





دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته‌ی مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

بررسی اندرکنش دوغاب و محیط در برگیرنده ابزارهای کشیدگی سنج خاک

و سنگ

نگارنده:

افشین قلی نیا

اساتید راهنما:

دکتر مجید نیکخواه

دکتر رضا نادری

بهمن ۱۳۹۶

شماره ۲۷۹/۲۷۹
تاریخ ۹۶/۱/۱۶

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام زیاد خداوند متعال، بنوعی جمعه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای افشین قلی نیا به شماره دانشجویی ۹۶۱۵۱۱۶ رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ تحت عنوان بررسی اندروکنش دوغاناب و محیط دوربرگیرنده ابزارهای کنیندگی سیج خاک و سنگ که در تاریخ ۱۳۹۶/۱۱/۰۹ با حضور هیأت محرم داران در دستگاه منشی شاهرود برگزار گردید، به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: عالی) ☐ مردود ☐	
نوع تحقیق: نظری ☒ عملی ☐	
عضو هیأت داوران ۱- استاد ارشدی اول ۲- استاد ارشدی دوم ۳- استاد مشاور ۴- سرپنده تحصیلات تکمیلی ۵- استاد معین اول ۶- استاد معین دوم	نام و نام خانوادگی دکتر مجید ایکخواه دکتر رضا نظری دکتر مریم جواد دکتر احمد وصال زاده دکتر شکراله ذارع
عضو هیأت داوران ۱- استاد ارشدی اول ۲- استاد ارشدی دوم ۳- استاد مشاور ۴- سرپنده تحصیلات تکمیلی ۵- استاد معین اول ۶- استاد معین دوم	نام و نام خانوادگی دکتر مجید ایکخواه دکتر رضا نظری دکتر مریم جواد دکتر احمد وصال زاده دکتر شکراله ذارع

مهر و امضاء

۹۶/۱/۱۶

تیمار در صورتی که کسی در هیأت داوران شرکت نداشته باشد، هیأت داوران باید از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۳ ماه برگزار شود).

تقدیم به:

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی
به پاس عاطفه سرشار و کرمای امید بخش وجودشان که در این سردترین
روزگار ان بهترین پشتیبان است
به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است و سرکردانی و ترس در
ناهمشان نه شجاعت می گزاید

تقدیر و تشکر

در ابتدا بر آستان حضرت حق به رسم شکرگزاری سر تعظیم فرود می آورم که توفیق جهانیان همه از فضل اوست. که اگر توفیق او یار نبود این حقیر را توانایی انجام این کار نبود. پس بر خود لازم می دانم از زحمات بی منت و خالصانه اساتید گران قدر جناب آقای دکتر محمد نیکخواه و دکتر رضا نادری که راهنمایی این جانب را بر عهده داشته اند و از دکتر احمد رمضان زاده و دکتر شکراله زارع که زحمت داور می پایان نامه را بر عهده گرفته اند کمال تشکر را بنمایم. همچنین از زحمات مهندس نادری مسئول آزمایشگاه مکانیک سنگ به جهت کمک در انجام هرچه بهتر آزمون های آزمایشگاهی تشکر و قدردانی نموده و از تمامی اساتید و دوستانی که با الطاف صمیمانه ی خود طی این مسیر را بر من هموار کردند تشکر می نمایم. در پایان بر دست پدر ارجمند و مادر مهربانم که همواره و

دلسوزانه در طول زندگی حامی و همراه من بوده اند به رسم قدردانی بوسه می زنم.

تعهدنامه

اینجانب **افشین قلی نیا** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن-مکانیک سنگ دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع **بررسی اندرکنش دوغاب و محیط در برگیرنده ابزارهای کشیدگی سنج خاک و سنگ تحت راهنمایی دکتر مجید نیکخواه و دکتر رضا نادری 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 به مرجع 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 تأثیرگذار 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) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

امروزه ابزار رفتارسنجی از اهمیت ویژه‌ای در کنترل پایداری و ایمنی سازه‌ها برخوردار است. انتخاب، نوع و جانمایی صحیح ابزارها در رفتارسنجی یک سازه می‌تواند بروز پدیده‌ها و عوامل مخرب نظیر ایجاد ترک و جابجایی در سازه و فشار آب منفذی و کاهش تنش و ... را شناسایی کند. یکی از انواع ابزارهای رفتار نگاری که برای اندازه‌گیری جابجایی‌های سطحی و عمقی استفاده می‌گردد، کشیدگی سنج‌های نوع مغناطیسی و میله‌ای هستند. این ابزارها درون گمانه‌ای که در خاک و سنگ حفاری می‌شوند، قرار داده شده و فضای داخل گمانه با مخلوط دوغاب بنتونیت - سیمان پر می‌شود. در برخی موارد اندازه‌گیری‌های قابل‌انتظار با نتایج داده‌های ابزار دقیق دارای اختلاف بوده و این اختلاف و خطا را می‌توان در اغلب موارد به عدم اتصال مناسب نقطه گیرداری و نوع و خواص دوغاب نسبت به محیط در برگیرنده و مورد بررسی نسبت داد. بدین منظور در این پژوهش تعدادی آزمون آزمایشگاهی با طرح اختلاط‌های مختلف دوغاب جهت تعیین خواص مکانیکی و اندرکنش بین دوغاب و لوله ABS انجام گرفته است. همچنین برای بررسی تأثیر پارامترهای کنترلی بر روی اندازه‌گیری جابجایی، مطالعه عددی با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ به همراه مدلسازی کشیدگی سنج گمانه‌ای انجام شده است. در این راستا اثر نسبت مدول الاستیک دوغاب - خاک، پارامترهای سطح مشترک خاک/دوغاب (زاویه اصطکاک و چسبندگی) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعات آزمایشگاهی و عددی نشان می‌دهد هرچه درصد اختلاط آب به سیمان و بنتونیت به سیمان افزایش یابد مقاومت فشاری، مدول نمونه دوغابی و همچنین تنش برشی سطح مشترک کاهش خواهد یافت. درصد خطای اندازه‌گیری ابزار رابطه مستقیمی با مدول دوغاب پرکننده گمانه دارد که متناسب با نزدیکی مقدار مدول دوغاب به مدول خاک اطراف، درصد خطای اندازه‌گیری به‌طور مستقیم کاهش می‌یابد. هرچه مدول دوغاب بیشتر از محیط اطراف آن باشد مقدار جابجایی منتقل شده به ابزار کمتر بوده و در نتیجه درصد خطای اندازه‌گیری بیشتر خواهد بود. همچنین برای نسبت‌های مدول الاستیک دوغاب-خاک/سنگ بیشتر از ۱۰ درصد در مورد سه نوع خاک مختلف (نرم، متوسط و سخت) و دو نوع توده سنگ ضعیف و متوسط، خطا قابل توجه بوده و درصد خطا در نوع خاک نرم در برگیرنده ابزار نیز بیشتر حاصل شده است. همچنین اثر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی سطح مشترک در خطای اندازه‌گیری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج گویای تأثیر ناچیز زاویه اصطکاک داخلی

