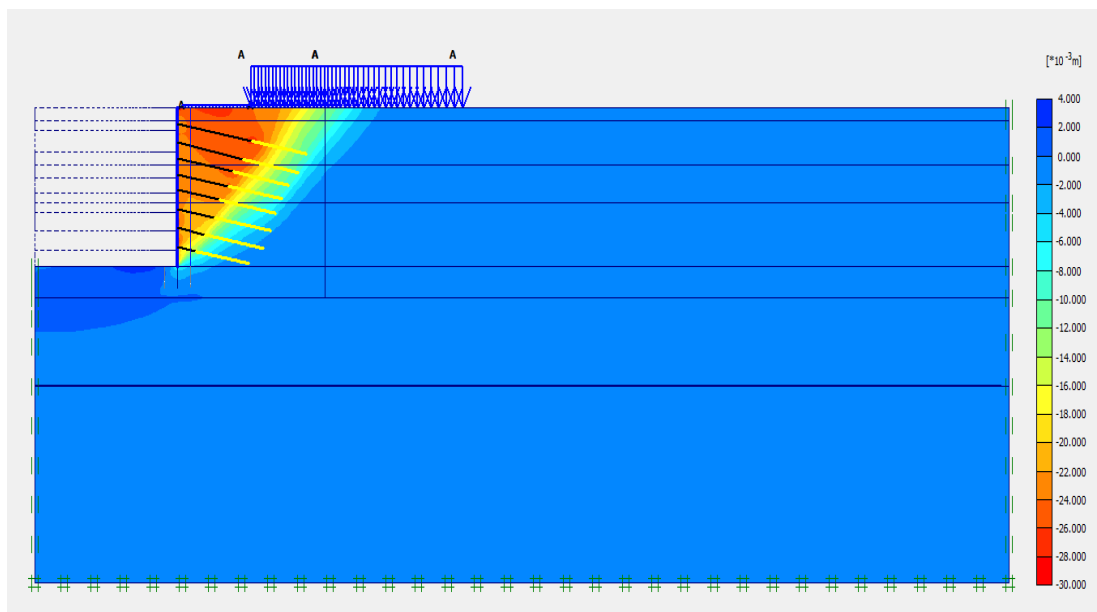
اختلاف دیگر مدل های رفتاری استفاده شده در این پایان نامه، جابجایی غیر منطقی محاسبه شده در مدل های رفتاری MC و HS در تراز ۲۰ تا ۴۰ متر پایین تر از کف گود می باشد (شکل های ۵-۷ و ۵-۸)، لیکن در مدل رفتاری HSS چنین وضعیتی مشاهده نمی گردد.



شکل ۵-۷- جابجایی افقی در مدل رفتاری مور- کولمب MC



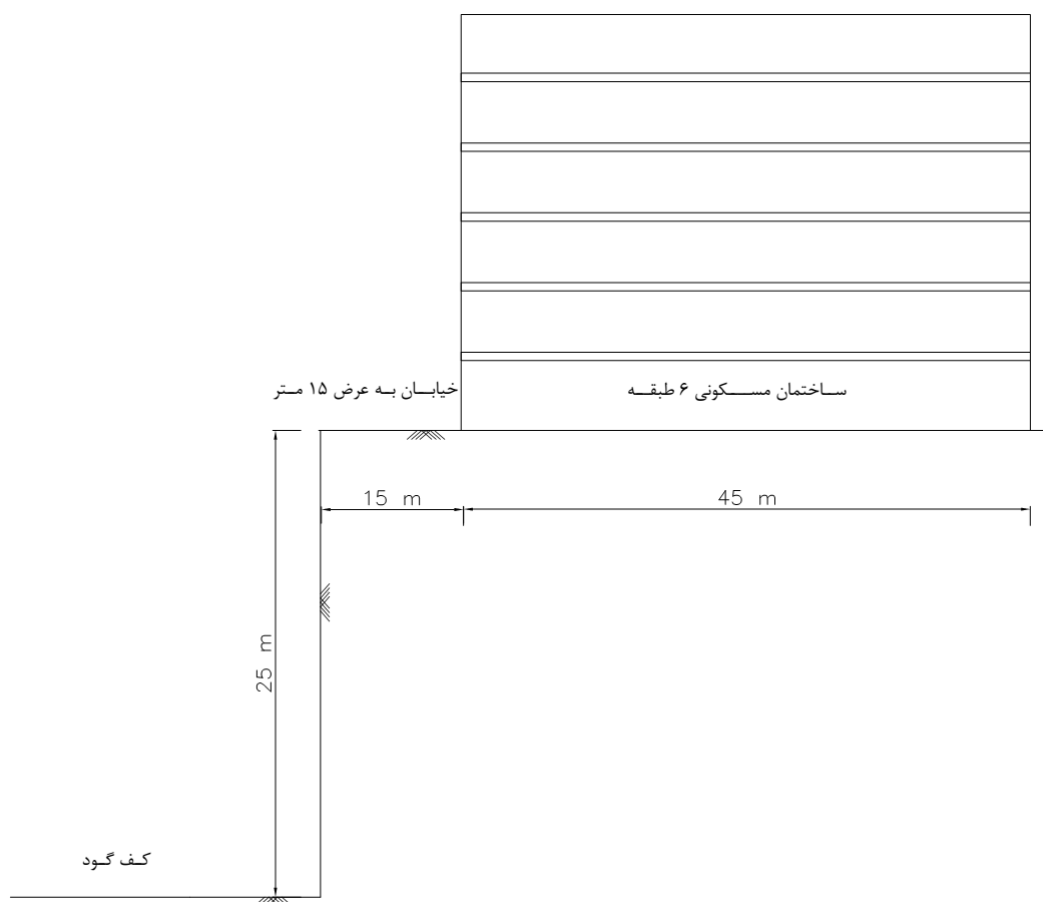
شکل ۵-۸- جابجایی افقی در مدل رفتاری سخت شونده HS



شکل ۵-۹- جابجایی افقی در مدل رفتاری سخت شونده HSS

۵-۴- تحلیل حساسیت تغییر شکل های گود به مشخصات مهندسی خاک

در این بخش نتایج حاصل از مطالعه پارامتریک جهت بررسی میزان اثر پارامترهای مهندسی خاک (شامل مدول الاستیسیته، زاویه اصطکاک و چسبندگی) بر تغییر شکل های گود، ارائه شده است. محدوده تغییرات نمودارهای ارائه شده در این بخش در بازه ۷۰ تا ۱۳۰ درصد مقادیر پارامترهای اولیه در مدل می باشد. مدل رفتاری خاک به صورت HSS در نظر گرفته شده و از مقادیر مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش پرسیومتری استفاده شده است. مطابق نتایج بدست آمده علاوه بر مدول الاستیسیته خاک، پارامترهای مقاومت برشی خصوصا زاویه اصطکاک داخلی نیز تاثیر قابل توجهی در نتایج تغییر شکل گود دارد.



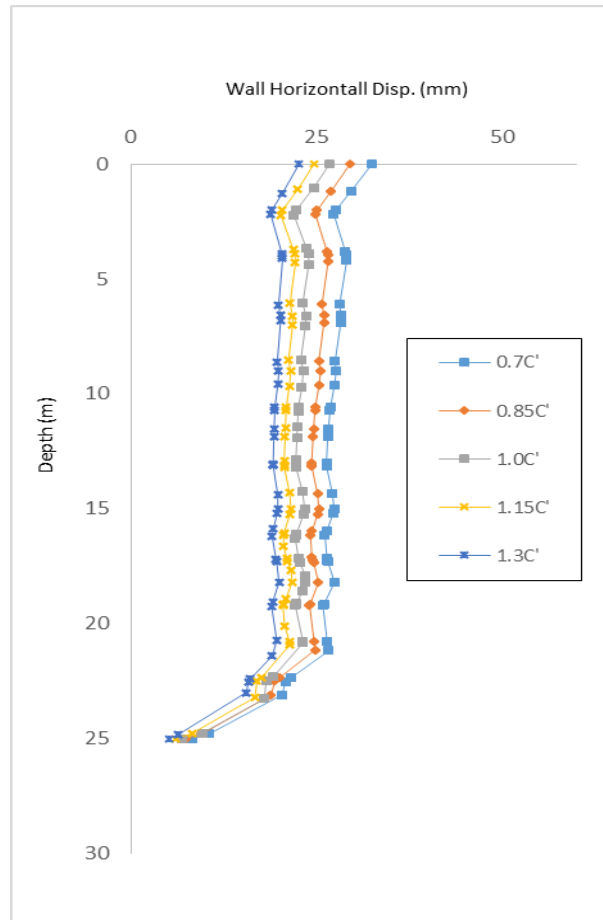
شکل ۵-۱۰- وضعیت گود و مجاور آن در مدلسازی المان محدود جهت مطالعه پارامتریک

۵-۴-۱- نتایج میزان حساسیت تغییر شکل های گود به چسبندگی خاک

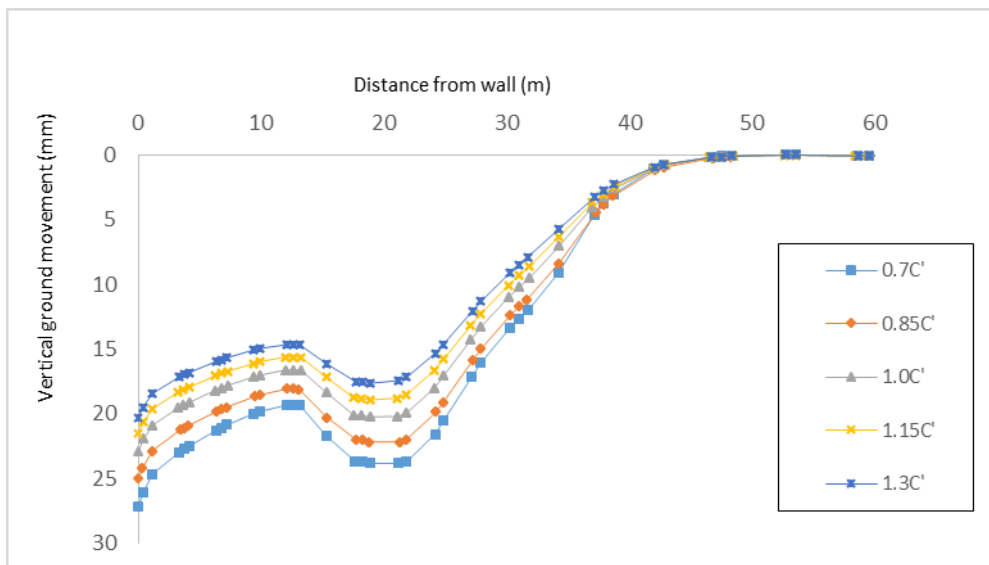
تغییرات جابجایی افقی دیواره نیز براساس مقادیر مختلف چسبندگی خاک در شکل ۵-۱۱ آورده شده است. در سیستم سازه نگهبان انکرینگ (یا شمع شناور و انکرینگ) حداکثر جابجایی افقی دیواره و نشست سطح زمین در لبه گود اتفاق می افتد، لیکن در پروژه حاضر مطابق شکل ۵-۱۲، به دلیل وجود ساختمان ۶ طبقه در محدوده فاصله ۱۵ تا ۶۰ متری از گود، حداکثر نشست در زیر ساختمان مجاور رخ داده است.

میزان نشست زمین در فاصله بیش از حدود ۴۳~۴۰ متری از لبه گود (معادل 1.7H)، بسیار ناچیز و قابل چشم پوشی می باشد. وجود ساختمان همسایه در این محدوده تاثیری بر میزان نشست نخواهد داشت.

براساس نتایج بدست آمده از تحلیل عددی، وجود سربار در مجاورت گود (مانند ساختمان) سبب نشست اضافی زمین می شود.

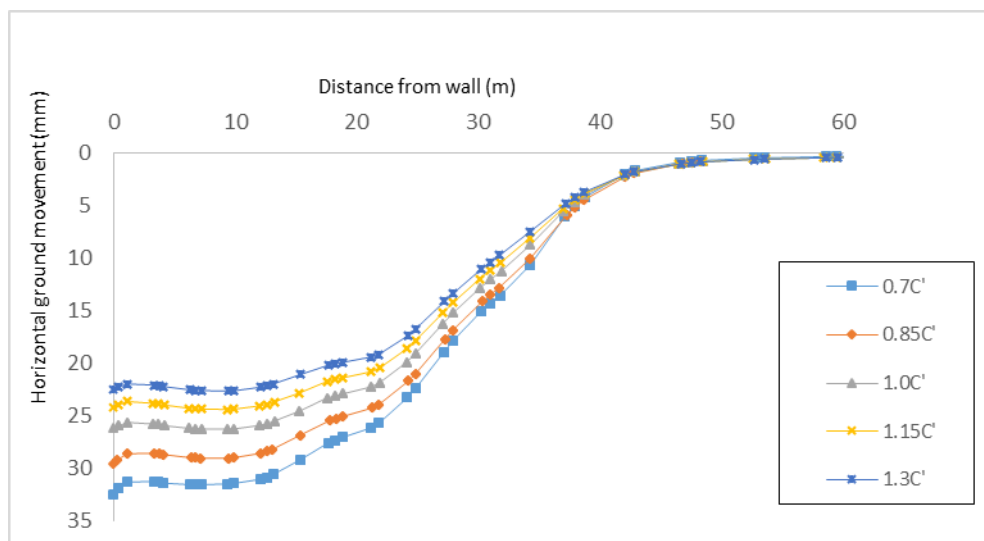


شکل ۵-۱۱- منحنی جابجایی افقی دیواره گود برحسب مقادیر مختلف چسبندگی در محدوده ۷۵ تا ۱۳۰ درصد چسبندگی لایه های خاک محل پروژه



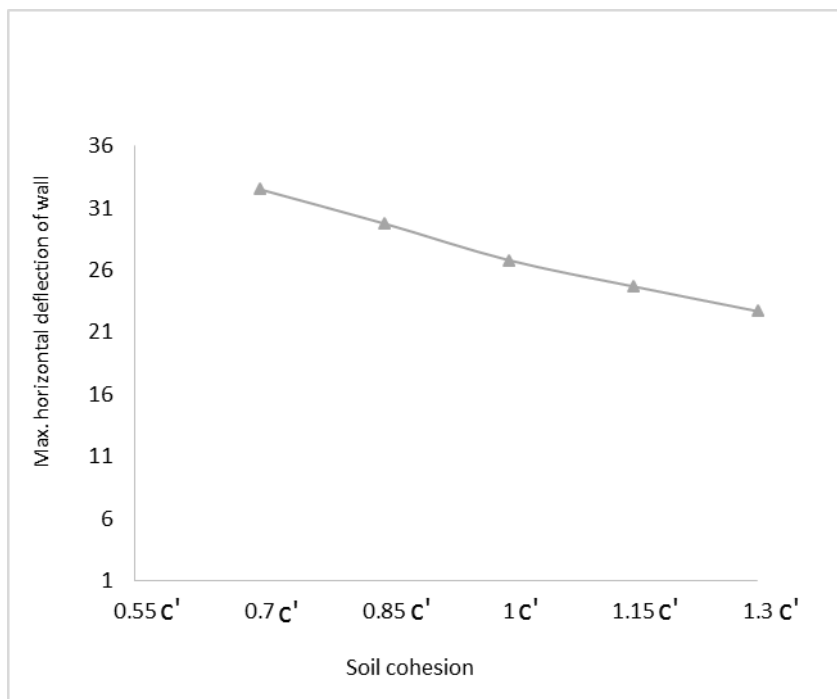
شکل ۵-۱۲- منحنی نشست زمین مجاور گود برحسب مقادیر مختلف چسبندگی در محدوده ۷۵ تا ۱۳۰ درصد چسبندگی لایه های خاک محل پروژه

منحنی های جابجایی افقی سطح زمین در شکل ۵-۱۳ آورده شده است، مطابق ن شکل، وجود سربار ناشی از ساختمان در ۱۵ متری گود تاثیری بر میزان جابجایی افقی سطح زمین ندارد. مشابه نتایج بدست آمده برای نشست، در فاصله حدود ۴۳~۴۰ متری از لبه گود (معادل 1.7H)، مقدار جابجایی افقی زمین بسیار ناچیز و قابل صرفه نظر می باشد.

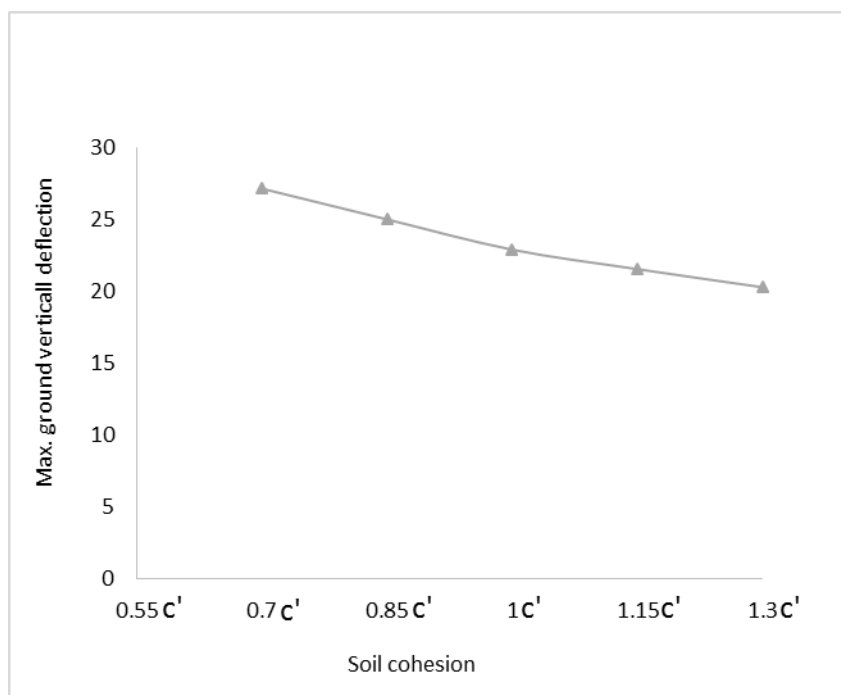


شکل ۵-۱۳- منحنی جابجایی افقی زمین مجاور گود برحسب مقادیر مختلف چسبندگی در محدوده ۷۵ تا ۱۳۰ درصد چسبندگی لایه های خاک محل پروژه

منحنی تغییرات حداکثر جابجایی افقی دیواره و حداکثر نشست زمین براساس چسبندگی خاک به ترتیب در شکل‌های ۵-۱۴ و ۵-۱۵ نشان داده شده است.