سطح مشترک و تأثیر محسوس چسبندگی سطح مشترک در درصد خطای اندازه‌گیری دارد بطوریکه هرچه چسبندگی سطح مشترک به مقدار چسبندگی محیط اطراف دوغاب نزدیک‌تر باشد مقدار درصد خطا کمتر خواهد بود. در نهایت با توجه به نتایج، الگوی پیشنهادی برای محدوده مدول دوغاب پرکننده ارائه شده است.

کلمات کلیدی: کشیدگی سنج مغناطیسی / میله‌ای، اختلاط بنتونیت-سیمان، آزمون آزمایشگاهی، مدل‌سازی عددی

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

۱- قلی نیا، الف. نیکخواه، م. نادری، ر. (۱۳۹۶). "تأثیر خواص دوغاب در اندازه‌گیری نشست

با استفاده از کشیدگی سنج گمانه‌ای" سومین همایش منطقه‌ای و دوازدهمین همایش ملی تونل

ایران-آذرماه ۱۳۹۶

2- Gholinia.A, Nikkhah.M, Naderi.R. (2017). **"Numerical study on the effect of grout properties on the results of borehole Extensometers in earth dams"** 4th

International Conference on Long-Term Behavior and Environmentally friendly Rehabilitation Technologies of Dams. Tehran, Iran

فصل اول: کلیات

۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ ضرورت انجام تحقیق.....	۳
۳-۱ اهداف تحقیق.....	۴
۴-۱ روش تحقیق.....	۴
۵-۱ پیشینه تحقیق.....	۵
۶-۱ ساختار پایان نامه.....	۶

فصل دوم: ابزارهای کشیدگی سنج

۱-۲ مقدمه.....	۸
۲-۲ کشیدگی سنج.....	۸
۳-۲ کشیدگی سنج پروب دار.....	۹
۱-۳-۲ اجزا کشیدگی سنج پروب دار مغناطیسی.....	۹
۱-۳-۲-۱ لوله دسترسی.....	۹
۲-۳-۲-۱ مغناطیس مبنا.....	۱۰

- ۱۰ ۳-۱-۳-۲ حلقه مغناطیسی عنکبوتی
- ۱۱ ۴-۱-۳-۲ صفحه مغناطیسی
- ۱۱ ۲-۳-۲ نصب و قرائت کشیدگی سنج‌های مغناطیسی
- ۱۳ ۴-۲ کشیدگی سنج گمانه‌ای ثابت
- ۱۷ ۱-۴-۲ اجزای کشیدگی سنج میله‌ای
- ۱۷ ۱-۱-۴-۲ درپوش مرجع
- ۱۷ ۲-۱-۴-۲ مفصل تلسکوپی
- ۱۷ ۳-۱-۴-۲ میله‌ها
- ۱۸ ۴-۱-۴-۲ لوله محافظ
- ۱۸ ۵-۱-۴-۲ مهار
- ۲۰ ۲-۴-۲ تعداد نقاط اندازه‌گیری کشیدگی سنج میله‌ای
- ۲۱ ۳-۴-۲ نصب کشیدگی سنج‌های میله‌ای
- ۲۱ ۱-۳-۴-۲ شرایط لازم گمانه
- ۲۱ ۲-۳-۴-۲ مونتاژ
- ۲۱ ۳-۳-۴-۲ تزریق
- ۲۲ ۵-۲ انحراف سنج
- ۲۳ ۶-۲ ابزار ترکیبی انحراف سنج - نشست سنج
- ۲۳ ۷-۲ نصب انحراف سنج - نشست سنج درون گمانه‌ای
- ۲۴ ۸-۲ جمع‌بندی

فصل سوم: پیشینه پژوهش

- ۱-۳ مقدمه..... ۲۶
- ۲-۳ دوغاب سیمان-بنتونیت..... ۲۶
- ۳-۳ مشخصات مکانیکی دوغاب سیمان - بنتونیت..... ۲۸
- ۴-۳ طرح اختلاط..... ۳۱
- ۵-۳ اندرکنش بین خاک و سازه و عوامل مؤثر بر آن..... ۳۵
- ۱-۵-۳ آزمون‌های برشی سطح مشترک..... ۳۸
- ۲-۵-۳ جنبه‌های کلیدی رفتار سطح مشترک..... ۳۹
- ۱-۲-۵-۳ زبری سطح..... ۴۰
- ۲-۲-۵-۳ چسبندگی..... ۴۲
- ۳-۲-۵-۳ متوسط اندازه ذره..... ۴۲
- ۴-۲-۵-۳ تراکم نسبی خاک..... ۴۳
- ۵-۲-۵-۳ سختی و تنش نرمال محصور شده..... ۴۳
- ۶-۳ جمع‌بندی..... ۴۴

فصل چهارم: مطالعه آزمایشگاهی.....

- ۱-۴ مقدمه..... ۴۶
- ۲-۴ مشخصات مصالح مصرفی..... ۴۶

۴۸	۳-۴ دستگاه‌های مورد استفاده در آزمایشگاه
۴۸	۱-۳-۴ ترازوی دیجیتالی
۴۸	۲-۳-۴ مخلوط‌کن
۴۹	۳-۳-۴ دستگاه بارگذاری
۵۰	۴-۴ مراحل ساخت نمونه آزمایشی دوغاب پرکننده
۵۱	۵-۴ آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره
۵۲	۶-۴ آزمون برون‌رانی
۵۵	۷-۴ نتایج مطالعات آزمایشگاهی
۶۱	۸-۴ جمع‌بندی

فصل پنجم: مدل‌سازی عددی و تحلیل نتایج

۶۴	۱-۵ مقدمه
۶۵	۲-۵ انتخاب نرم‌افزار مناسب مدل‌سازی عددی
۶۶	۳-۵ معرفی نرم‌افزار $FLAC^{3D}$
۶۸	۴-۵ فرض‌های مسئله
۶۸	۵-۵ مراحل مدل‌سازی و حل مسئله
۶۸	۱-۵-۵ هندسه و شبکه‌بندی مدل
۶۹	۱-۱-۵-۵ مدل کشیدگی سنج مغناطیسی
۷۰	۲-۱-۵-۵ مدل کشیدگی سنج میله‌ای

۷۳	۲-۵-۵ مدل سازی رفتار مواد.....
۷۶	۳-۵-۵ شرایط مرزی و اولیه.....
۷۷	۴-۵-۵ بررسی تعادل اولیه مدل.....
۷۹	۵-۵-۵ مرحله حفاری گمانه و نصب ابزار.....
۸۰	۶-۵-۵ مدل سازی سطح مشترک.....
۸۲	۷-۵-۵ بارگذاری.....
۸۴	۸-۵-۵ صحت سنجی مدل عددی.....
۸۸	۶-۵ تعیین خطای اندازه گیری در مدل کشیدگی سنج مغناطیسی.....
۸۹	۱-۶-۵ نسبت مدول دوغاب به خاک (E_g / E_s).....
۹۳	۲-۶-۵ زاویه اصطکاک داخلی سطح مشترک.....
۹۴	۳-۶-۵ چسبندگی سطح مشترک.....
۹۵	۷-۵ تعیین درصد خطای اندازه گیری در کشیدگی سنج میله ای.....
۹۹	۸-۵ تحلیل حساسیت جابجایی مهار در کشیدگی سنج میله ای.....
۱۰۱	۹-۵ مقایسه خطای اندازه گیری کشیدگی سنج مغناطیسی و میله ای.....
۱۰۲	۱۰-۵ جمع بندی.....

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادها

۱۰۴	۱-۶ مقدمه.....
۱۰۴	۲-۶ نتیجه گیری.....

۳-۶ پیشنهادها..... ۱۰۵

منابع..... ۱۰۶

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: انواع اتصال لوله دسترسی الف) اتصال تلسکوپی، ب) اتصال ساده..... ۱۰
- شکل ۲-۲: حلقه مغناطیسی عنکبوتی و صفحه‌ای و پروب اندازه‌گیری ۱۱
- شکل ۳-۲: نصب سیستم آهن‌ربای عنکبوتی بیرون لوله انحراف سنج ۱۲
- شکل ۴-۲: میدان مغناطیسی در لوله نشست سنج ۱۳
- شکل ۵-۲: کشیدگی سنج گمانه‌ای ثابت تک نقطه‌ای..... ۱۴
- شکل ۶-۲: اندازه‌گیری نشست با استفاده از کشیدگی سنج میله‌ای ۱۶
- شکل ۷-۲: سیستم کشیدگی سنج میله‌ای الف) اندازه‌گیری الکتریکی، ب) اندازه‌گیری مکانیکی و دستی ۱۶
- شکل ۸-۲: میله فولادی و لوله محافظ کشیدگی سنج‌های میله‌ای..... ۱۸
- شکل ۹-۲: اجزای کشیدگی سنج میله‌ای ۱۹
- شکل ۱۰-۲: طرح کلی انحراف سنج و عملکرد آن ۲۳
- شکل ۱-۳: مقاومت ۲۸ روزه دوغاب سیمان- بنتونیت با نسبت طرح اختلاط آب به سیمان ۲۹
- شکل ۲-۳: طرح اختلاط دوغاب در نظر گرفته شده توسط پژوهشگران گذشته..... ۳۲
- شکل ۳-۳: رفتار سطح مشترک و عوامل مهم برای رفتار سطح مشترک حجمی ۳۹
- شکل ۴-۳: زیری سطح نسبت به ضریب اصطکاک برای سطح مشترک فولاد و ماسه ۴۰
- شکل ۱-۴: الف) دستگاه ترازوی دیجیتالی، ب) دستگاه مخلوط‌کن دوغاب..... ۴۹
- شکل ۲-۴: دستگاه بارگذاری نیمه‌خودکار ۵۰
- شکل ۳-۴: مراحل اجرای ساخت نمونه دوغاب پرکننده..... ۵۱
- شکل ۴-۴: الف) نمونه ساخته شده دوغابی، ب) محل نگهداری نمونه‌ها در داخل محفظه حاوی آب ۵۱
- شکل ۵-۴: الف) نمونه قبل و بعد از بارگذاری، ب) نمونه در زیر دستگاه بارگذاری ۵۲