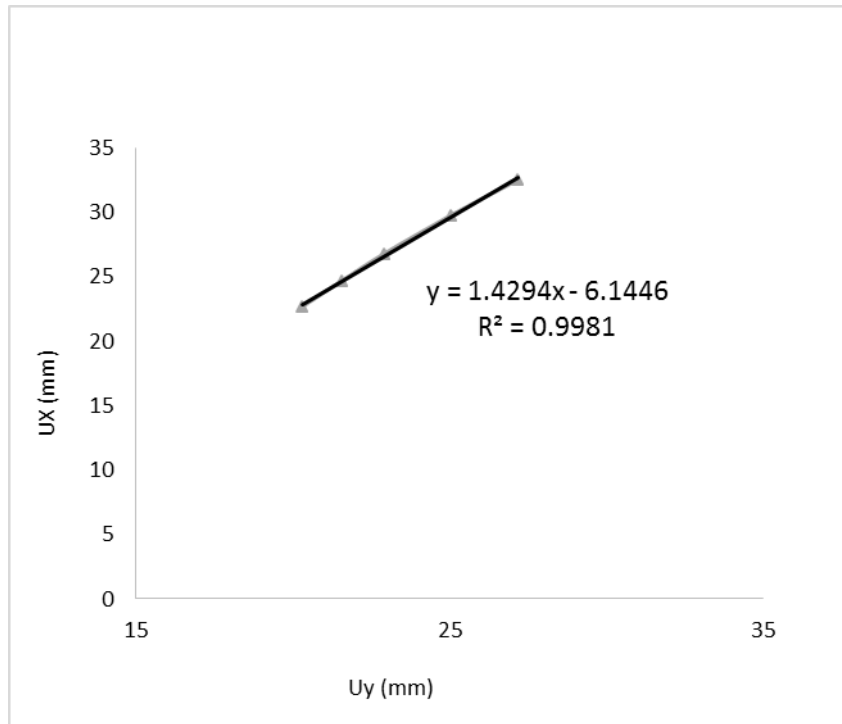


شکل ۵-۱۴- مقادیر حداکثر جابجایی افقی دیواره برحسب مقادیر مختلف چسبندگی در محدوده ۷۵ تا ۱۳۰ درصد چسبندگی لایه های خاک محل پروژه



شکل ۵-۱۵- مقادیر حداکثر نشست زمین مجاور گود برحسب مقادیر مختلف چسبندگی در محدوده ۷۵ تا ۱۳۰ درصد چسبندگی لایه های خاک محل پروژه (جداکثر نشست در بالای دیوار رخ داده است)

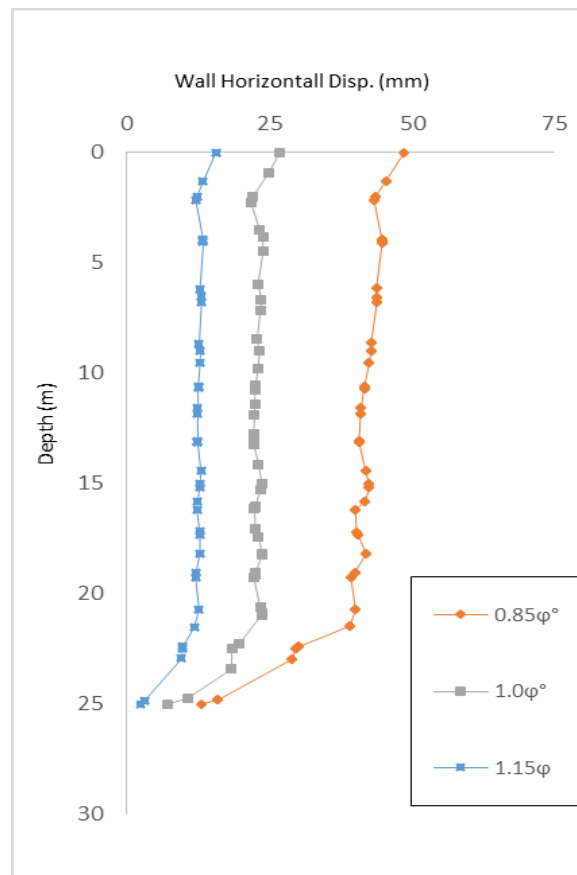
مطابق شکل ۵-۱۶ رابطه حداکثر جابجایی افقی دیواره و حداکثر نشست زمین مجاور به صورت خطی می باشد، همچنین مقدار حداکثر جابجایی افقی بیش از نشست حداکثر می باشد.



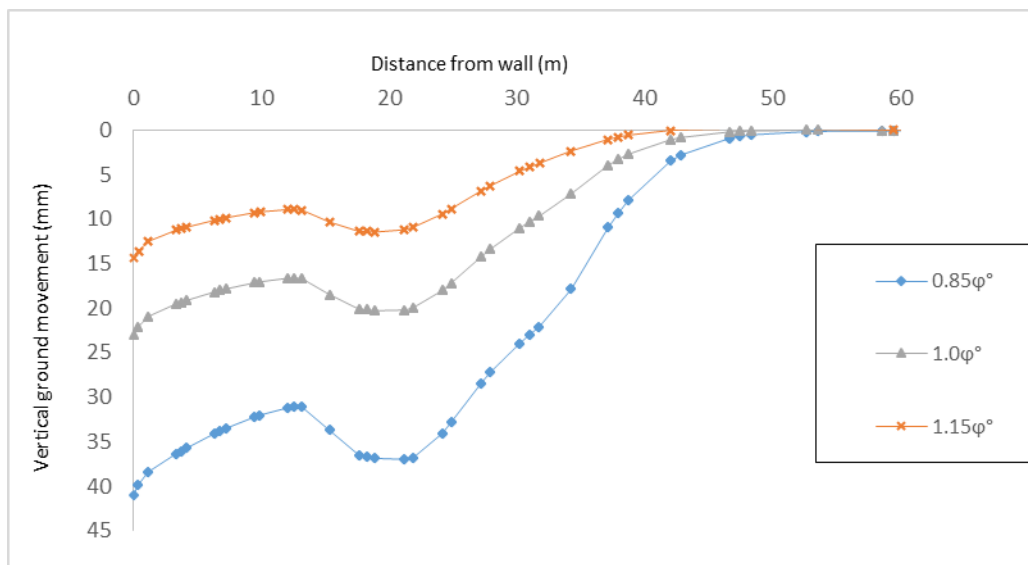
شکل ۵-۱۶- رابطه حداکثر نشست زمین و حداکثر جابجایی افقی دیواره برحسب مقادیر مختلف چسبندگی در محدوده ۷۵ تا ۱۳۰ درصد چسبندگی لایه های خاک محل پروژه (حداکثر نشست در بالای دیوار رخ داده است)

۵-۴-۲- نمودارهای میزان حساسیت تغییر شکل های گود به زاویه اصطکاک داخلی خاک

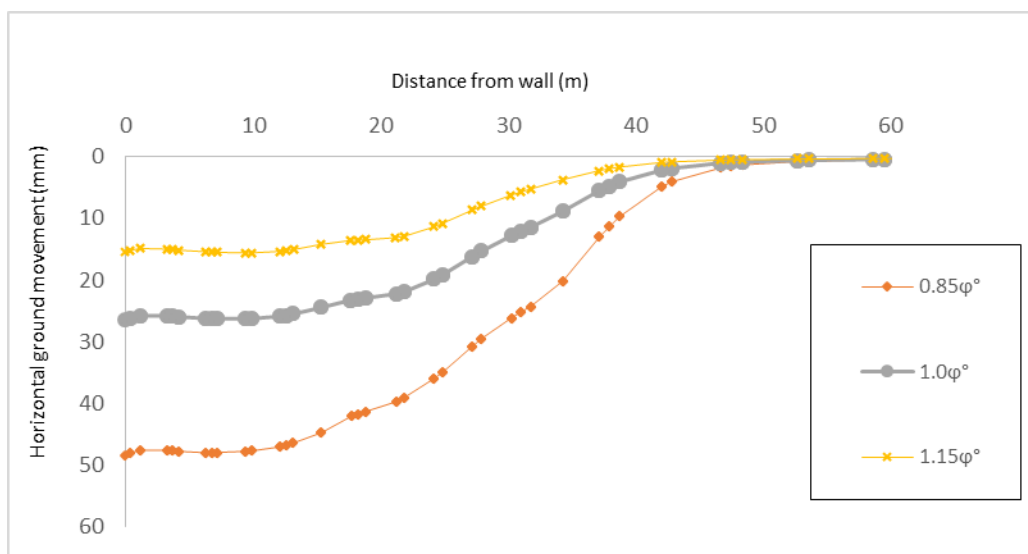
مطابق شکل های ۵-۱۷ تا ۵-۱۹، میزان حساسیت پارامتر ϕ بر تغییر شکل های دیواره و سطح زمین زیاد می باشد. لذا در محاسبه بهینه تغییر شکل ها، بایستی به زاویه اصطکاک داخلی اهمیت ویژه قائل شد.



شکل ۵-۱۷- منحنی جابجایی افقی دیواره گود بر حسب مقادیر مختلف ϕ در محدوده ۸۵ تا ۱۱۵ درصد زاویه اصطکاک خاک محل پروژه

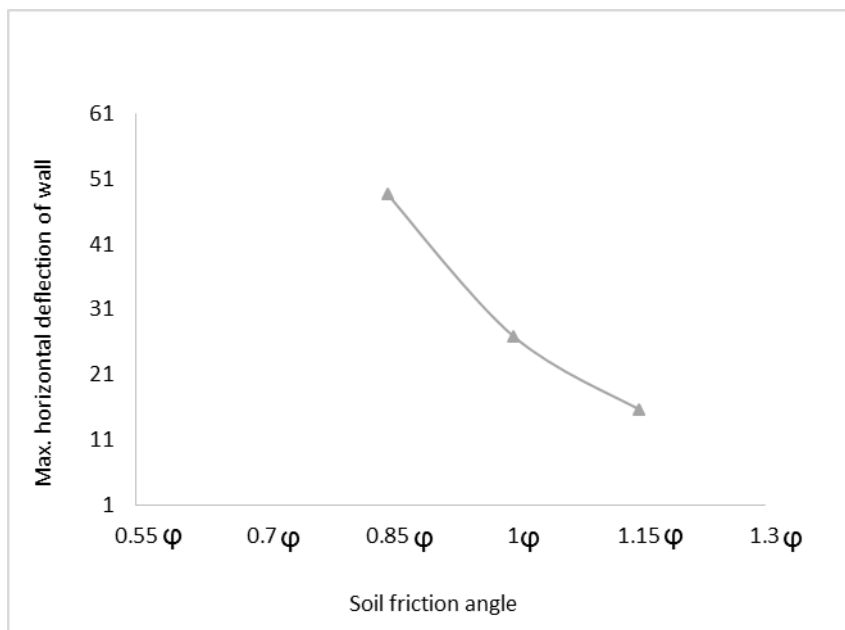


شکل ۵-۱۸- منحنی نشست زمین مجاور گود برحسب مقادیر مختلف ϕ در محدوده ۸۵ تا ۱۱۵ درصد زاویه اصطکاک خاک محل پروژه

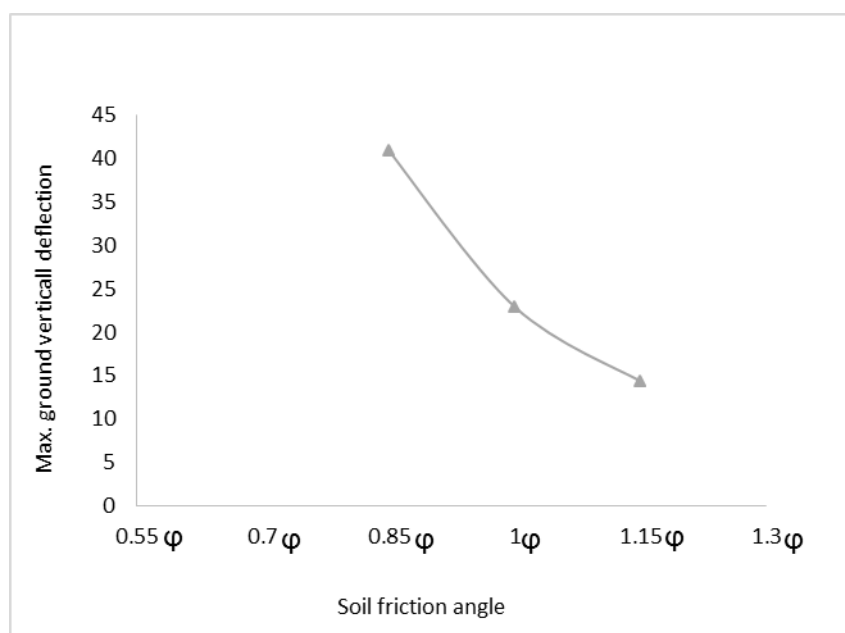


شکل ۵-۱۹- منحنی جابجایی افقی زمین مجاور گود برحسب مقادیر مختلف ϕ در محدوده ۸۵ تا ۱۱۵ درصد زاویه اصطکاک خاک محل پروژه

منحنی تغییرات حداکثر جابجایی افقی دیواره و حداکثر نشست زمین براساس زاویه اصطکاک خاک به ترتیب در شکل‌های ۵-۲۰ و ۵-۲۱ نشان داده شده است.

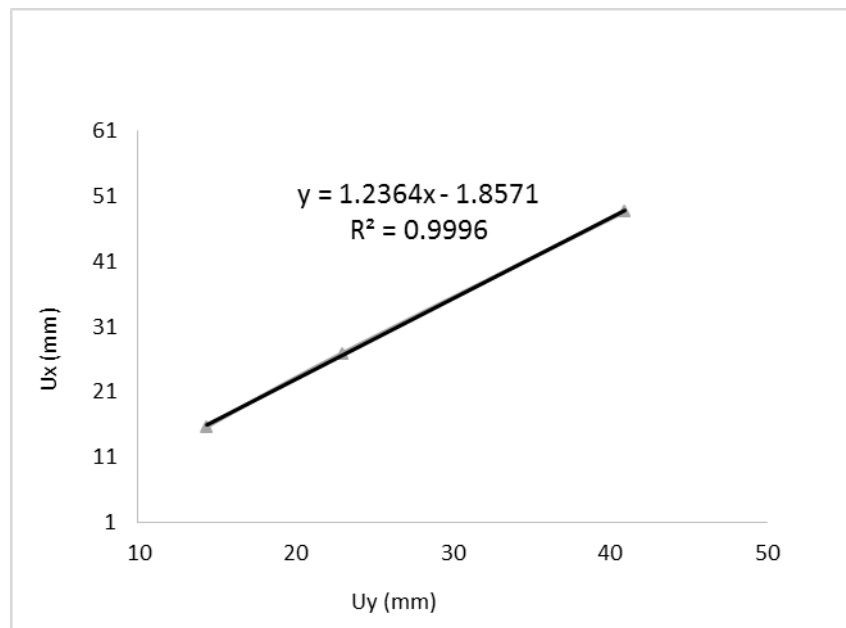


شکل ۵-۲۰- مقادیر حداکثر جابجایی افقی دیواره برحسب مقادیر مختلف ϕ در محدوده ۸۵ تا ۱۱۵ درصد زاویه اصطکاک خاک محل پروژه



شکل ۵-۲۱- مقادیر حداکثر نشست زمین برحسب مقادیر مختلف ϕ در محدوده ۸۵ تا ۱۱۵ درصد زاویه اصطکاک خاک محل پروژه (حداکثر نشست در بالای دیوار رخ داده است)

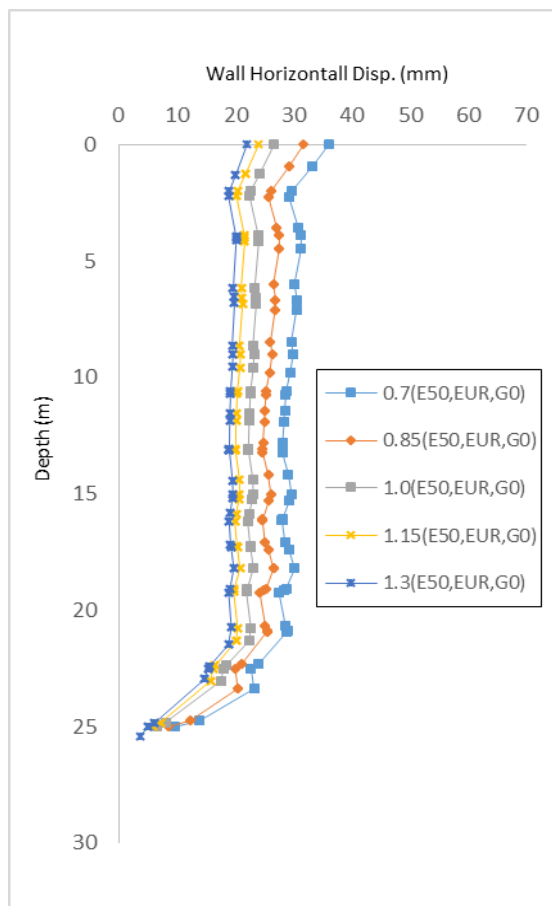
مطابق شکل ۵-۲۲ رابطه حداکثر جابجایی افقی دیواره و حداکثر نشست زمین مجاور به صورت خطی می باشد، همان طور که مشاهده می گردد مقدار حداکثر جابجایی افقی بیش از نشست حداکثر می باشد.