- شکل ۴-۶: آزمون برون رانی برای مقاومت برشی سطح مشترک ۵۳
- شکل ۴-۷: مراحل آماده سازی نمونه ۵۳
- شکل ۴-۸: قالب و مراحل ساخت نمونه آزمایش ۵۴
- شکل ۴-۹: الف) حلقه توخالی، ب) نمونه و کرنش سنج دیجیتالی نصب شده بر روی دستگاه بارگذاری ۵۴
- شکل ۴-۱۰: نمودار تغییرات مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته در نسبت بنتونیت به سیمان و آب به سیمان های مختلف ۵۶
- شکل ۴-۱۱: مقایسه نتایج مقاومت فشاری محصور نشده بدست آمده با تحقیق های گذشته ... ۵۷
- شکل ۴-۱۲: نمودار تنش برشی سطح مشترک دوغاب و لوله برای نسبت $B/C = 0/3$ ۵۸
- شکل ۴-۱۳: نمودار تنش برشی سطح مشترک دوغاب و لوله برای نسبت $B/C = 0/4$ ۵۹
- شکل ۴-۱۴: نمودار تنش برشی سطح مشترک دوغاب و لوله برای نسبت $B/C = 0/5$ ۵۹
- شکل ۴-۱۵: تنش برشی سطح مشترک برای نسبت های مختلف بنتونیت به سیمان ۶۰
- شکل ۴-۱۶: الف) روغن کاری بر سطح خارجی کل لوله، ب) قالب مورد استفاده ۶۰
- شکل ۴-۱۷: نمودار تأثیر روغن کاری کاری بر مقدار تنش برشی سطح مشترک دوغاب و لوله برای نسبت $B/C = 0/3$ ۶۱
- شکل ۵-۱: چرخه اصلی در محاسبات صریح ۶۸
- شکل ۵-۲: هندسه کلی مدل کشیدگی سنج مغناطیسی ۷۰
- شکل ۵-۳: اجزای مدل کشیدگی سنج مغناطیسی، الف) حلقه مغناطیسی متصل به لوله، ب) لوله و دوغاب ۷۰
- شکل ۵-۴: هندسه کلی مدل کشیدگی سنج میله ای ۷۱
- شکل ۵-۵: هندسه میله و غلاف و مهار در کشیدگی سنج میله. الف) نمای دور، ب) نمای نزدیک ۷۲

- شکل ۵-۶: ساخت هندسه دوغاب در Extrusion، (ب) مدل نهایی هندسه دوغاب ۷۲
- شکل ۵-۷: هندسه میله‌ها و غلاف همراه با دوغاب در مدل ۷۳
- شکل ۵-۸: ثابت شدن مرزها در سه جهت z, y, x (الف) شماتیکی از بستن غلتکی و ثابت مرزها، (ب) ثابت کردن مرز مدل کشیدگی سنج میله‌ای ۷۷
- شکل ۵-۹: اعمال مدل‌سازی حالت تنش اولیه در مدل‌سازی ۷۷
- شکل ۵-۱۰: نمودار تغییرات نیروهای نامتعادل مدل کشیدگی سنج مغناطیسی ۷۸
- شکل ۵-۱۱: (الف) مرزبندی جابجایی در راستای محور z ، (ب) مرزبندی تنش در راستای محور z ۷۹
- شکل ۵-۱۲: تأثیر حفاری گمانه بر جابجایی محیط (الف) کشیدگی سنج مغناطیسی، (ب) کشیدگی سنج میله‌ای ۷۹
- شکل ۵-۱۳: المان سطح مشترک بین خاک و دوغاب ۸۱
- شکل ۵-۱۴: مدل‌سازی سطح مشترک در مدل (الف) کشیدگی سنج مغناطیسی، (ب) کشیدگی سنج میله‌ای ۸۲
- شکل ۵-۱۵: اعمال بار گسترده بر روی سطح مدل کشیدگی سنج مغناطیسی ۸۳
- شکل ۵-۱۶: مرزبندی جابجایی در جهت قائم برای مدل کشیدگی سنج مغناطیسی در خاک سخت ۸۳
- شکل ۵-۱۷: مرزبندی جابجایی در جهت قائم برای مدل کشیدگی سنج میله‌ای در توده سنگ متوسط ۸۴
- شکل ۵-۱۸: مقایسه نشست به دست آمده از مدل‌سازی عددی و رابطه تجربی ۸۵
- شکل ۵-۱۹: پی و پروفیل خاک جهت اعتبارسنجی مدل عددی ۸۶
- شکل ۵-۲۰: مدل ساخته شده در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ جهت اعتبارسنجی ۸۷
- شکل ۵-۲۱: خلاصه نتایج اندازه‌گیری نشست پی با استفاده از کشیدگی سنج مغناطیسی ۸۷
- شکل ۵-۲۲: مرزبندی جابجایی قائم در زیر پی تحت سربار ۲۱۰ کیلو پاسکال ۸۸

- شکل ۵-۲۳: روش تعیین خطای اندازه‌گیری در کشیدگی سنج مغناطیسی ۸۹
- شکل ۵-۲۴: نمودار جابجایی کشیدگی سنج مغناطیسی در دوغاب و محیط خاک متوسط با نسبت ۹۰
- شکل ۵-۲۵: مرزبندی جابجایی کشیدگی سنج مغناطیسی در دوغاب و محیط خاک متوسط با نسبت ۹۰
- شکل ۵-۲۶: درصد خطای اندازه‌گیری برای نسبت‌های مختلف E_g / E_s برای خاک‌های مختلف. ۹۱
- شکل ۵-۲۷: نمودار جابجایی مدل‌سازی عددی کشیدگی سنج مغناطیسی در دوغاب و خاک با نسبت $E_g/E_s = 50$ در خاک متوسط ۹۲
- شکل ۵-۲۸: درصد خطای اندازه‌گیری برای نسبت‌های مختلف بنتونیت به سیمان (B/C) با نسبت های آب به سیمان ۲، ۳ و ۴ ۹۳
- شکل ۵-۲۹: درصد خطای اندازه‌گیری با زوایای اصطکاک داخلی مختلف برای نسبت‌های مختلف E_g/E_s در خاک متوسط ۹۴
- شکل ۵-۳۰: درصد خطای اندازه‌گیری با چسبندگی سطح مشترک مختلف برای نسبت‌های مختلف E_g / E_s در خاک متوسط ۹۵
- شکل ۵-۳۱: تعیین خطای اندازه‌گیری در کشیدگی سنج میله‌ای ۹۶
- شکل ۵-۳۲: مرزبندی جابجایی در جهت (Z - الف) مدل کامل کشیدگی سنج میله‌ای، (ب) برش از وسط مدل ۹۶
- شکل ۵-۳۳: نمودار جابجایی مهار کشیدگی سنج میله‌ای در عمق ۱/۵ متری با نسبت ۱۰ = E_g/E_s در دوغاب و توده سنگ متوسط ۹۷
- شکل ۵-۳۴: درصد خطای اندازه‌گیری مهار در عمق ۱/۵ متری در خاک و سنگ مختلف ۹۷
- شکل ۵-۳۵: درصد خطای اندازه‌گیری مهار در عمق ۳/۵ متری در خاک و سنگ مختلف ۹۸
- شکل ۵-۳۶: درصد خطای اندازه‌گیری مهار در عمق ۸/۵ در خاک و سنگ مختلف ۹۸

شکل ۵-۳۷: نمودار جابجایی سه مهار گیرداری در یک لایه سنگ متوسط ۱۰۰

شکل ۵-۳۸: نمودار جابجایی سه مهار گیرداری در لایه ضعیف بین دو لایه سخت ۱۰۰

فهرست جداول

- جدول ۲-۲: حداکثر طول میله‌های کشیدگی سنج در حالت کششی و فشاری..... ۱۷
- جدول ۳-۲: مشخصات اجزای کشیدگی سنج میله‌ای..... ۱۹
- جدول ۱-۲: قطر گمانه برای تعداد نقاط اندازه‌گیری..... ۲۰
- جدول ۱-۳: انواع طرح اختلاط دوغاب برای کاربرد در دیواره پرده تزریق..... ۳۳
- جدول ۲-۳: طرح اختلاط دوغاب سیمان- بنتونیت..... ۳۳
- جدول ۳-۳: طرح اختلاط برای دوغاب سیمان- بنتونیت..... ۳۴
- جدول ۱-۴: ویژگی فیزیکی و شیمیایی سیمان مصرفی..... ۴۶
- جدول ۲-۴: ویژگی شیمیایی بنتونیت مصرفی..... ۴۷
- جدول ۳-۴: طرح اختلاط دوغاب سیمان- بنتونیت..... ۴۸
- جدول ۴-۴: نتایج به دست آمده از آزمایش تک‌محوره..... ۵۵
- جدول ۵-۴: طرح اختلاط استفاده شده در آزمون آزمایشگاهی..... ۵۶
- جدول ۱-۵: خواص مواد به کار رفته در مدل‌سازی..... ۷۵
- جدول ۲-۵: خواص مکانیکی به کار رفته در مدل رفتاری..... ۷۶
- جدول ۳-۵: مدول و نسبت طرح اختلاط پیشنهادی دوغاب پرکننده..... ۱۰۱

فصل اول

کلمات

۱-۱ مقدمه

عملیات اجرایی که در آن خواص مهندسی خاک یا سنگ مورد توجه باشد را در اصطلاح ساخت و اجرای ژئوتکنیکی می‌نامند. برای طراحی یکی سازه سطحی و زیرزمینی، تحمل پذیری زمین جهت نگهداری سازه باید در نظر گرفته شود. طراحی، ساخت و کارهای اجرایی ژئوتکنیکی با وسعت و تنوعی از مواد ناهمگن سروکار دارد که به صورت طبیعی به وجود آمده‌اند و می‌توان با روش‌های اصلاحی آنها را به وضعیت مناسبی درآورد. از آنجایی که مقادیر دقیق خواص مهندسی خاک و سنگ را نمی‌توان تعیین نمود، آزمایش‌های محلی یا آزمایشگاهی بر روی نمونه‌ها انجام می‌شوند تا مقادیر این خواص مهندسی به دست آیند، ولی این آزمایش‌ها فقط یک دامنه‌ای از مقادیر را تعیین می‌کنند.

اهمیت این مطلب را برای سازه ژئوتکنیکی می‌توان همچنین مقایسه با سازه‌های فولادی درک نمود. یک طرح سازه فولادی با مصالح مشخص و شناخته شده‌ای سروکار دارد که توسط سازنده کنترل و معین می‌شود. لذا چنانچه سازه فولادی طبق طرح اجرا شود معمولاً نیاز زیادی به اندازه‌گیری و رفتار سنجی محلی ندارد. این وضعیت برای سازه‌های بتن مسلح نیز می‌تواند صادق باشد ولیکن در مورد سازه‌های ژئوتکنیکی وضعیت متفاوت است. بدین معنی که طراحی و محاسبه بر اساس قضاوت مهندسی از دامنه محتمل‌ترین مقادیر خواص مهندسی خاک و سنگ استوار است.

از آنجایی که با مشاهده شرایط ژئوتکنیکی می‌توان در هر مرحله از پیشرفت کار اجرایی به اطلاعات با ارزشی دست یافت، لاجرم مشاهدات مهندسی در حین ساخت اجرای ژئوتکنیکی یک بخش جدایی‌ناپذیر از فرآیند طراحی بوده و با ابزارگذاری ژئوتکنیکی می‌توان به این مشاهدات کمک شایانی نمود. بنابراین مشاهده‌های مهندسی در یک پروژه ژئوتکنیکی جزئی از مراحل طراحی بوده و ابزارگذاری وسیله‌ای برای این هدف است که به منظور کنترل پایداری سازه‌ها در زمان ساخت و بهره‌برداری مورد استفاده قرار می‌گیرد.

بخشی از مجموعه ابزارهای مذکور مربوط به اندازه‌گیری تغییر شکل در زمین و سازه‌های ژئوتکنیکی ساخته شده بر روی آن می‌باشد. ابزارهای دقیق ژئوتکنیکی به طور گسترده‌ای به عنوان ابزار

مکمل جهت مطالعه و بررسی سازه‌های ساخت بشر به کار می‌روند.