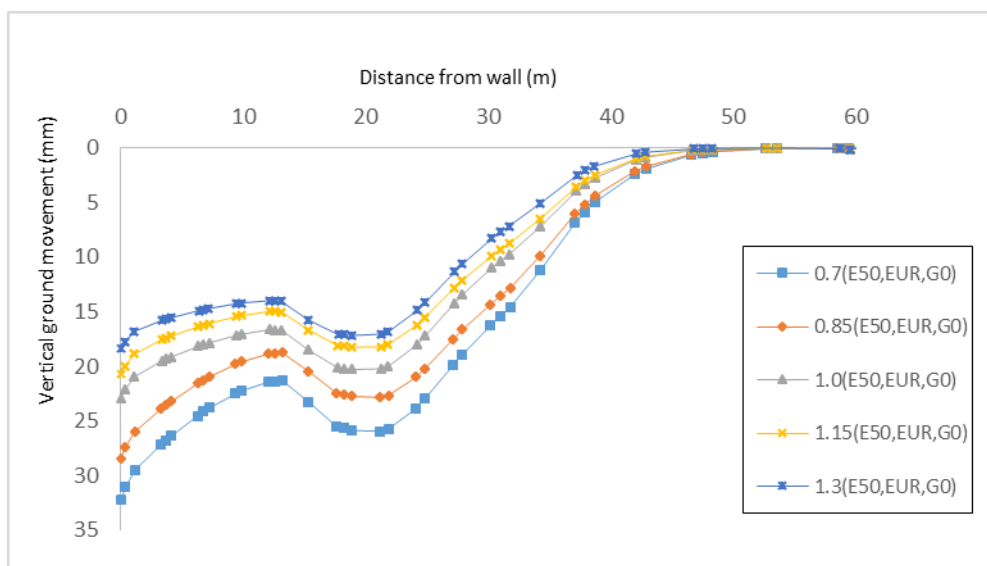
شکل ۵-۲۲- رابطه حداکثر نشست زمین و حداکثر جابجایی افقی دیواره برحسب مقادیر مختلف ϕ در محدوده ۸۵ تا ۱۱۵ درصد زاویه اصطکاک خاک محل پروژه (جداکثر نشست در بالای دیوار رخ داده است)

۵-۴-۳- نمودارهای میزان حساسیت تغییر شکل های گود به سختی خاک

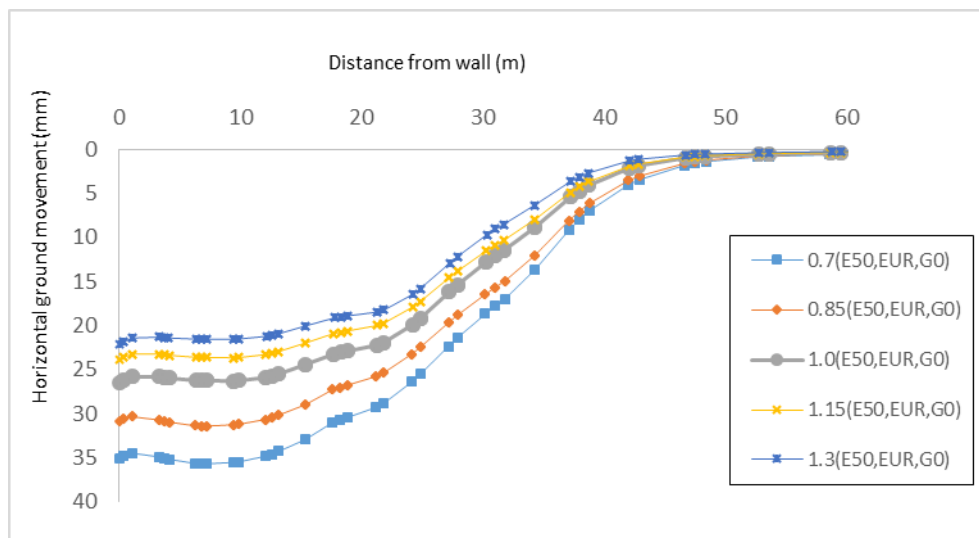
در این بخش تغییر شکل‌های ناشی از گودبرداری به ازای تغییر پارامترهای سختی خاک (شامل E_{50}^{ref} ، E_{ur}^{ref} و G_0^{ref}) در مدل رفتاری HSS، در محدوده ۷۰ تا ۱۳۰ درصد مقادیر اولیه، محاسبه شده اند که نتایج آن در شکل‌های ۵-۲۳ تا ۵-۲۴ آورده شده است.



شکل ۵-۲۳- منحنی جابجایی افقی دیواره گود برحسب مقادیر مختلف سختی خاک در محدوده ۸۵ تا ۱۱۵ درصد سختی خاک در محل پروژه

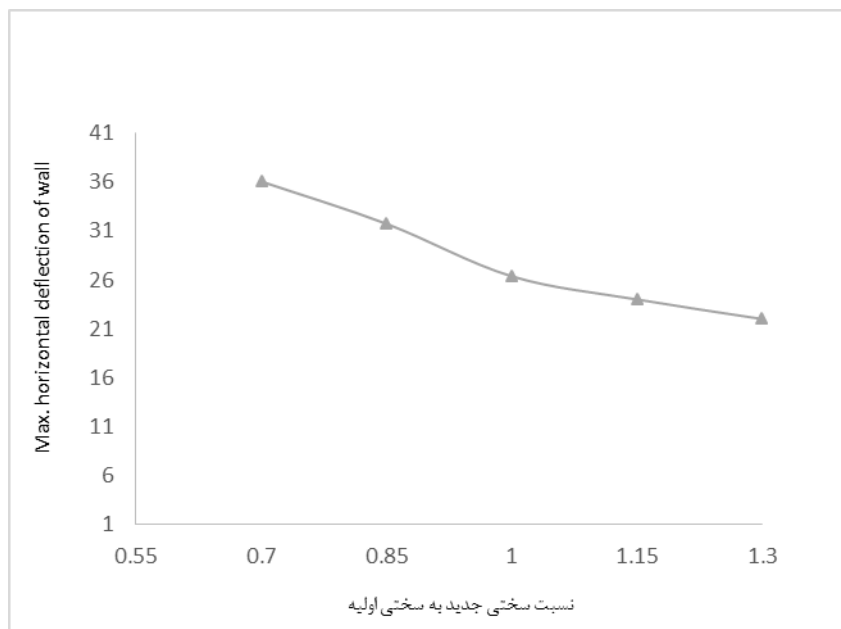


شکل ۵-۲۴- منحنی نشست زمین مجاور گود برحسب مقادیر مختلف سختی خاک در محدوده ۸۵ تا ۱۱۵ درصد سختی خاک محل پروژه

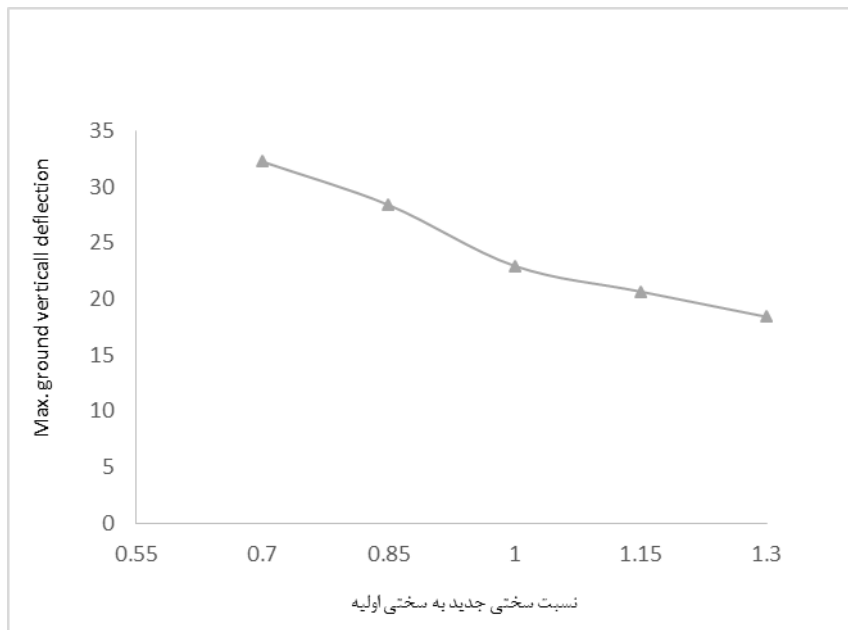


شکل ۵-۲۵- منحنی جابجایی افقی زمین مجاور گود برحسب مقادیر مختلف سختی خاک در محدوده ۸۵ تا ۱۱۵ درصد سختی خاک محل پروژه

منحنی تغییرات حداکثر جابجایی افقی دیواره و حداکثر نشست زمین براساس پارامترهای سختی خاک (شامل E_{50}^{ref} , E_{ur}^{ref} و G_0^{ref}) به ترتیب در شکل‌های ۵-۲۶ و ۵-۲۷ نشان داده شده است.

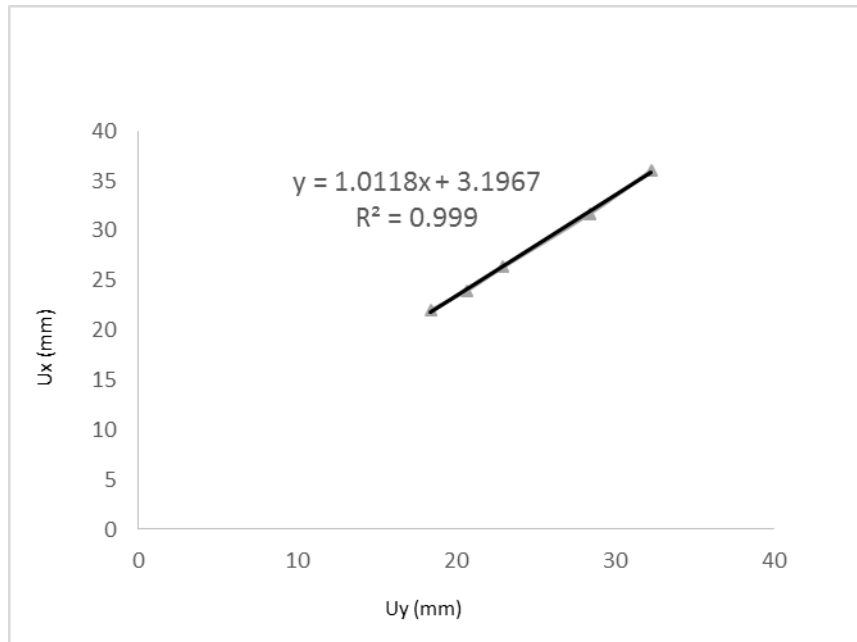


شکل ۵-۲۶- مقادیر حداکثر جابجایی افقی دیواره برحسب مقادیر مختلف سختی در محدوده ۸۵ تا ۱۱۵ درصد سختی خاک محل پروژه



شکل ۵-۲۷- مقادیر حداکثر جابجایی قائم زمین برحسب مقادیر مختلف سختی خاک در محدوده ۸۵ تا ۱۱۵ درصد سختی خاک محل پروژه (حداکثر نشست در بالای دیوار رخ داده است)

مطابق شکل ۵-۲۸ رابطه حداکثر جابجایی افقی دیواره و حداکثر نشست زمین مجاور به صورت خطی می باشد، همان طور که مشاهده می گردد مقدار حداکثر جابجایی افقی تقریباً برابر نشست حداکثر می باشد.



شکل ۵-۲۸- رابطه حداکثر نشست زمین و حداکثر جابجایی افقی دیواره برحسب مقادیر مختلف سختی خاک در محدوده ۸۵ تا ۱۱۵ درصد سختی خاک محل پروژه

۵-۴-۴- خلاصه و جمع بندی نتایج تحلیل حساسیت تغییر شکل های گود به پارامتر

مهندسی خاک

براساس نتایج بخش قبل و جهت مقایسه میزان تاثیرگذاری هر پارامتر بر جابجایی گود، در جداول ۵-۲ تا ۵-۴ میزان تغییرات جابجایی های محاسباتی گود به ازای تغییر در مقادیر پارامترهای مهندسی خاک، بر حسب درصد آورده شده است.

مطابق نتایج بدست آمده، تغییر شکل های گود به مقدار زیادی به زاویه اصطکاک داخلی خاک وابسته می باشد. زاویه اصطکاک خاک بر فشار جانبی دیواره خاک و تنش افقی وارد شده بر نمونه خاک (تنش همه جانبه در فرمول بندی مدل رفتاری HS و HSS) تاثیر گذار می باشد.

جدول ۵-۲- میزان تغییرات جابجایی گود نسبت به تغییرات چسبندگی لایه های خاک (C' چسبندگی اولیه لایه های خاک در مدل مرجع می باشد) - علامت مثبت نشان دهنده افزایش تغییر شکل و علامت منفی نشان دهنده کاهش تغییر شکل ها می باشد.

مقدار چسبندگی لایه های خاک بر حسب سختی اولیه لایه های خاک	درصد افزایش یا کاهش حداکثر جابجایی افقی بدست آمده نسبت به جابجایی مدل مرجع %	درصد افزایش یا کاهش حداکثر نشست بالای دیواره نسبت جابجایی مدل مرجع %
0.70 C'	+۲۱/۳	+۱۸/۵
0.85 C'	+۱۱	+۹/۲
1.0 C'	۰	۰
1.15 C'	-۷/۹	-۵/۹
1.30 C'	-۱۵/۳	-۱۱/۴

جدول ۵-۳- میزان تغییرات جابجایی گود نسبت به تغییرات زاویه اصطکاک لایه های خاک (ϕ' زاویه اصطکاک اولیه لایه های خاک می باشد) - علامت مثبت نشان دهنده افزایش تغییر شکل و علامت منفی نشان دهنده کاهش تغییر شکل ها می باشد.

مقدار زاویه اصطکاک لایه های خاک بر حسب زاویه اصطکاک اولیه لایه های خاک	درصد افزایش یا کاهش حداکثر جابجایی افقی بدست آمده نسبت به جابجایی مدل مرجع %	درصد افزایش یا کاهش حداکثر نشست بالای دیواره نسبت جابجایی مدل مرجع %
0.85 ϕ'	+۸۰/۹	+۷۸/۵
1.0 ϕ'	۰	۰
1.15 ϕ'	-۴۱/۹	-۳۷/۴

جدول ۴-۵ - میزان تغییرات جابجایی گود نسبت به تغییرات سختی لایه های خاک- علامت مثبت نشان دهنده افزایش تغییر شکل و علامت منفی نشان دهنده کاهش تغییر شکل ها می باشد.

نسبت سختی لایه های خاک به سختی اولیه لایه های خاک	درصد افزایش یا کاهش حداکثر جابجایی افقی بدست آمده نسبت به جابجایی مدل مرجع %	درصد افزایش یا کاهش حداکثر نشست بالای دیواره نسبت جابجایی مدل مرجع %
۰/۷۰	+۳۶/۷	+۴۰/۶
۰/۸۵	+۲۰/۳	+۲۳/۷
۱	۰	۰
۱/۱۵	-۹	-۱۰
۱/۳۰	-۱۶/۵	-۱۹/۸

سایر یافته های حاصل از مطالعه پارامتریک به صورت ذیل می باشد:

۱- در سیستم سازه نگهبان مطالعه شده در این پایان نامه (شمع شناور و انکرینگ)، رابطه بین میزان حداکثر جابجایی افقی دیواره و حداکثر نشست سطح زمین به صورت خطی خواهد بود. همچنین مقدار حداکثر جابجایی افقی دیواره برابر یا بیش از حداکثر نشست در سطح زمین می باشد.

۲- وجود ساختمان یا هر نوع سربار دیگری تا فاصله حدود ۱/۷ برابر عمق گود از لبه گود سبب بروز نشست اضافی می گردد. وجود ساختمان تاثیری در مقدار جابجایی افقی زمین نخواهد داشت.

۳- جابجایی افقی و قائم در فاصله بیش از ۴۳~۴۰ متر (معادل ۱/۷ عمق گود) بسیار ناچیز و قابل صرفه نظر می باشد.

۵-۵- بررسی مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش بارگذاری صفحه و مقایسه آن

با نتایج سایر آزمایش ها

در پروژه مورد مطالعه پس از انجام گودبرداری، آزمایش بارگذاری صفحه در محدوده عمق ۲/۵ تا ۵ متری زیر پی (عمق ۲۷/۵ تا ۳۰ متری از سطح زمین) انجام شده است، در این بخش ابتدا به بررسی نتایج آزمایش بارگذاری صفحه پرداخته شده و سپس مقادیر مدول الاستیسیته حاصل از این آزمایش با نتایج سایر آزمایش ها (پرسیومتری، سه محوری و SPT) مقایسه شده است.

نحوه انجام آزمایش: تعداد سه آزمایش با ایجاد ترانشه توسط بیل مکانیکی در عمق های ۲/۵، ۴ و ۴/۷ متری نسبت به کف گود انجام شد (شکل ۵-۲۹). صفحه صلب فولادی دارای قطر ۳۰ سانتی متر بوده که میزان نشست متوسط آن توسط ۳ گیج عقربه ای با دقت ۰/۰۱ میلیمتر اندازه گیری شده است (شکل ۵-۳۰). همچنین از بیل مکانیکی جهت مهار نیروی عکس العمل جک استفاده گردید. نوع خاک در محدوده هر سه آزمایش به صورت ماسه رس دار (SC-SM) می باشد.