ابزار دقیق بنا به تعریف به طیف وسیعی از ابزارهای اندازه‌گیری تغییر کمیت‌های فیزیکی و مکانیکی گفته می‌شود که در دوره‌های زمانی: قبل، حین و بعد از اجرای پروژه‌های ژئوتکنیکی ممکن است استفاده شوند، از آنجائی که با استفاده از انتخاب، نوع و جانمایی صحیح ابزارها در یک سازه می‌توان بروز پدیده‌ها و عوامل مخرب نظیر ایجاد ترک و جابجایی در سازه و فشار آب منفذی و کاهش تنش و ... را شناسایی کرد، لذا امروزه ابزارگذاری از اهمیت ویژه‌ای در کنترل پایداری و ایمنی سازه‌ها برخوردار است. حالت ایده‌آل در نصب ابزاردقیق حالتی است که ابزار با محیط اطراف سازگار باشد بطوری که نصب ابزار، تغییری در مقدار کمیت فیزیکی مورد اندازه‌گیری ایجاد نکند. سازگاری مناسب ابزاردقیق یکی از عوامل مؤثر در حصول دقت بالا است. این سازگاری در ابزارهای درون گمانه‌ای به دوغاب پرکننده بستگی دارد. دوغاب تزریقی باید به اندازه‌ای تغییرشکل پذیر باشد بطوری که از تغییرشکل خاک و سنگ جلوگیری نشود.

۲-۱- ضرورت انجام تحقیق

جهت اندازه‌گیری جابجایی‌های عمقی توده سنگ و خاک از کشیدگی سنج استفاده می‌گردد. کشیدگی سنج‌ها برحسب نوع قرارگیری در توده مصالح، به کشیدگی سنج مدفون و گمانه‌ای تقسیم‌بندی می‌شوند. کشیدگی سنج مدفون درون توده‌ای از مصالح به هنگام ساخت سازه قرار داده می‌شود. کشیدگی سنج گمانه‌ای نیز درون گمانه حفاری شده در سازه ژئوتکنیکی قرار می‌گیرد.

در ابزار کشیدگی سنج درون گمانه‌ای که برای اندازه‌گیری جابجایی در خاک و سنگ استفاده می‌شوند، فضای داخل گمانه با اختلاط دوغاب بنتونیت - سیمان پر می‌شود. در بسیاری از موارد اندازه‌گیری‌های قابل انتظار با نتایج داده‌های ابزاردقیق دارای اختلاف بوده و این اختلاف و خطا را می‌توان در اغلب موارد به عدم اتصال مناسب نقاط گیرداری و نوع و خواص دوغاب نسبت به محیط دربرگیرنده نسبت داد. در نتیجه مقادیر ثبت شده با جابجایی واقعی در مواردی اختلاف زیادی دارند. به‌طور کلی یکی از عوامل مؤثر در حصول دقت بالا در کار با ابزارهای دقیق، سازگاری یا تطابق مناسب

ابزار با محیط اطراف است که این سازگاری بین ابزارهای کشیدگی سنج و دوغاب تزریق محصورکننده باید به اندازه کافی تغییر شکل پذیر باشد به طوری که از تغییر شکل خاک و سنگ جلوگیری نشود. به همین جهت با توجه به افزایش روزافزون استفاده از ابزارهای دقیق در پروژه‌های ژئوتکنیکی کشور، عدم آگاهی از خطای حاصل از ناسازگاری و رعایت نکردن آن در نصب تجهیزات اندازه‌گیری منجر به نتایج ناصحیح و هدر رفتن سرمایه زیاد می‌گردد.

۳-۱ اهداف تحقیق

در این تحقیق با مطالعه آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار FLAC^{3D} به بررسی اندرکنش بین دوغاب و محیط اطراف گمانه پرداخته می‌شود. اهداف کلی که در این تحقیق دنبال می‌شود عبارتند از:

- تعیین خصوصیات مکانیکی نمونه‌های دوغابی با آزمون مقاومت فشاری تک محوره.
- بررسی تنش برشی سطح مشترک بین لوله نشست سنج و دوغاب با آزمون برون‌رانی^۱
- اثر نسبت مدول دوغاب به مدول خاک در تعیین خطای اندازه‌گیری ابزار کشیدگی سنج
- اثر چسبندگی سطح مشترک در خطای اندازه‌گیری
- اثر زاویه اصطکاک داخلی سطح مشترک در تعیین خطای اندازه‌گیری

۴-۱ روش تحقیق

مروری بر ادبیات گذشته نشان می‌دهد که به سازوکار اندازه‌گیری کشیدگی سنج‌های گمانه‌ای به‌خوبی پرداخته نشده و علاوه بر این به اثرات طرح اختلاط دوغاب بنتونیت – سیمان مورد استفاده برای پر کردن کشیدگی سنج‌های گمانه‌ای و تأثیر خواص دوغاب بر اندازه‌گیری توجه کافی نشده است. به همین منظور در این پژوهش تعدادی آزمون‌های آزمایشگاهی از قبیل مقاومت فشاری تک محوره و آزمون برون‌رانی با طرح اختلاط‌های مختلف دوغاب برای تعیین خواص مکانیکی انجام گرفته

^۱ Push out

و که این پارامترها برای تحلیل عددی تعیین شده است. با استفاده از مدل‌ها و پارامترهای به‌دست‌آمده از مطالعات آزمایشگاهی و به کمک نرم‌افزار عددی سه‌بعدی ژئوتکنیکی ($FLAC^{3D}$)، اندرکنش بین محیط دربرگیرنده ابزار و دوغاب و گیرداری ابزار مورد بررسی قرار گرفته است.

۵-۱ پیشینه تحقیق

اندرکنش بین سازه و خاک مسئله‌ای بحرانی در مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد. رفتار مکانیکی بین خاک و مصالح ساختمانی یکی از نگرانی‌های عمده در مسائل اندرکنش خاک - سازه می‌باشد. اتصال میان ابزار و خاک یا سنگ اطراف آن توسط مصالح پرکننده گمانه تأمین می‌گردد. با وجود آنکه مصالح نامناسب با سختی یا نرمی بیش از حد نسبت به زمین اطراف، می‌توانند بطور کلی اندازه‌گیری‌های صورت گرفته را تحت تأثیر قرار دهند، مصالح پرکننده گمانه موضوعی است که کمتر مورد توجه قرار گرفته است. تجربه نشان داده است دوغاب بنتونیت و سیمان مناسب‌ترین و اجرایی‌ترین مصالح پرکننده می‌باشد (Mikkelsen, 2002).