شکل ۵-۲۹- حفاری زمین جهت انجام آزمایش بارگذاری صفحه

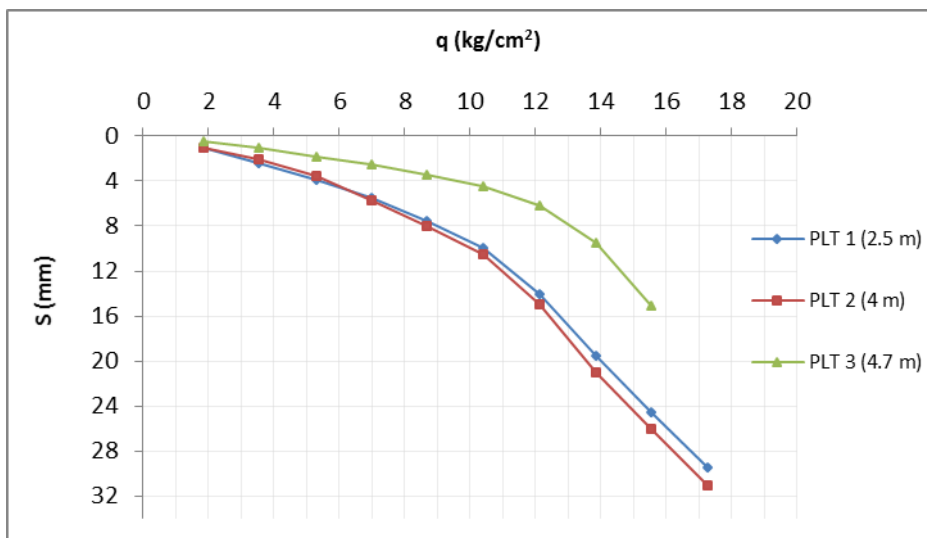


شکل ۵-۳۰- تجهیزات آزمایش بارگذاری صفحه

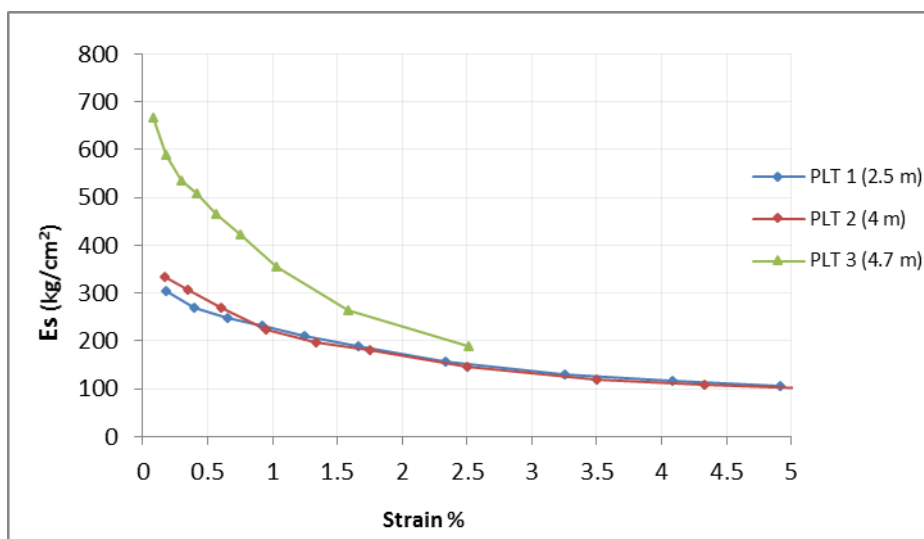
۵-۵-۱- بررسی نتایج آزمایش بارگذاری صفحه

نمودار بار-نشست در شکل ۵-۳۱ آورده شده است. با توجه به رفتار غیر خطی خاک، در انتخاب مدول الاستیسیته بایستی به سطح کرنش آزمایش و سطح کرنش سازه ژئوتکنیکی توجه نمود. در شکل ۵-۳۲ تغییرات مدول الاستیسیته براساس میزان کرنش محوری قائم اعمال شده به نمونه نشان داده شده است (عمق موثر نشست صفحه فولادی به صورت دو برابر قطر صفحه در نظر گرفته شده است). همان طور که مشاهده می گردد میزان تغییرات مدول الاستیسیته نسبت به کرنش زیاد می باشد، که نشان دهنده اهمیت در نظر گیری سطح کرنش در انتخاب مدول الاستیسیته می باشد.

عامل همه دیگری که بایستی مورد توجه قرار گیرد اثرات فشار همه جانبه بر مدول الاستیسیته خاک می باشد. در صورتی که آزمایش بر روی سطح زمین، کف گود، یا ترانشه انجام شود فشار همه جانبه در حین آزمایش وجود ندارد، بنابراین در حالت کلی نمی توان نتایج حاصل از آزمایش بارگذاری صفحه را به عمقهای بیشتر (که تحت فشار همه جانبه قرار دارند) تعمیم داد.



شکل ۵-۳۱- منحنی بار- نشست حاصل از آزمایش بارگذاری صفحه



شکل ۵-۳۲- منحنی کرنش- مدول الاستیسیته (در شاخه بارگذاری) حاصل از آزمایش بارگذاری

صفحه

۵-۵-۲- مقایسه مقادیر مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش های مختلف

در این بخش مقادیر مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش بارگذاری صفحه با نتایج سایر آزمایش ها

(پرسیومتری، سه محوری و SPT) جهت مقایسه آورده شده است (جدول ۵-۵).

جدول ۵-۵ - مقایسه مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش های بارگذاری صفحه، پرسیومتری، سه محوری و

SPT در محدوده ۲/۵ تا ۵ متری نسبت به کف گود

متوسط مدول الاستیسیته بارگذاری				نوع خاک	عمق نسبت به کف گود (متر)
آزمایش پرسیومتری	به کمک spt	آزمایش سه محوری	آزمایش بارگذاری صفحه		
۵۵۰~۷۵۰	≈۳۰۰	≈۲۴۰	۳۳۰~۴۲۰ (در محدوده کرنش کمتر از ۰/۵ درصد)	SC-SM	۲/۵~۵

همان طور که در جدول فوق مشاهده می گردد مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش های بارگذاری صفحه، سه محوری و SPT تقریباً در یک محدوده می باشند، در حالیکه مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش پرسیومتری دارای مقادیر به مراتب بیشتری (حدود ۲ برابر) می باشد.

۵-۵-۳- جمع بندی نتایج بررسی آزمایش بارگذاری صفحه در تعیین مدول الاستیسیته

خاک

خلاصه نتایج بررسی آزمایش بارگذاری صفحه در تعیین مدول الاستیسیته خاک به صورت ذیل می باشد:

- در تعیین مدول الاستیسیته خاک به یکسان بودن سطح کرنش اعمال شده به نمونه در حین آزمایش و سطح کرنش سازه ژئوتکنیکی دقت گردد.
- در پروژه مورد مطالعه مقادیر مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش بارگذاری صفحه تقریباً در محدوده آزمایش های SPT و سه محوری می باشد، لیکن مقادیر مدول الاستیسیته بدست

آمده از آزمایش پرسیومتری نسبت به سایر آزمایش ها (بارگذاری صفحه، سه محوری و SPT) به مراتب بیشتر (حدود دو برابر) می باشد.

- نتایج آزمایش بارگذاری صفحه در نزدیکی سطح زمین معتبر بوده، تعمیم نتایج آزمایش به عمق بیشتر به دلیل عدم در نظرگیری فشار همه جانبه موجود در اعماق بیشتر توصیه نمی گردد.

- با توجه به ساز و کار آزمایش پرسیومتری، مدول الاستیسیته حاصل از این آزمایش در جهت افقی می باشد، در حالیکه سایر آزمایش های بررسی شده در این پایان نامه (شامل بارگذاری صفحه، سه محوری و SPT) مدول الاستیسیته در جهت قائم را ارائه می نمایند.

فصل ششم:

جمع بندی و پیشنهادها

۶-۱- مقدمه

در فصول قبل، با توجه به وجود آزمایش های مختلف جهت تعیین سختی خاک و اختلاف در نتایج آنها، به مسئله انتخاب نوع آزمایش مناسب جهت مدلسازی گود پرداخته شد. بدین منظور مدل های متعددی با E_s حاصل از آزمایش های پرسیومتری، spt و سه محوری ساخته شد. به منظور بررسی مدل های رفتاری خاک، مدل های المان محدود ساخته شده در سه حالت مدل رفتاری مور-کولمب، سخت شونده (HS) و "سخت شونده با در نظرگیری افزایش سختی در کرنش های کوچک" (HSS) به صورت جداگانه تحلیل شد. سپس نتایج بدست آمده در هر تحلیل با نتایج حاصل از مانیتورینگ رفتار یک گود در شهر مشهد مقایسه گردید.

در بخش دیگری از پایان نامه، مطالعه پارامتریک جهت بررسی میزان حساسیت میزان تغییر شکل ها به پارامترهای مهندسی لایه های خاک بررسی گردید. براساس نتایج حاصل شده، در برآورد مقدار تغییر شکل های گودبرداری، علاوه بر پارامتر مدول الاستیسیته، بایستی به پارامترهای برشی خاک (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) توجه نمود.

۶-۲- جمع بندی نتایج

خلاصه ای از مهمترین نتایج بدست آمده از مدلسازی عددی تغییر شکل های گودبرداری و به کمک مطالعه موردی یک گود به عمق ۲۵ متر، شامل موارد ذیل می باشد:

۱- مدل رفتاری مور-کولمب دارای نواقصی در تحلیل گودبرداری می باشد که در این خصوص می توان به عدم استفاده از مدول باربرداری، عدم در نظرگیری افزایش سختی خاک با افزایش عمق و عدم در نظرگیری اثر سطح کرنش در مدول الاستیسیته اشاره نمود. با توجه به موارد ذکر شده، در این مدل رفتاری مقدار نشست زمین مجاور گود دست پایین محاسبه شده در حالیکه مقدار

جابجایی دیواره دست بالا محاسبه می شود. لذا استفاده از مدل رفتاری مور-کولمب در گوده‌های عمیق توصیه نمی گردد.

۲- گاهی در مراحل ابتدایی گودبرداری، جهت تدقیق مدول الاستیسیته خاک و پیش بینی میزان تغییر شکل ها در ادامه خاکبرداری، آنالیز برگشتی انجام می شود. بایستی به این نکته توجه نمود که استفاده از مدول الاستیسیته ای که از نتایج آنالیز برگشتی در مراحل ابتدایی گودبرداری بدست می آید، خلاف جهت اطمینان می باشد. در حقیقت با افزایش عمق گود، میزان کرنش های خاک افزایش یافته و مدول الاستیسیته کاهش می یابد. برای حل این مشکل پیشنهاد می گردد مدول الاستیسیته رفرنس در مدل رفتاری پیشرفته HSS را محاسبه نمود (به دلیل در نظرگیری اثرات کرنش).

۳- مدل رفتاری پیشرفته HSS که بهبود یافته مدل رفتاری HS می باشد، دقیق ترین مدل رفتاری جهت تحلیل تغییر شکل های گودبرداری می باشد. در این مدل رفتاری اشکالات موجود در مدل رفتاری مور-کولمب به کلی رفع شده است. تطابق میزان تغییر شکل های واقعی گود مورد مطالعه با نتایج مدل رفتاری HSS تائید کننده دقت این مدل رفتاری می باشد.

۴- در انتخاب مدول الاستیسیته خاک جهت تحلیل گود، بایستی مقدار کرنش اعمال شده در آزمایش ژئوتکنیک جهت استخراج مدول الاستیسیته و سطح کرنش پروژه در یک محدوده باشد.

۵- انتخاب آزمایش ژئوتکنیک جهت استخراج پارامتر مدول الاستیسیته خاک دارای اهمیت ویژه ای می باشد. براساس نتایج حاصل در این پایان نامه، در صورت استفاده از مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش صحرایی پرسیمتری و مدل سازی رفتار لایه های خاک با مدل HSS، تغییر شکل‌های محاسباتی به روش المان محدود تطابق خوبی با رفتاری واقعی گود براساس نتایج مانیتورینگ شده خواهد داشت.

۶- در سیستم سازه نگهبان "شمع شناور و انکرینگ" حداکثر جابجایی افقی دیواره و حداکثر نشست سطح زمین مجاور گود، در بالای دیوار رخ می دهد. در صورت وجود سربار در مجاورت گود (مانند ساختمان همسایه)، نشست اضافی زمین در زیر سربار رخ خواهد داد.

۷- علاوه بر مدول الاستیسیته خاک، زوایه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک نیز سهم به سزایی در میزان تغییر شکل ها گود دارد.

۸- در سیستم سازه نگهبان مطالعه شده در این پایان نامه (شمع شناور و انکرینگ)، رابطه بین میزان حداکثر جابجایی افقی دیواره و حداکثر نشست سطح زمین به صورت خطی خواهد بود. همچنین مقدار حداکثر جابجایی افقی دیواره برابر یا بیش از حداکثر نشست در سطح زمین می باشد.

۹- وجود ساختمان یا هر نوع سربار دیگری تا فاصله حدود ۱/۷ برابر عمق گود از لبه گود سبب بروز نشست اضافی می گردد. در پروژه مورد مطالعه براساس نتایج بدست آمده به نظر می رسد وجود ساختمان ۶ طبقه در فاصله ۱۵ متری از گود، تاثیری در مقدار جابجایی افقی زمین ندارد.

۱۰- در سازه نگهبان "شمع شناور و انکرینگ" پروژه مورد مطالعه، جابجایی افقی و قائم در فاصله بیش از ۴۳~۴۰ متر (معادل ۱/۷ عمق گود) بسیار ناچیز و قابل صرفه نظر می باشد.

۱۱- با توجه به نتایج آنالیز برگشتی، در خاک های رسی و ماسه ای (شامل SM و SC-SM) جهت تبدیل مدول منارد حاصل از آزمایش پرسیمتری به مدول الاستیسیته خاک، از ضریب ۱ استفاده گردد. در حالت کلی می توان گفت تبدیل مدول پرسیمتری به مدول الاستیسیته خاک بایستی براساس مطالعات و اطلاعات جمع آوری شده از خاک هر پروژه انجام گیرد، در صورت عدم شناخت ضریب تبدیل مدول منارد به مدول الاستیسیته خاک در محل پروژه، توصیه می شود از ضریب تبدیل ۱ استفاده گردد.

۳-۶- پیشنهادها

به منظور مطالعه بیشتر جهت برآورد دقیق تغییر شکل های ناشی از گودبرداری پیشنهاد می گردد موارد ذیل مورد ارزیابی و بررسی بیشتر قرار گیرد:

- میزان کرنش اعمال شده به خاک در آزمایش پرسیومتری مورد مطالعه قرار گیرد. در صورتی که بتوان مقدار مدول الاستیسیته خاک را در حین آزمایش به ازای مقادیر مختلف سطح کرنش تعیین نمود، امکان انتخاب دقیقتر و بهینه مدول الاستیسیته خاک میسر می باشد.
- ساز و کار آزمایش پرسیومتری به گونه ای بوده که با قرارگیری در داخل گمانه عمودی، مدول الاستیسیته افقی لایه های خاک را محاسبه می کند، در پروژه های گودبرداری، امکان انجام آزمایش در جهت افقی به منظور برآورد مدول الاستیسیته قائم نیز می تواند مورد بررسی قرار گیرد.
- اثر غیر ایزوتروپیک بودن سختی خاک در جهت های مختلف و امکان اعمال آن در مدل های مختلف رفتاری خاک، مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد.
- ضریب تبدیل مدول منارد در خاک های ماسه ای تمیز و شن به کمک آنالیز برگشتی جایجایی گود مطالعه گردد.

مراجع

مراجع

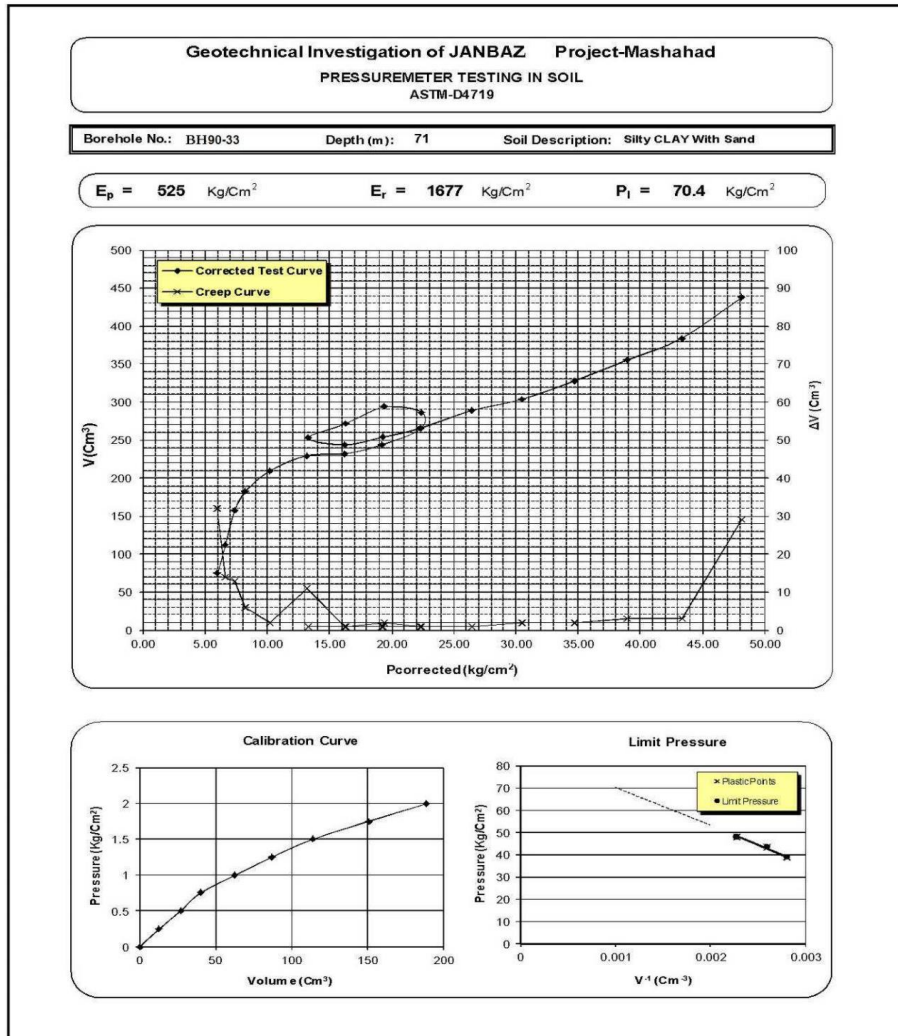
- Bryson L. S. and Zapata-Medina D. G. (2012) "Method for Estimating System Stiffness for Excavation Support Walls", **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Vol. 138, Issue 9 (September 2012), pp 1104.
- Chang-yu ou (2006), "**Deep Excavation**", vol. 1, Taylor & Francis/Balkema, UK, pp.57.
- Clough G. W. and O'Rourke, T. D. (1990), "Construction induced movement of in situ walls" In Proc. Design and performance of earth retaining structure, ASCE special conference, pp 439-470, Ithaca, New York.
- Clough G. W. and Smith E. M. and Sweeney B. P. (1989). "Movement control of excavation support systems by iterative design", pp869–884, Proc., Foundation Engineering Congress on Current Principles and Practices, Vol. 2, ASCE, New York.
- Coduto D. P. (2001), "Foundation Design Principle and practices", Vol. 1, Prentice Hall, USA, pp 233.
- Craig R. F. (2012), "**Craig's Soil Mechanics**", vol. 1, Spoon Press, UK, pp.448.
- Das B. M. (2016), "Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering", Vol. 1, Springer, USA, pp 65.
- Das B. M. (2016), "Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering", Vol. 1, Springer, USA, pp 100.
- Das B. M. (2016), "Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering", Vol. 1, Springer, USA, pp 101.
- FHWA (1999) "GROUNDANCHORS ANDANCHOREDSYSTEMS", The Federal Highway Administration, USA, PP4.
- FHWA (1999) "GROUNDANCHORS ANDANCHOREDSYSTEMS", The Federal Highway Administration, USA, PP12.
- Hashash Y. M. A. and A. J. Whittle (2002) "Mechanisms of load transfer and arching for braced excavations in clay" **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 128(3), pp 187-197.
- Hsieh P. G and Ou C. Y. (1998) "shape of ground surface settlement profiles caused by excavation", **Canadian Geotechnical journal**, Vol. 35, pp 1004-1017.

- Hsiung B. C. B. and Dao S.D. (2014) "Evaluation of Constitutive Soil Models for Predicting Movements Caused by a Deep Excavation in Sands", Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University, Kaohsiung City, Taiwan.
- Itasca Consulting Group Inc. (2000), FLAC User's Manual I, Minneapolis, MN.
- Khoiri M. and Ou C. Y. (2013) "Evaluation of deformation parameter for deep excavation in sand through case histories" **journal of Computers and Geotechnics**, 47, pp 57-63.
- Lambe T. W. (1967) "Stress path method.", **Journal of Soil Mechanics & Foundations Division**, 95(6), pp 309-331.
- Lim A. and Ou C. Y. (2011) "Stress paths in deep excavations under undrained conditions and its influence on deformation analysis" **journal of Tunnelling and Underground Space Technology**, 63, pp 118-132.
- Ng C. (1999) "Stress Paths in Relation to Deep Excavations.", **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 125(5), pp 357-363.
- Ou C. Y. and Hsieh P. G. (2011) "A simplified method for predicting ground settlement profiles induced by excavation in soft clay", **journal of Computers and Geotechnics**, Vol. 38, pp 987-997.
- Peck R.B. (1969) "Deep excavation and tunneling in soft ground. In Proc. Of 7th ICSMFE, state-of-the-Art volume, Mexican City, pp 225-290.
- Vucetic M. and Dobry R. (1991), "Effect of soil plasticity on cyclic response" **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, Vol. 117, No. 1, pp 89-107.
- سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، (۱۳۸۰)، دستور العمل آزمایش پرسیومتری (نشریه شماره ۲۲۳)، چاپ اول، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، تهران، ص ۳۶.
- فاخر ع، (۱۳۹۰) "مهندسی پی پیشرفته"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ص ۷۸.
- فرهادی م، (۱۳۸۹)، پایان نامه ارشد: "بررسی مسئله کارست در تونلهای پروژه در حال ساخت راه آهن شیراز- بوشهر- عسلویه"، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت.

پیوست ها:

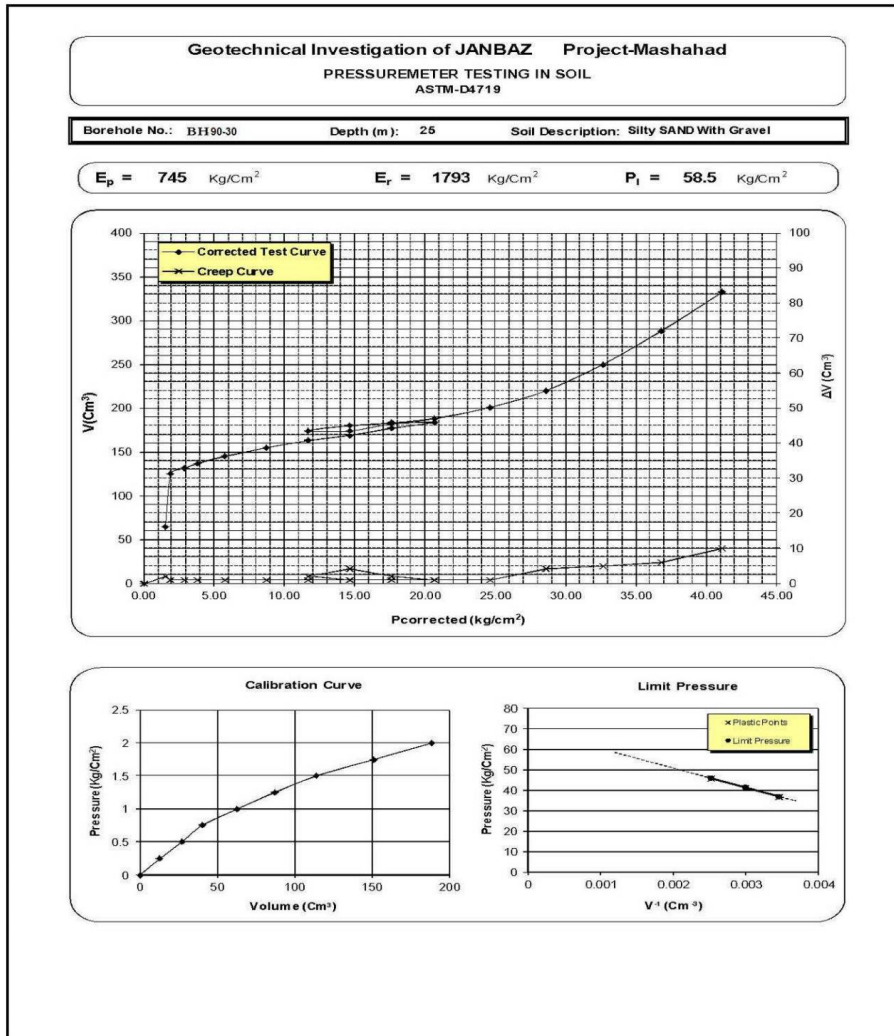
پیوست الف) نتایج آزمایش های پرسیمتری:

گزارش ژئوتکنیک مجتمع جهان مال مشهد



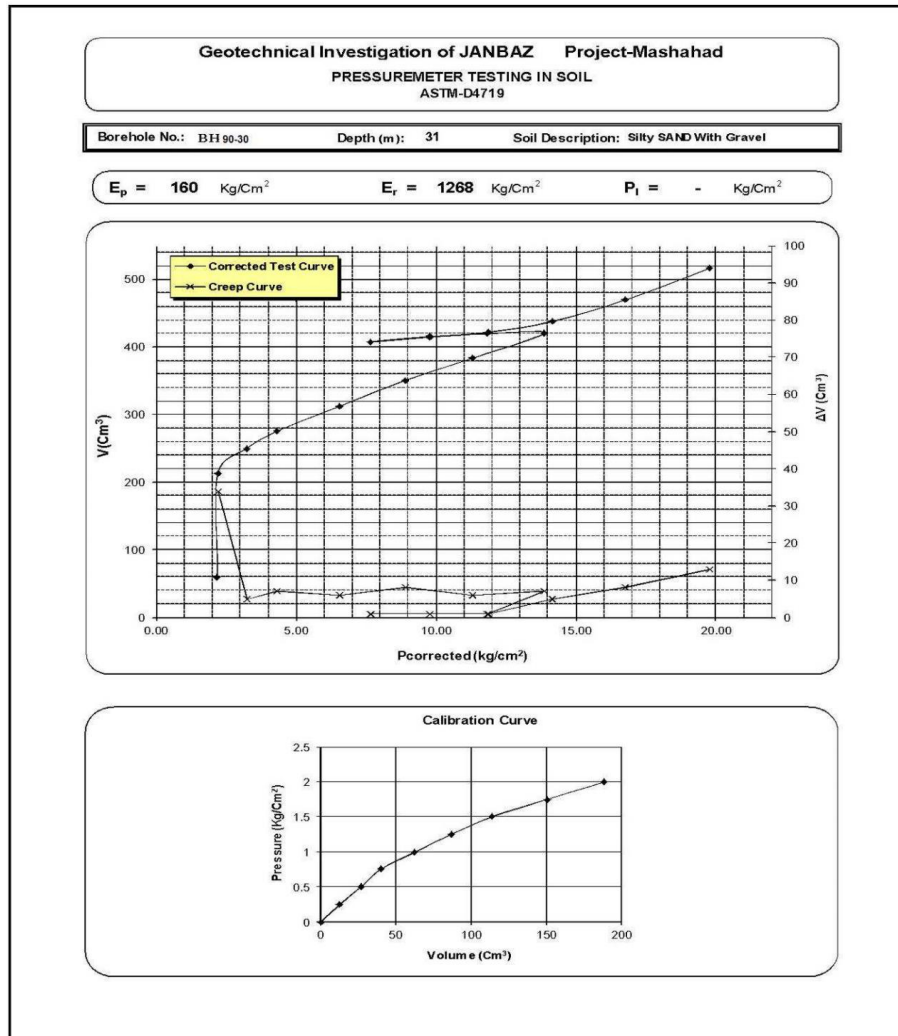
ادامه پیوست الف) نتایج آزمایش های پرسیمتری

گزارش ژئوتکنیک مجتمع جهان مال مشهد



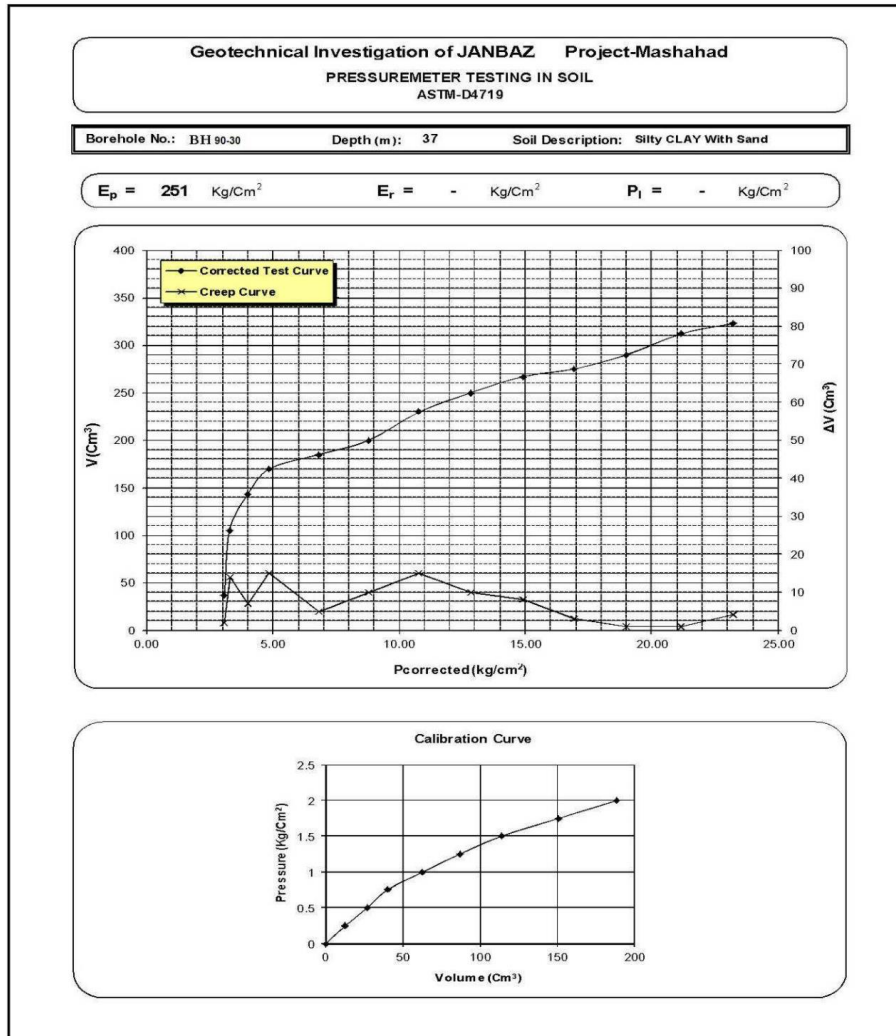
ادامه پیوست الف) نتایج آزمایش های پرسیمتری

گزارش ژئوتکنیک مجتمع جهان مال مشهد



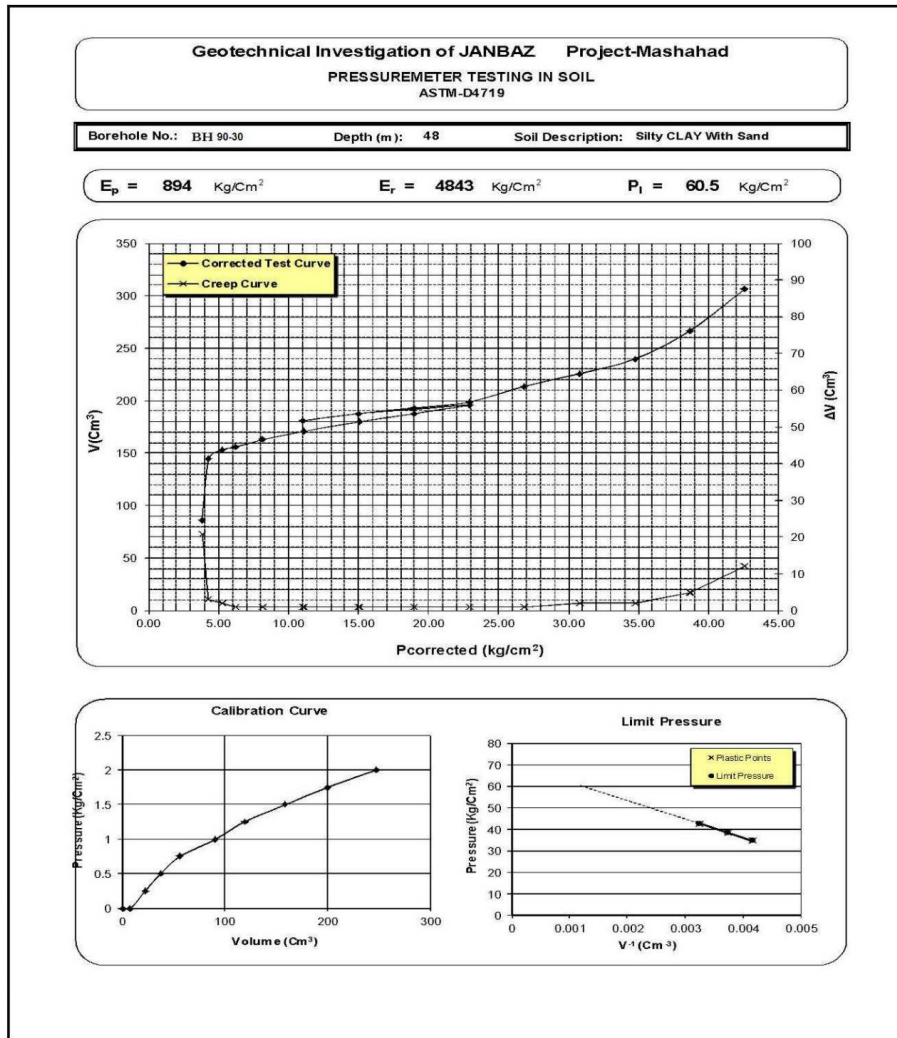
ادامه پیوست الف) نتایج آزمایش های پرسیومتری

گزارش ژئوتکنیک مجتمع جهان مال مشهد



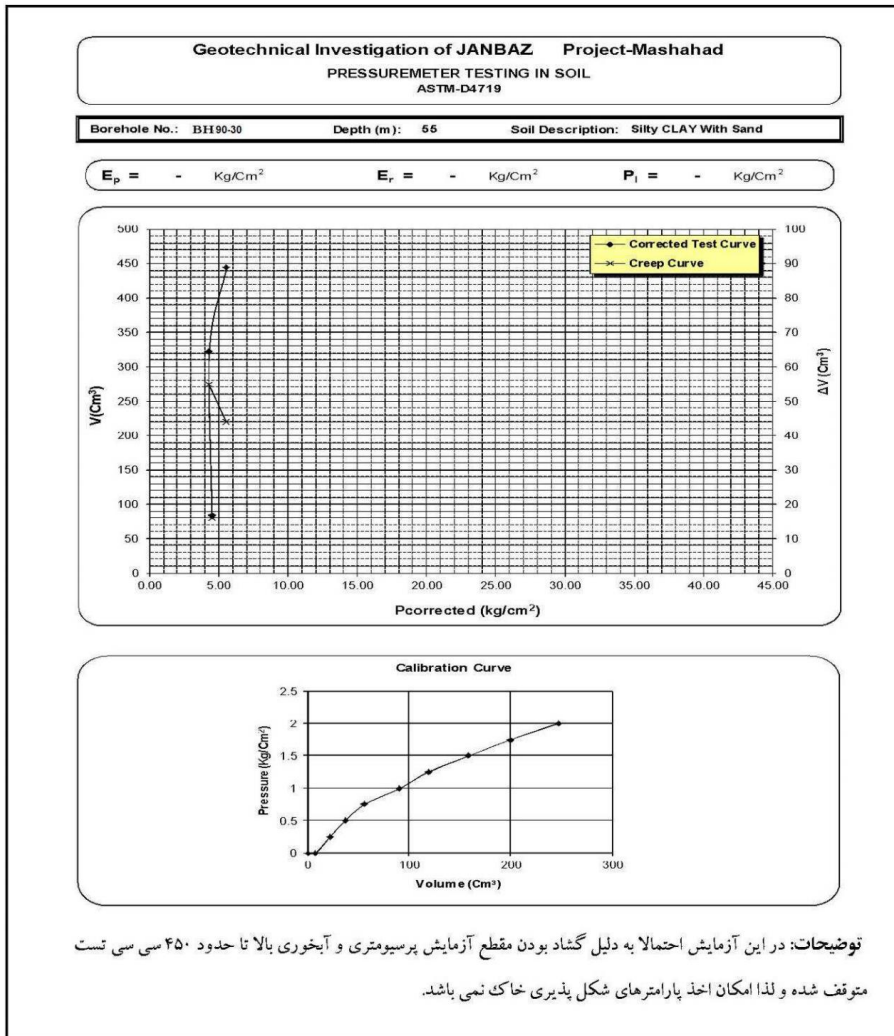
ادامه پیوست الف) نتایج آزمایش های پرسیمتری