طبق نظر میکلسن (۲۰۰۲) در تهیه دوغاب برای مصارف آب بندی و استحکام توده‌های متخلخل بایستی نسبت آب به سیال دقیقاً کنترل گردد. به همین منظور برای ثابت ماندن نسبت آب به سیمان و همچنین کنترل مقاومت و مدول ترکیب دوغاب ابتدا آب با سیمان مخلوط شود. (Mikkelsen, 2002). ویل در سال ۱۹۹۷ نشان داد که مقاومت فشاری تک محوری مستقیماً تابع محتوای سیمان دوغاب و درصد اختلاط آن (w/c) می‌باشد که در آن درصد وزنی بنتونیت به صورت ثابت و در محدوده ۶٫۹ الی ۱٫۸ درصد قرار می‌گیرد. همچنین برای مدلسازی اختلاط، در محل یکسری آزمایشات آزمایشگاهی انجام داد تا طی آن تأثیر هیدراسیون بنتونیت و زمان اختلاط دوغاب بر مشخصات آن را تعیین نماید. نزدیک‌ترین نتیجه آزمایش در خصوص یکسان بودن مقاومت فشاری رس و دوغاب بنتونیت-سیمان زمانی حاصل گردید که بنتونیت کاملاً از قبل هیدراته شده و ۳۰ دقیقه برای اختلاط آن زمان صرف شده باشد. (Will, 1997).

آزمایش‌های برشی مستقیم اغلب به منظور مطالعه سطح مشترک سازه - خاک انجام شده است.

چندین عامل مثل مصالح سازه‌ای، خصوصیات خاک و زبری سطح برای درک بهتر اثرات آن‌ها روی مشخصه‌های سطوح تماس مورد بررسی قرار گرفته‌اند. (Potyondy, 1961).

یوزوگی و کشیدا (۱۹۸۶) دستگاه آزمایش برش ساده را برای مطالعه رفتار فصول مشترک بین چند نوع خاک و صفحه فلزی با زبری متفاوت بکار بردند کار جامع آن‌ها به این نتیجه رسید که زبری سطح تأثیر مهمی روی ضریب اصطکاک در هنگام جاری شدن دارد (Uesugi & Kishida, 1986).

۱-۶ ساختار پایان‌نامه

جهت سازمان‌دهی مجموعه اطلاعات جمع‌آوری شده و مطالعه‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی، پایان‌نامه در ۶ فصل تنظیم شده است. در فصل جاری به بیان موضوع و ضرورت انجام و اهداف تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل دوم خلاصه‌ای از مبانی نظری پژوهش شامل انواع ابزارهای کشیدگی سنج، کاربرد و نصب آنها بیان شده است. در فصل سوم نیز به سابقه پژوهش و کارهای مشابه آزمایشگاهی و عددی انجام شده در این زمینه پرداخته شده و نتایج آنها مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل چهارم به مطالعه‌های آزمایشگاهی اختصاص داده شده است که در آن وسایل و مراحل آزمایش بیان شده و نتیجه آن در پایان فصل ارائه شده است. در فصل پنجم نیز به مبنای مدل‌سازی عددی و هدف از انتخاب نوع نرم‌افزار و معرفی آن ارائه شده است. سپس مراحل مدل‌سازی عددی بیان شده و در پایان به بررسی و تحلیل نتایج خروجی نرم‌افزار پرداخته شده است. در فصل ششم نیز جمع‌بندی و نتیجه‌گیری و پیشنهاد از پژوهش انجام شده در نظر گرفته شده است.

فصل دوم

ابزارهای کشیدگی

۲-۱ مقدمه

اندازه‌گیری جابجایی سطحی و عمقی توده سنگ یا مصالح خاکی از بهترین روش‌های کنترل و نظارت بر رفتار سازه ژئوتکنیکی است. انواع ابزارهای ژئوتکنیکی برای این منظور وجود دارند که شامل کشیدگی سنج‌ها^۱، نشست سنج‌ها^۲، شیب‌سنج‌ها^۳، پاندول‌ها^۴ هستند که در این فصل با توجه به موضوع پژوهش، ابزارهای درون گمانه‌ای شامل انواع کشیدگی سنج‌ها توضیح داده و کاربردها و مراحل نصب آنها بیان می‌شود.

۲-۲ کشیدگی سنج

کشیدگی سنج‌ها ابزاری هستند که برای اندازه‌گیری جابجایی‌های سطحی و عمقی توده مصالح به کار می‌روند. کشیدگی سنج‌ها بسته به تعداد نقاط اندازه‌گیری، به انواع تک نقطه‌ای (SP^۵) و چند نقطه‌ای (MP^۶) تقسیم می‌شوند. همچنین برحسب نوع قرارگیری آن در خاک یا سنگ به کشیدگی سنج گمانه‌ای^۷ و مدفون^۸ تقسیم بندی می‌شوند. کشیدگی سنج گمانه‌ای درون گمانه حفاری شده در سازه ژئوتکنیکی قرار می‌گیرد و کشیدگی سنج مدفون نیز درون توده‌ای از مصالح خاکی به هنگام اجرای خاکریز قرار داده می‌شوند. انتخاب نوع کشیدگی سنج بر اساس رفتار نگاری مصالح دربرگیرنده نوع پروژه انجام می‌شود. کشیدگی سنج‌های گمانه‌ای به دو گروه کشیدگی سنج پروب دار^۹ و کشیدگی سنج گمانه‌ای ثابت^{۱۰} دسته‌بندی می‌شوند (Dunnicliff, 1993).