گزارش ژئوتکنیک مجتمع جهان مال مشهد



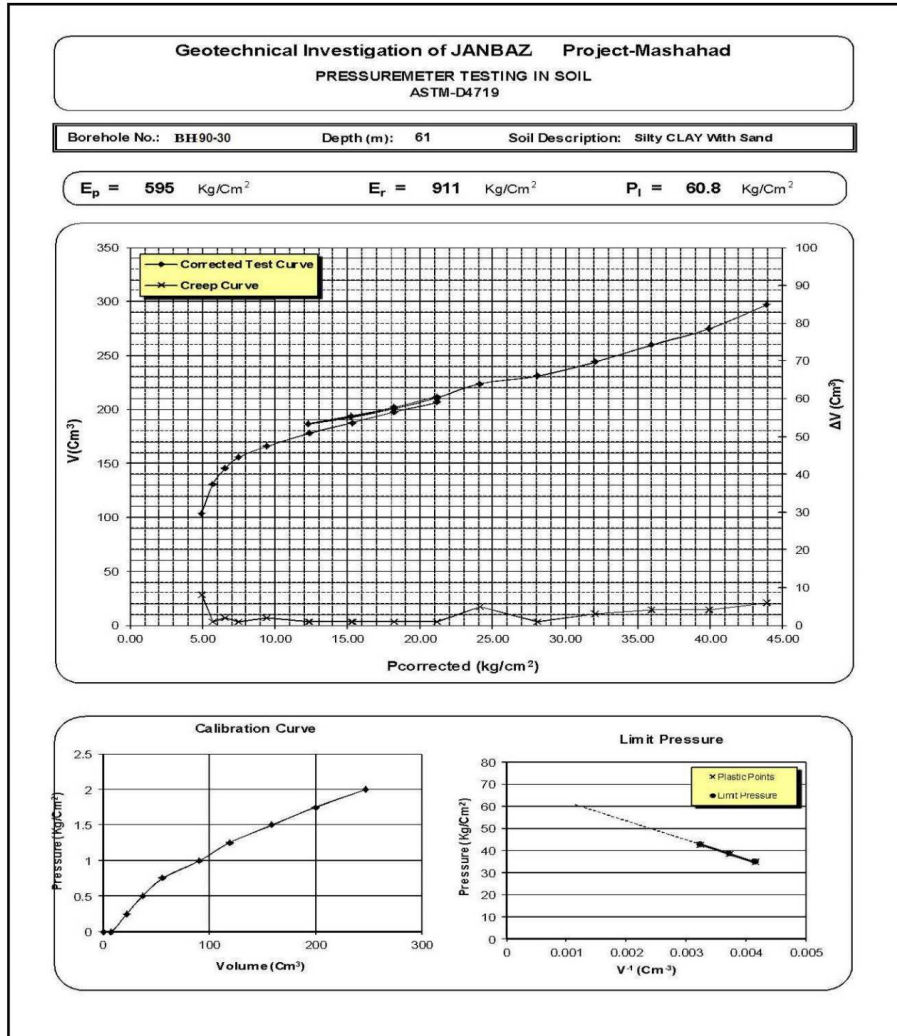
ادامه پیوست الف) نتایج آزمایش های پرسیومتری

گزارش ژئوتکنیک مجتمع جهان مال مشهد



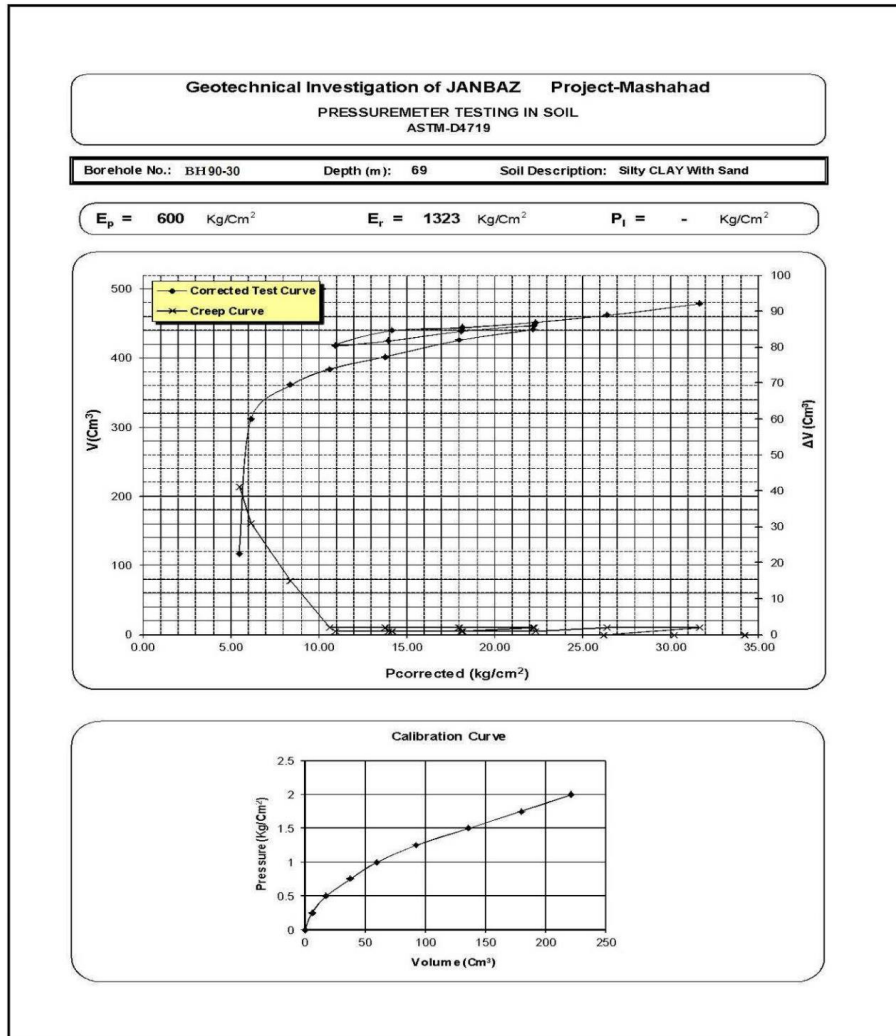
ادامه پیوست الف) نتایج آزمایش های پرسیمتری

گزارش ژئوتکنیک مجتمع جهان مال مشهد



ادامه پیوست الف) نتایج آزمایش های پرسیمتری

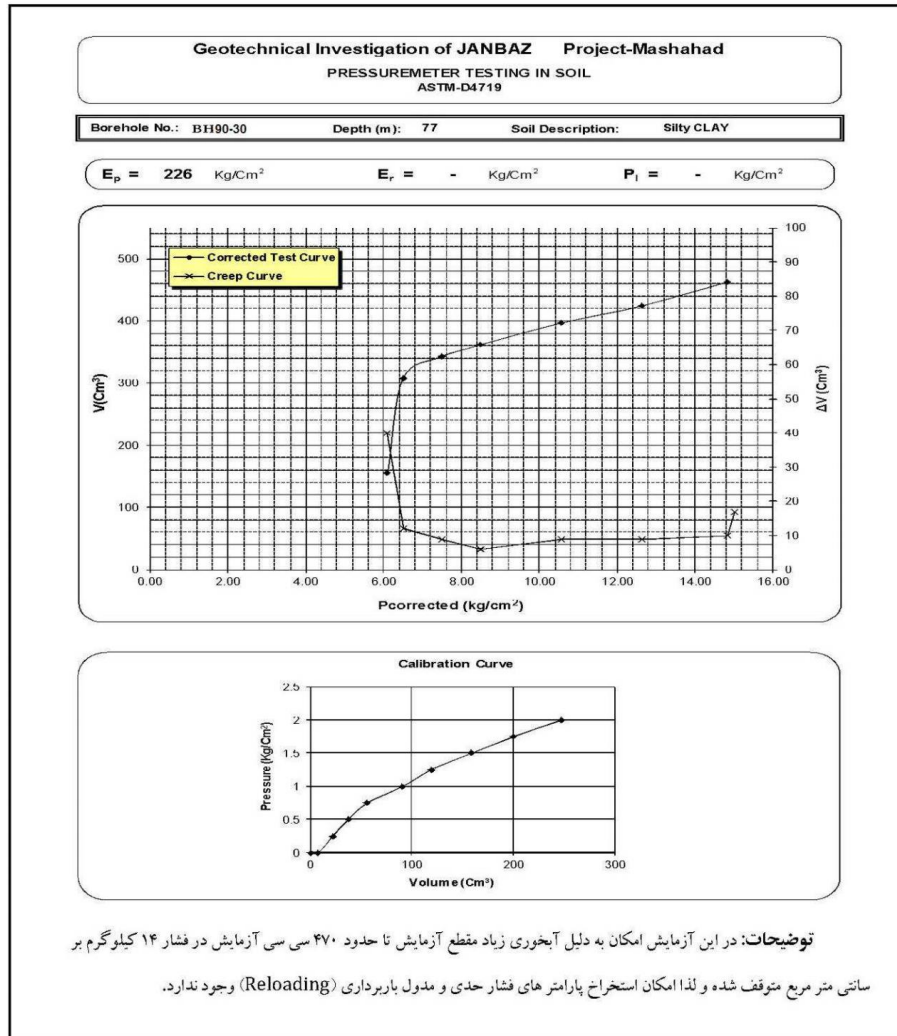
گزارش ژئوتکنیک مجتمع جهان مال مشهد



۴۳۵

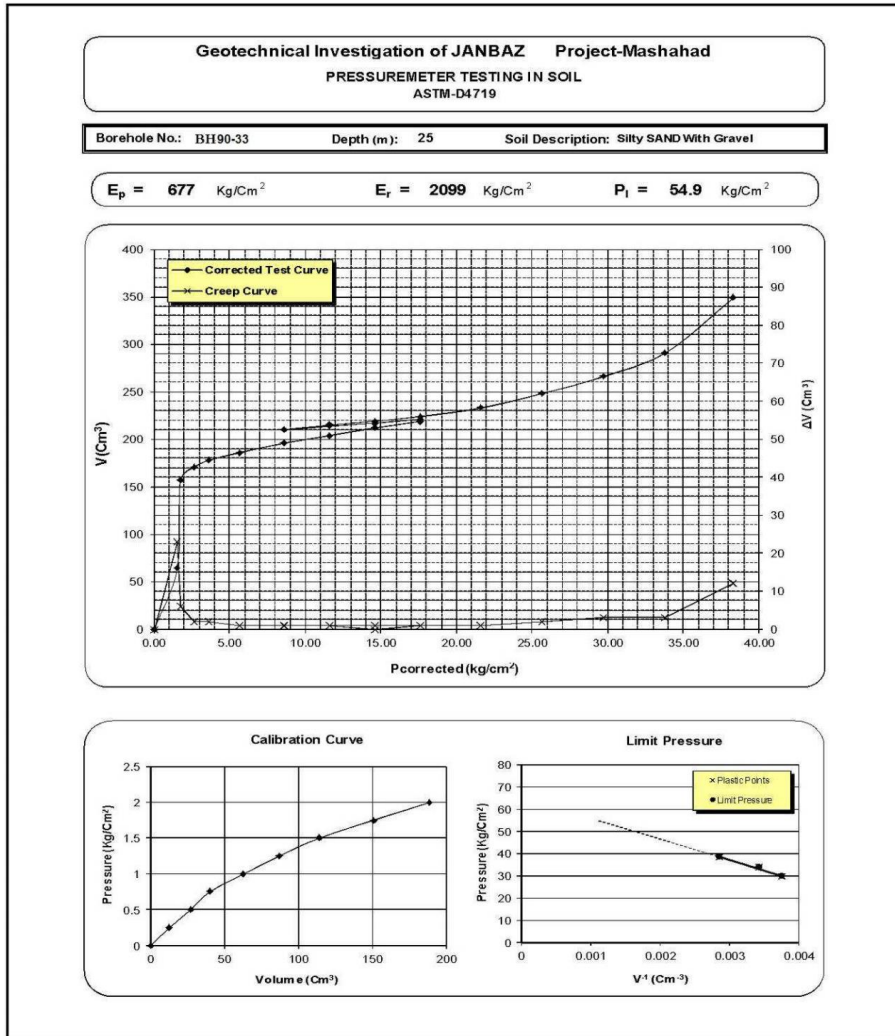
ادامه پیوست الف) نتایج آزمایش های پرسیومتری

گزارش ژئوتکنیک مجتمع جهان مال مشهد



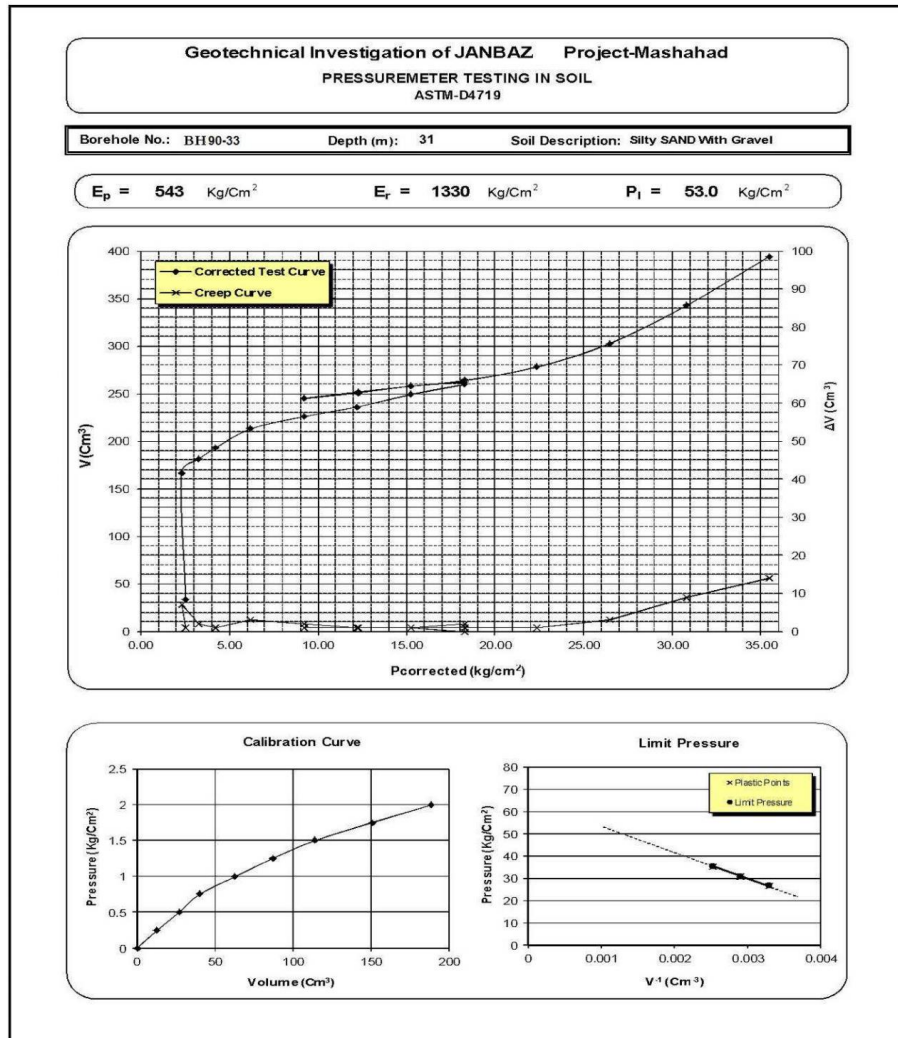
ادامه پیوست الف) نتایج آزمایش های پرسیمتری

گزارش ژئوتکنیک مجتمع جهان مال مشهد



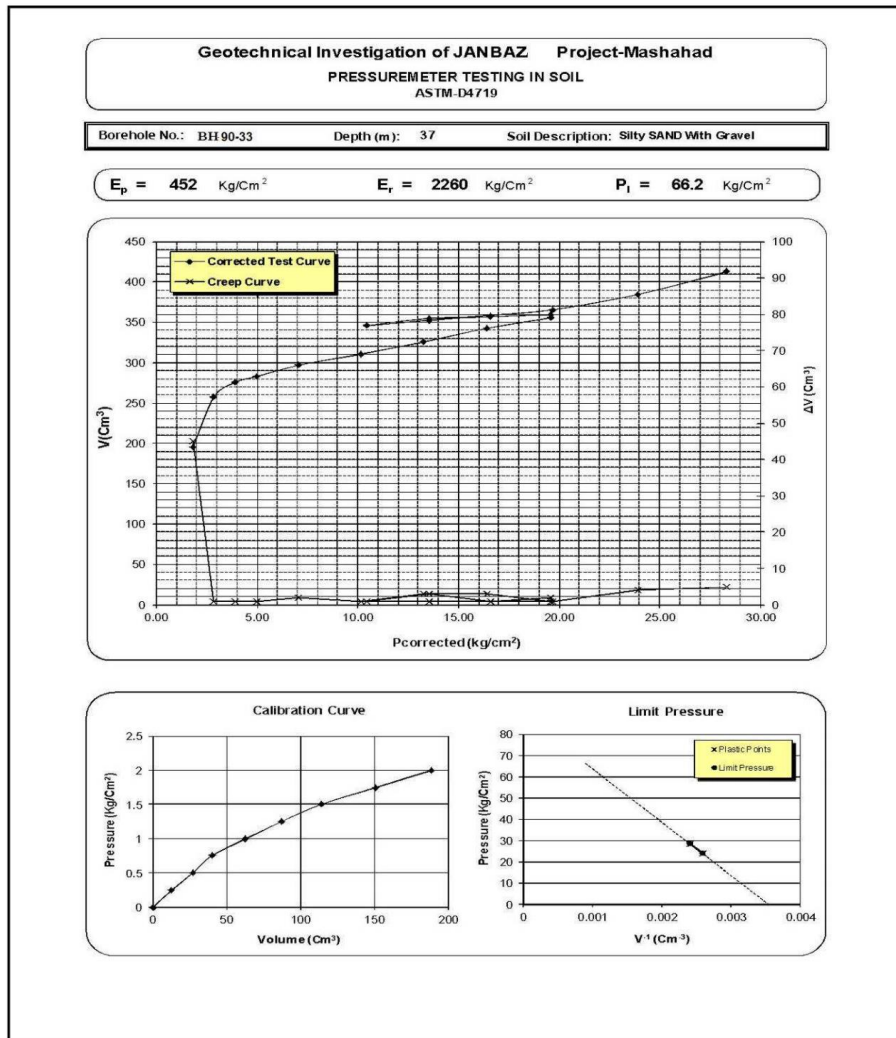
ادامه پیوست الف) نتایج آزمایش های پرسیمتری

گزارش ژئوتکنیک مجتمع جهان مال مشهد



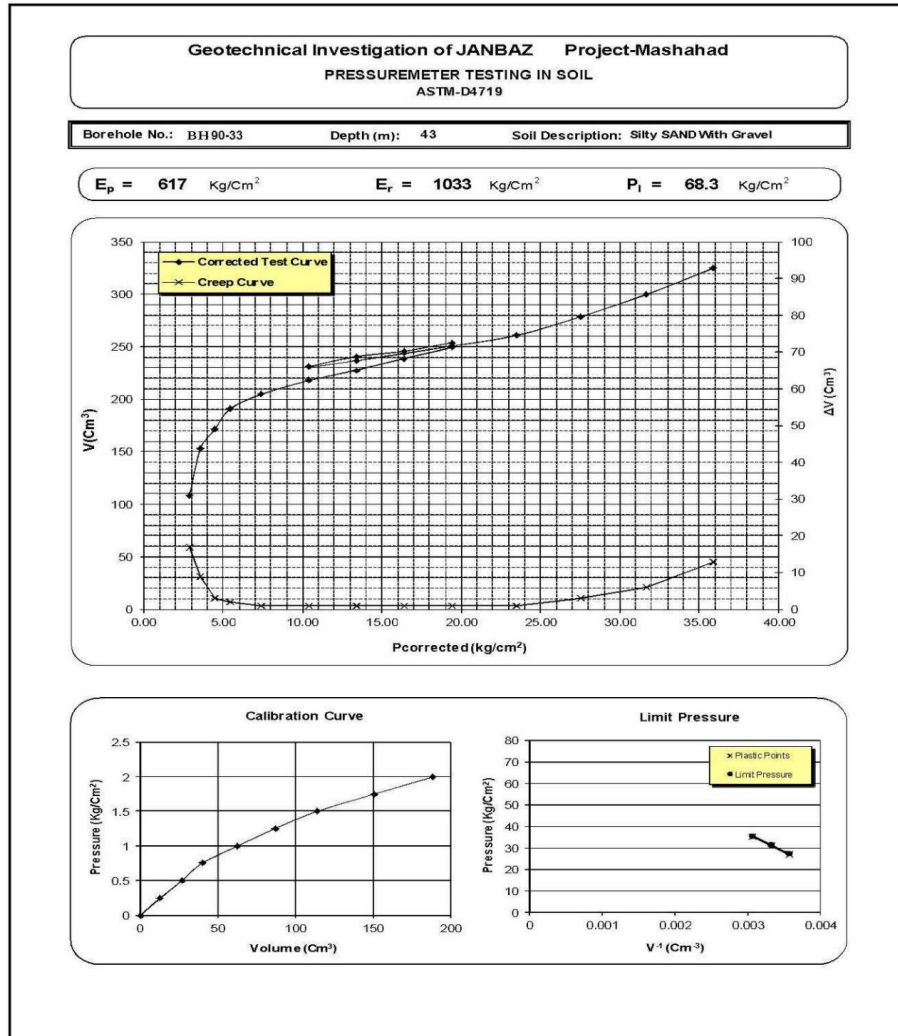
ادامه پیوست الف) نتایج آزمایش های پرسیمتری

گزارش ژئوتکنیک مجتمع جهان مال مشهد



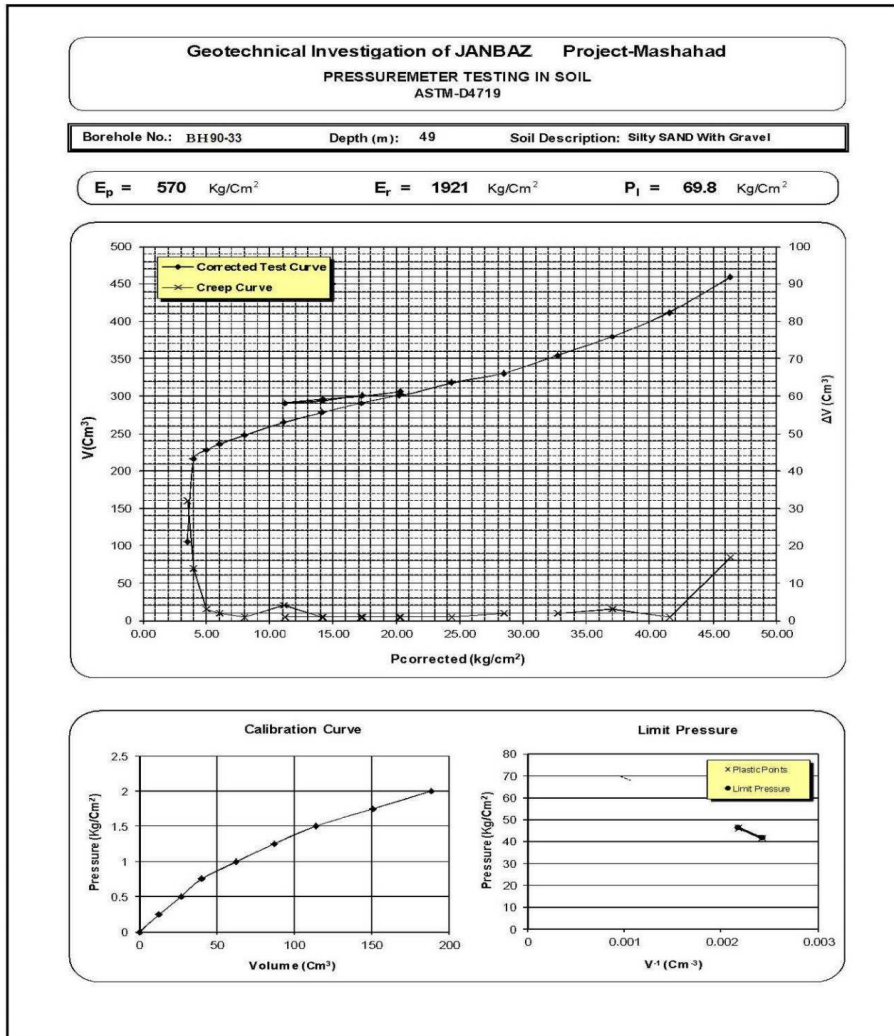
ادامه پیوست الف) نتایج آزمایش های پرسیومتری

گزارش ژئوتکنیک مجتمع جهان مال مشهد



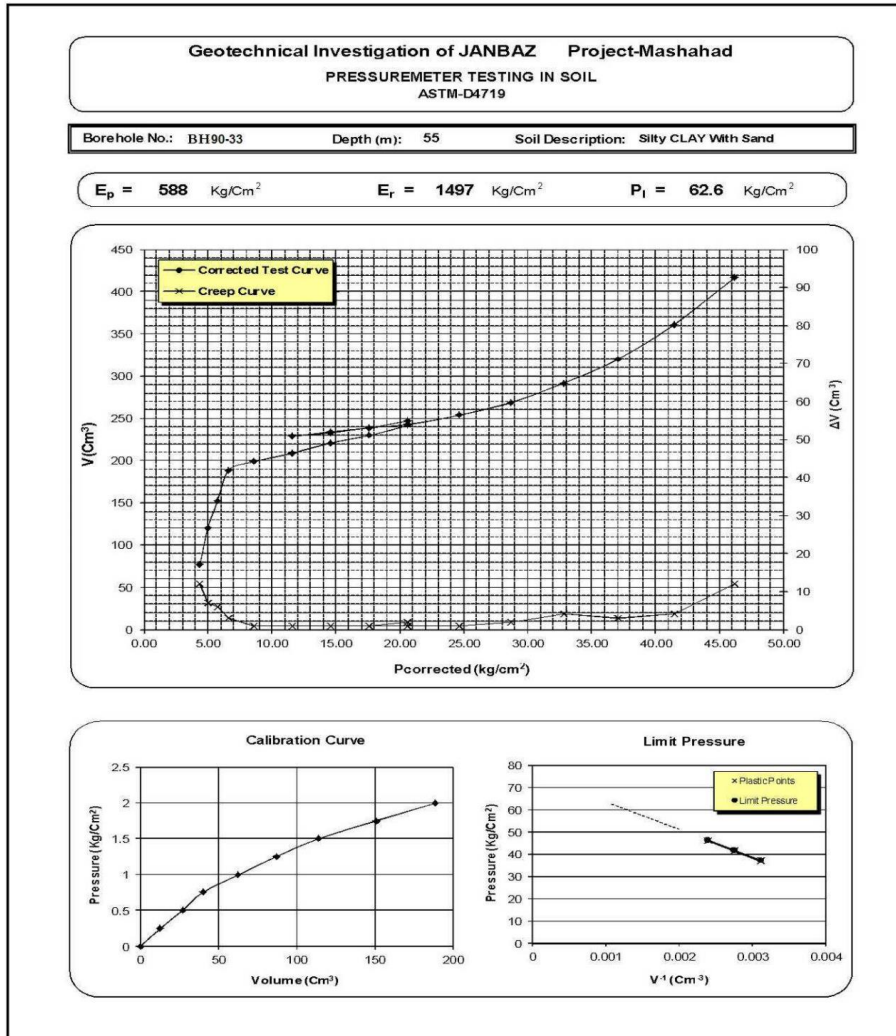
ادامه پیوست الف) نتایج آزمایش های پرسیمتری

گزارش ژئوتکنیک مجتمع جهان مال مشهد



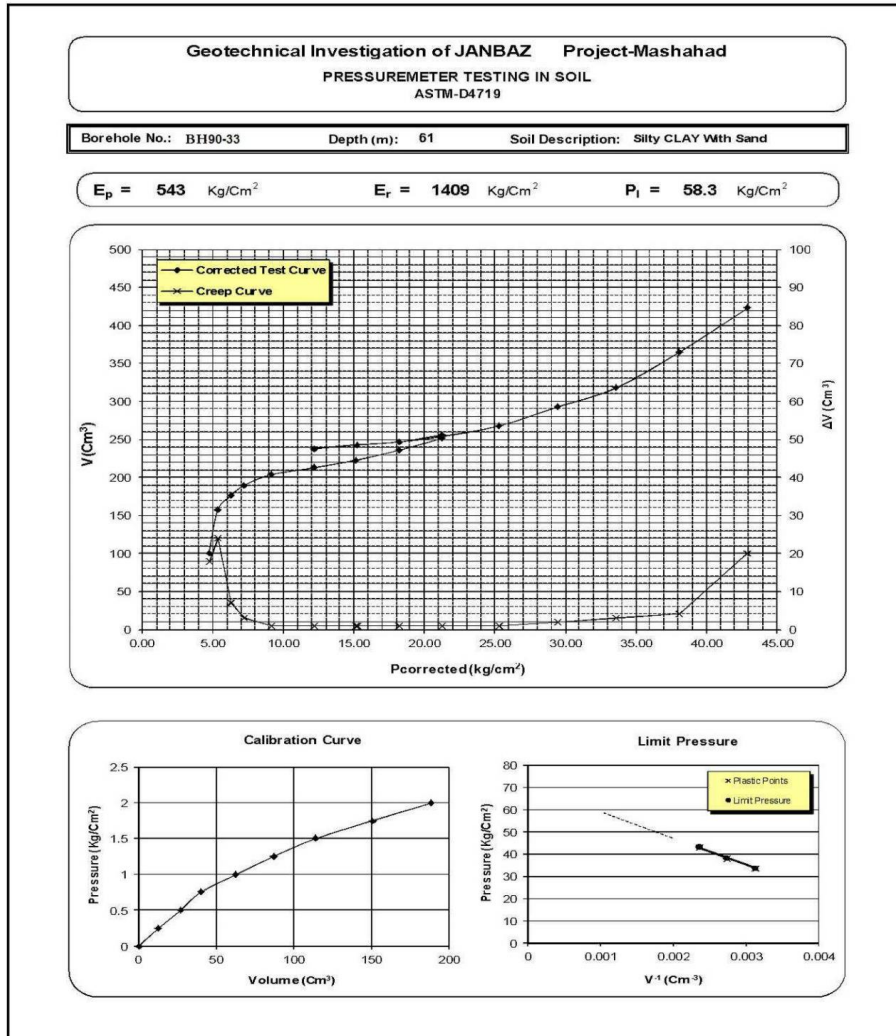
ادامه پیوست الف) نتایج آزمایش های پرسیمتری

گزارش ژئوتکنیک مجتمع جهان مال مشهد



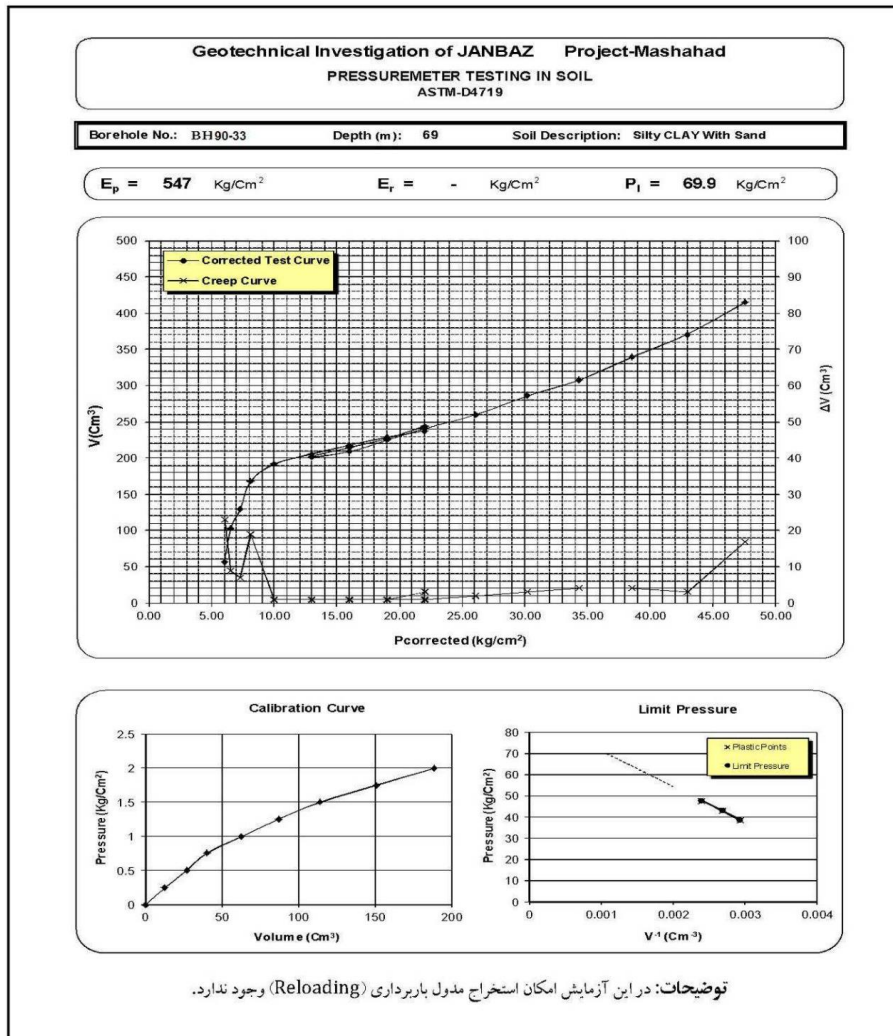
ادامه پیوست الف) نتایج آزمایش های پرسیمتری

گزارش ژئوتکنیک مجتمع جهان مال مشهد



ادامه پیوست الف) نتایج آزمایش های پرسیمتری

گزارش ژئوتکنیک مجتمع جهان مال مشهد



پیوست ب) نتایج آزمایش های بارگذاری صفحه



نتایج آزمایش در عمق ۲.۵ متری:

شیت آزمایش بارگذاری صفحه									
مهندسین مشاور طرح و آزمون پارس									
عنوان پروژه:		جهان مال		شماره پروژه:		1396/03/29			
شماره تست:		2		عمق تست از تراز مبنا (m):		2.5		موقعیت تست:	
قطر صفحه (سانتی متر):		30cm		تنظیم اولیه گج (میلیمتر):		10		کارشناس:	
شماره مرحله:		ساعت شروع:		نیرو (بار)		ضرب (کلوگرم بر سانتیمتر مربع)		زمان (دقیقه):	
3		30		5.3		15		1	
2		20		3.55		15		5	
1		10		1.83		15		5	
شماره مرحله:		ساعت شروع:		نیرو (بار)		ضرب (کلوگرم بر سانتیمتر مربع)		زمان (دقیقه):	
3		30		5.3		15		1	
2		20		3.55		15		5	
1		10		1.83		15		5	
متوسط جانمایی در مرکز (mm)									
شماره مرحله:		ساعت شروع:		نیرو (بار)		ضرب (کلوگرم بر سانتیمتر مربع)		زمان (دقیقه):	
4		40		6.97		15		1	
3		30		5.3		15		5	
2		20		3.55		15		5	
1		10		1.83		15		5	
متوسط جانمایی در مرکز (mm)									
شماره مرحله:		ساعت شروع:		نیرو (بار)		ضرب (کلوگرم بر سانتیمتر مربع)		زمان (دقیقه):	
5		50		8.68		30		1	
4		40		6.97		15		5	
3		30		5.3		15		5	
2		20		3.55		15		5	
1		10		1.83		15		5	
متوسط جانمایی در مرکز (mm)									
شماره مرحله:		ساعت شروع:		نیرو (بار)		ضرب (کلوگرم بر سانتیمتر مربع)		زمان (دقیقه):	
6		60		10.41		30		1	
5		50		8.68		30		5	
4		40		6.97		15		5	
3		30		5.3		15		5	
2		20		3.55		15		5	
1		10		1.83		15		5	
متوسط جانمایی در مرکز (mm)									
شماره مرحله:		ساعت شروع:		نیرو (بار)		ضرب (کلوگرم بر سانتیمتر مربع)		زمان (دقیقه):	
7		70		12.11		30		1	
6		60		10.41		30		5	
5		50		8.68		30		5	
4		40		6.97		15		5	
3		30		5.3		15		5	
2		20		3.55		15		5	
1		10		1.83		15		5	
متوسط جانمایی در مرکز (mm)									

مهندسین مشاور پی آزمون شرق

ادامه پیوست ب) نتایج آزمایش های بارگذاری صفحه



QAI
Certification
ISO 9001:2008
Reg. No. 0077024



آزمون

کارفرما: شرکت خورشید درخشان هشتم توس
 پروژه: مطالعات تکمیلی جهان مال

شیت آزمایش بارگذاری صفحه									
مهندسین مشاور طرح و آزمون پارس									
عنوان پروژه:		جهان مال		شماره پروژه:		شماره 1396/03/29		تاریخ آزمایش:	
شماره تست:		2		عمق تست از تراز مبنا (m):		2.5		موقعیت تست:	
قطر صفحه (سانتی متر):		30cm		تنظیم اولیه گچ (میلی متر):		10		کارشناس:	
شماره مرحله		ساعت شروع		نیرو (بار)		فشار (کلوگرم بر سانتی متر مربع)		زمان (دقیقه):	
گچ 3 (میلیمتر)		گچ 2 (میلیمتر)		گچ 1 (میلیمتر)		گچ 3 (میلیمتر)		گچ 2 (میلیمتر)	
8	80	13.83	1	3.78	1.78	1.88	3	1.88	1.78
			5	3.61	1.56	0.98	2	1.65	1.56
			15	1.98	0.48	0	3	0.46	0.48
			30	0.98	0	0	3	0	0
			توسط جابجایی در مرکز (mm)		19.67				
9	90	15.55	1	8.42	7.78	7.68	3	7.68	7.78
			5	7.38	6.98	6.84	2	6.84	6.98
			15	6.56	6.21	6.2	3	6.2	6.21
			30	5.58	5.1	4.98	2	4.98	5.1
			توسط جابجایی در مرکز (mm)		24.45				
10	100	17.27	1	3.25	1.78	1.88	3	1.88	1.78
			5	2.1	0.88	0.98	2	0.98	0.88
			15	0.55	0	0	3	0	0
			30				3		
			توسط جابجایی در مرکز (mm)		29.49				
11	60	10.41	1	5.29	4.93	4.98	3	4.98	4.93
							2		
							3		
							3		
			توسط جابجایی در مرکز (mm)		29.42				
12	30	5.3	1	5.78	5.24	5.31	3	5.31	5.24
							2		
							3		
							3		
			توسط جابجایی در مرکز (mm)		29.05				
13	0	0	1	7.73	7.88	8.1	3	8.1	7.88
							2		
							3		
							3		
			توسط جابجایی در مرکز (mm)		26.52				
14	30	5.3	1	6.32	5.94	6.08	3	6.08	5.94
							2		
							3		
							3		
			توسط جابجایی در مرکز (mm)		28.31				

مهندسین مشاور آزمون شرق

ادامه پیوست ب) نتایج آزمایش های بارگذاری صفحه



QAL
Certification
ISO 9001:2008
Reg. No. 0077024



آزمون

کارفرما: شرکت خورشید درخشان هشتم توس
 پروژه: مطالعات تکمیلی جهان مال

نتایج آزمایش در عمق ۴ متری:

شیت آزمایش بارگذاری صفحه									
مهندسین مشاور طرح و آزمون پارس									
عنوان پروژه:		جهان مال		شماره پروژه:		تاریخ آزمایش:		1396/03/29	
شماره تست:		3		عمق تست از تراز مبنا (m):		4		موقعیت تست:	
قطر صفحه (سانتیمتر):		30cm		تنظیم اولیه گنج (میلیمتر):		10		کارشناس: شوقی-جلایر	
شماره مرحله	ساعت شروع	نیرو (بار)	ضخار (کلوگرم بر سانتیمتر مربع)	زمان (دقیقه):	گنج 1 (میلیتر)	گنج 2 (میلیتر)	گنج 3 (میلیتر)		
1		10	1.83	1	9.41	8.24	8.32		
				5	9.41	8.23	8.31		
				15	9.4	8.21	8.3		
				توسط جابجایی در مرکز (mm)			1.36		
2		20	3.55	1	8.4	7.25	7.35		
				5	8.31	7.23	7.32		
				15	8.31	7.22	7.3		
				توسط جابجایی در مرکز (mm)			2.39		
3		30	5.3	1	7.66	6.57	6.65		
				5	7.61	6.56	6.63		
				15	7.49	6.46	5.53		
				توسط جابجایی در مرکز (mm)			3.51		
4		40	6.97	1	6.88	5.81	5.99		
				5	6.68	5.66	5.75		
				15	6.47	5.51	5.62		
				توسط جابجایی در مرکز (mm)			4.13		
5		50	8.68	1	5.91	4.98	5.08		
				5	5.79	4.93	5		
				15	5.71	4.45	4.94		
				30	5.36	4.29	4.73		
توسط جابجایی در مرکز (mm)			5.21						
6		60	10.41	1	4.35	3.31	3.66		
				5	4.06	3.08	3.44		
				15	3.59	2.51	3.16		
				30	3.46	2.41	3.07		
توسط جابجایی در مرکز (mm)			7.02						
7		70	12.11	1	9.15	9	8.98		
				5	8.95	8.86	8.85		
				15	8.83	8.73	8.72		
				30	8.8	8.7	8.69		
توسط جابجایی در مرکز (mm)			8.29						

مهندسین مشاور پارس آزمون شرق

ادامه پیوست ب) نتایج آزمایش های بارگذاری صفحه



QAI
Certification
ISO 9001:2005
Reg. No. 20172051



آزمون

کارفرما: شرکت خورشید درخشان هشتم توس

پروژه: مطالعات تکمیلی جهان مال

شیت آزمایش بارگذاری صفحه											
مهندسين مشاور طرح و آزمون پارس											
عنوان پروژه:		جهان مال		شماره پروژه:		1396/03/29		تاریخ آزمایش:			
شماره تست:		3		عمق تست از تراز مینا (m):		4		موقعیت تست:			
قطر صفحه (سانتیمتر):		30cm		تنظیم اولیه گچ (میلیمتر):		10		کارشناس: شوقی - جلابر			
شماره مرحله	ساعت شروع	نیرو (بار)	ضخار (کلوگرم بر سانتیمتر مربع)	زمان (دقیقه):	گچ 1 (میلیتر)	گچ 2 (میلیتر)	گچ 3 (میلیتر)	توسط جابجایی در مرکز (mm)			
8		80	13.83	1	7.51	7.43	7.32	9.95			
				5	7.38	7.27	7.18				
				15	7.22	7.18	7.1				
				30	7.12	7.05	7.05				
9		90	15.55	1	6.45	6.15	6.05	11.64			
				5	5.98	5.88	5.62				
				15	5.65	5.57	5.49				
				30	5.45	5.4	5.29				
10		100	17.27	1	4.3	4.1	4	13.89			
				5	3.75	3.46	3.25				
				15	3.5	3.25	3.05				
				30	3.35	3.12	2.92				
11		60	10.41	1	3.39	3.15	3	13.84			
12		30	5.3	1	3.71	3.48	3.46	13.47			
13		0	0	1	5.86	5.3	5.48	11.47			
14		50	8.68	1	4.24	3.35	3.31	13.39			

ادامه پیوست ب) نتایج آزمایش های بارگذاری صفحه



QAL
Certification
ISO 9001:2008
Reg. No. 0077024



آزمون
مهندسی

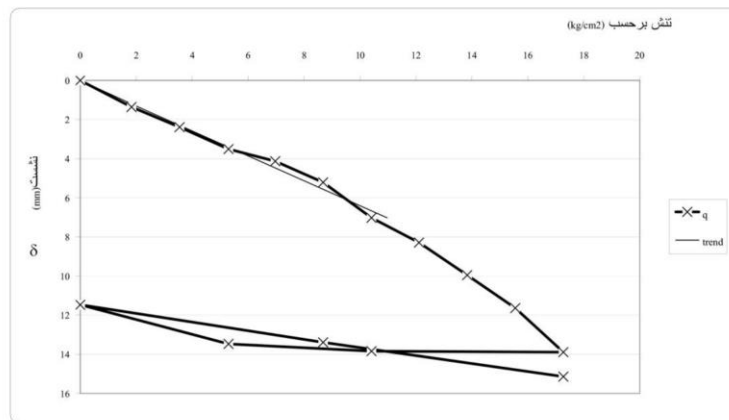
کارفرما: شرکت خورشید درخشان هشتم توس
 پروژه: مطالعات تکمیلی جهان مال

شیت آزمایش بارگذاری صفحه						
مهندسین مشاور طرح و آزمون پارس						
عنوان پروژه:	جهان مال	شماره پروژه:	1396/03/29	تاریخ آزمایش:	3	شماره تست:
شماره تست:	3	عمق تست از تراز مینا (m):	4	موقعیت تست:	3	شماره صفحه (سانتیمتر):
قطر صفحه (سانتیمتر):	30cm	تنظیم اولیه گج (میلیمتر):	10	کارشناس:	شوقی-جلایر	شماره مرحله:
شماره مرحله:	15	فشار (کلوگرم بر سانتیمتر مربع):	17.27	زمان (دقیقه):	1	ساعت شروع:
		فشار (کلوگرم بر سانتیمتر مربع):	100	زمان (دقیقه):	1	نیرو (بار):
		توسط جابجایی در مرکز (mm)	15.14	گج 1 (میلیمتر):	2.58	نیرو (بار):
				گج 2 (میلیمتر):	1.56	نیرو (بار):
				گج 3 (میلیمتر):	1.5	نیرو (بار):

شماره دستور کار: **آزمایش بارگذاری صفحه - تست شماره سه**

موقعیت: **3** نام پروژه: **جهان مال**

تراز: **4 m**



مهندسین مشاور پی آزمون شرق

ادامه پیوست ب) نتایج آزمایش های بارگذاری صفحه



نتایج آزمایش در عمق ۴.۷ متری:

شیت آزمایش بارگذاری صفحه									
مهندسین مشاور طرح و آزمون پارس									
عنوان پروژه:	جهان مال	شماره پروژه:							
شماره تست:	4	عمق تست از تراز مینا (m):	4.7 <th colspan="6"></th>						
قطر صفحه (سانتیمتر):	30cm	تنظیم اولیه گچ (میلیمتر):	10 <th>کارشناس:</th> <td colspan="5">شوفی - جلاپر </td>	کارشناس:	شوفی - جلاپر				
تاریخ آزمایش:	1396/03/29 <th colspan="6"></th>								
موقعیت تست:	4 <th colspan="6"></th>								
شماره مرحله	ساعت شروع	نیرو (بار)	فشار (کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)	زمان (دقیقه):	گچ 1 (میلیمتر)	گچ 2 (میلیمتر)	گچ 3 (میلیمتر)		
1	16:40	10	1.83	1	9.98	9.42	9.72		
				2	9.96	9.39	9.7		
				متوسط جابجایی در مرکز (mm)			0.32		
شماره مرحله	ساعت شروع	نیرو (بار)	فشار (کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)	زمان (دقیقه):	گچ 1 (میلیمتر)	گچ 2 (میلیمتر)	گچ 3 (میلیمتر)		
2	16:43	20	3.55	1	9.85	8.91	9.18		
				2	9.85	8.88	9.15		
				متوسط جابجایی در مرکز (mm)			0.71		
شماره مرحله	ساعت شروع	نیرو (بار)	فشار (کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)	زمان (دقیقه):	گچ 1 (میلیمتر)	گچ 2 (میلیمتر)	گچ 3 (میلیمتر)		
3	16:45	30	5.3	1	9.59	8.17	8.39		
				2	9.57	8.1	8.31		
				متوسط جابجایی در مرکز (mm)			1.34		
شماره مرحله	ساعت شروع	نیرو (بار)	فشار (کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)	زمان (دقیقه):	گچ 1 (میلیمتر)	گچ 2 (میلیمتر)	گچ 3 (میلیمتر)		
4	16:48	40	6.97	1	9.38	7.3	7.35		
				2	9.35	7.16	7.19		
				متوسط جابجایی در مرکز (mm)			2.1		
شماره مرحله	ساعت شروع	نیرو (بار)	فشار (کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)	زمان (دقیقه):	گچ 1 (میلیمتر)	گچ 2 (میلیمتر)	گچ 3 (میلیمتر)		
5	16:50	50	8.68	1	9.05	5.88	5.7		
				2	9.01	5.74	5.56		
				متوسط جابجایی در مرکز (mm)			3.23		
شماره مرحله	ساعت شروع	نیرو (بار)	فشار (کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)	زمان (دقیقه):	گچ 1 (میلیمتر)	گچ 2 (میلیمتر)	گچ 3 (میلیمتر)		
6	16:53	60	10.41	1	8.41	4.51	4.19		
				2	8.35	4.38	4.06		
				متوسط جابجایی در مرکز (mm)			4.4		
شماره مرحله	ساعت شروع	نیرو (بار)	فشار (کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)	زمان (دقیقه):	گچ 1 (میلیمتر)	گچ 2 (میلیمتر)	گچ 3 (میلیمتر)		
7	16:56	70	12.11	1	7.05	2.53	2.12		
				2	6.87	2.32	1.91		
				متوسط جابجایی در مرکز (mm)			6.3		

مهندسین مشاور پارس آزمون شرق

ادامه پیوست ب) نتایج آزمایش های بارگذاری صفحه



پروژه: مطالعات تکمیلی جهان مال

کارفرما: شرکت خورشید درخشان هشتم توس

شیت آزمایش بارگذاری صفحه										
مهندسین مشاور طرح و آزمون پارس										
عنوان پروژه:	جهان مال	شماره پروژه:	تاریخ آزمایش:	1396/03/29	عمق تست از تراز مبنا (m):	4.7	موقعیت تست:	4	شماره تست:	4
قطر صفحه (سانتی متر):	30cm	تنظیم اولیه گیج (میلی متر):	10	کارشناس:	شوقی - جلابر					
شماره مرحله	ساعت شروع	نیرو (بار)	فشار (کلوگرم بر سانتی متر مربع)	زمان (دقیقه):	گیج 1 (میلی متر)	گیج 2 (میلی متر)	گیج 3 (میلی متر)			
8	17:02	80	13.83	1	7.78	7.59	7.41			
				2	7.48	7.27	7.02			
					7.05	6.78	6.55			
					توسط جابجایی در مرکز (mm)			9.51		
9	17:05	90	15.55	1	3.55	3.1	2.6			
				2	2.62	2.19	1.71			
				5	1.56	1.12	0.57			
					توسط جابجایی در مرکز (mm)			15.22		
10	17:12	60	10.41	1	1.91	1.5	0.94			
				2	1.91	1.51	0.95			
					توسط جابجایی در مرکز (mm)			14.84		
11	17:15	2	0.22	1	4.31	3.92	3.53			
					توسط جابجایی در مرکز (mm)			12.38		
12	17:18	45	7.83	1	2.79	2.91	1.89			
					توسط جابجایی در مرکز (mm)			13.77		
13	17:51	90	15.55	1	0	0	0			
					توسط جابجایی در مرکز (mm)			16.3		

مهندسین مشاور پی آزمون شرق

ادامه پیوست ب) نتایج آزمایش های بارگذاری صفحه

QAL Certification
2504 P002-2003
Reg. No. 20172024

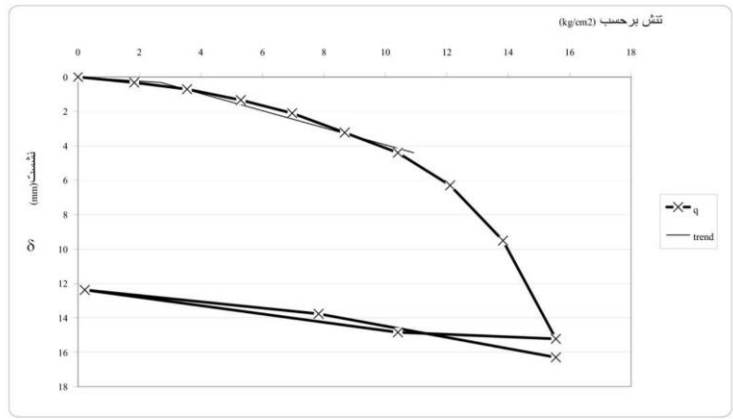
آزمایش

کارفرما: شرکت خورشید درخشان هشتم توس
پروژه: مطالعات تکمیلی جهان مال

شماره دستور کار: 4
موقعیت: 4.7 m
تراز: 4.7 m

آزمایش بارگذاری صفحه- تست شماره چهار

نام پروژه: جهان مال



Abstract:

Nowadays, with the significant increase of the need to carry out excavation in urban areas, it is necessary to properly control the deformations caused by excavation in order to ensure safety and cost effective operation in the vicinity of structures and municipal facilities. In this research, the deformations of an excavation for different values of the modulus of elasticity obtained from geotechnical tests (including pressuremeter, SPT and three axial) and using three constitutive soil model of Mohr-Coulomb (MC), Hardening soil (HS) and Hardening small strain (HSS) have been investigated in Plaxis 2D finite element software. By comparing the results of modeling and results from the monitoring of the excavation to a depth of 25 meters, which was supported by anchored soldier pile system in Mashhad city, it was shown that the elastic modulus obtained from the pressuremeter test is more appropriate than the three-axial and SPT tests in the excavation analysis. HSS constitutive model yielded the most accurate results and MC constitutive model has the highest error, so it is recommended that the MC model should not be used in excavation analysis.

Parametric study was also performed to determine the sensitivity of excavation displacement to soil engineering parameters (including stiffness, internal friction angle and cohesion) and various parameters such as maximum horizontal and vertical displacements, displacement profile and ... for different values of soil engineering parameters were investigated.

Keywords: Excavation, Constitutive Model, Anchored Soldier Pile System, Plaxis



Shahrood University of Technology
Faculty of Civil Engineering

MSc Thesis Civil Engineering-Geotechnical Engineering

**Evaluation and back-analysis of deformations in deep excavations for
proper selection of soil elastic parameters**

By:

Mahdi Farhadi

Supervisor:

Dr. Bazrafshan Moghaddam

January 2018