^۱ Extensometer

^۲ Inclinator

^۳ Tilt meter

^۴ Pendulum

^۵ Single Point

^۶ Multi-Point

^۷ Borehole Extensometer

^۸ Embedded Extensometer

^۹ Probe extensometer

^{۱۰} Fixed Borehole Extensometers

۲-۳ کشیدگی سنج پروب‌دار

کشیدگی سنج پروب‌دار ابزاری است که برای رفتار نگاری تغییرات فاصله بین دو یا چند نقطه در طول یک محور چال با استفاده از پروب اندازه‌گیری به کار می‌رود. نقاط گیرداری در طول لوله راهنما به صورت مکانیکی و الکتریکی یا مغناطیسی توسط پروب مشخص و فاصله بین آن‌ها با اندازه‌گیری موقعیت پروب تعیین می‌شود. برای تعیین اطلاعات تغییر مکان مطلق، باید یکی از نقاط اندازه‌گیری در مکانی باشد که تحت تأثیر تغییر مکان قرار نگیرد یا مکان آن با استفاده از یک نقطه مبنا با روش نقشه‌برداری قابل اندازه‌گیری باشد. لوله راهنما ممکن است برای اندازه‌گیری نشست یا بالاآمدگی، به‌طور قائم و یا برای اندازه‌گیری تغییر مکان ثانویه، افقی یا مایل نصب شود. از کاربردهای رایج کشیدگی سنج پروب‌دار، رفتار نگاری فشردگی قائم در داخل توده‌های خاکی یا پی، نشست در طول حفاری‌های زیرزمینی، بالاآمدگی در کف حفاری‌های روباز و تغییر شکل‌های ثانویه در خاکریزها است. در شرایطی که محدودیت تعداد نقاط اندازه‌گیری در کشیدگی سنج درون گمانه‌ای ثابت وجود داشته باشد معمولاً کشیدگی سنج پروب‌دار توصیه می‌شود. در این روش مجموع هزینه‌های نصب و قرائت در طولانی مدت، کمینه می‌شود، اما معمولاً اندازه‌گیری دقت کمتری نسبت به اندازه‌گیری‌های کشیدگی سنج ثابت درون گمانه‌ای دارد (Dunnicliff, 1993).

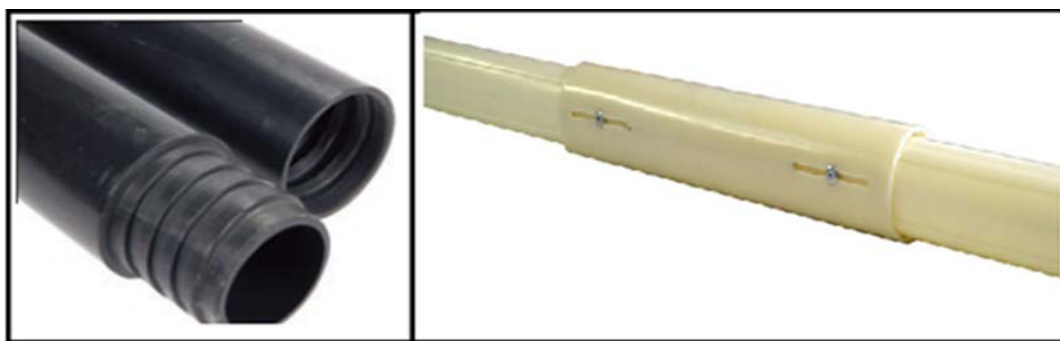
۲-۳-۱ اجزا کشیدگی سنج پروب‌دار مغناطیسی

اجزای کشیدگی سنج مغناطیسی شامل لوله دسترسی، مغناطیس مبنا، حلقه‌ها و صفحات مغناطیسی است که هریک در ادامه توضیح داده می‌شود (Slope Indicator Company, 2017).

۲-۳-۱-۱ لوله دسترسی

لوله دسترسی در سه اندازه یک اینچی، لوله PVC با اتصال کوپلی و لوله جداری انحراف سنج ۲/۷۵ یا ۳/۳۴ اینچی موجود است. برای اتصال لوله‌های دسترسی از اتصالات تلسکوپی استفاده می‌شود. این اتصالات تغییر طول در محل اتصال دو لوله را امکان‌پذیر می‌سازد، این تغییر طول به‌صورت لغزش دو لوله و پرچ‌های آن در راستای شیار کوپلینگ انجام می‌گیرد. طول این شیارها

معمولاً ۱۰ سانتیمتر است و با توجه به دو شیار موجود در سر هر کوپلینگ، امکان تغییر طول حداکثر ۲۰ سانتیمتر برای هر اتصال وجود دارد معمولاً زمانی که نشست بیش از ۲ یا ۳ درصد باشد مقطع تلسکوپی مورد نیاز خواهد بود. در شکل ۱-۲ دو نوع از اتصال لوله‌های دسترسی به هم نشان داده شده است.



(ب) اتصال ساده

(الف) اتصال تلسکوپی

شکل ۱-۲: انواع اتصال لوله دسترسی (الف) اتصال تلسکوپی، (ب) اتصال ساده (Slope Indicator Company, 2017).

۲-۱-۳-۲ مغناطیس مبنا^۱

مغناطیس مبنا زمانی که کف لوله در زمین پایداری قرار گیرد استفاده می‌شود و شامل خود آهن‌ربا و دو حلقه نگه‌دارنده است. مغناطیس مبنا معمولاً حداقل ۰/۵ متر بالاتر از کف لوله نصب می‌شود.

۲-۱-۳-۲ حلقه مغناطیسی عنکبوتی^۲

حلقه مغناطیسی عنکبوتی که به دلیل شاخک‌ها و پایه‌ها، عنکبوتی نامیده می‌شود، در درون گمانه‌ها استفاده می‌شود. پایه‌ها برای نصب فشرده می‌شوند و زمانی که آهن‌ربا در عمق مشخص قرار می‌گیرد رها می‌شوند. آهن‌ربای عنکبوتی معمولاً به لوله دسترسی متصل شده و با لوله نصب می‌شوند. در شکل ۲-۲ نمونه‌ای از حلقه مغناطیسی عنکبوتی نشان داده شده است.

^۱ Datum Magnet

^۲ Spider Magnet

۲-۳-۱-۴ صفحه مغناطیسی^۱

صفحه مغناطیسی که در خاکریز استفاده می‌شود یک سطح عریض تری برای اتصال با خاک را فراهم می‌کند که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲: حلقه مغناطیسی عنکبوتی و صفحه‌ای و پروب اندازه‌گیری (Slope Indicator Company, 2017).

۲-۳-۲ نصب و قرائت کشیدگی سنج‌های مغناطیسی

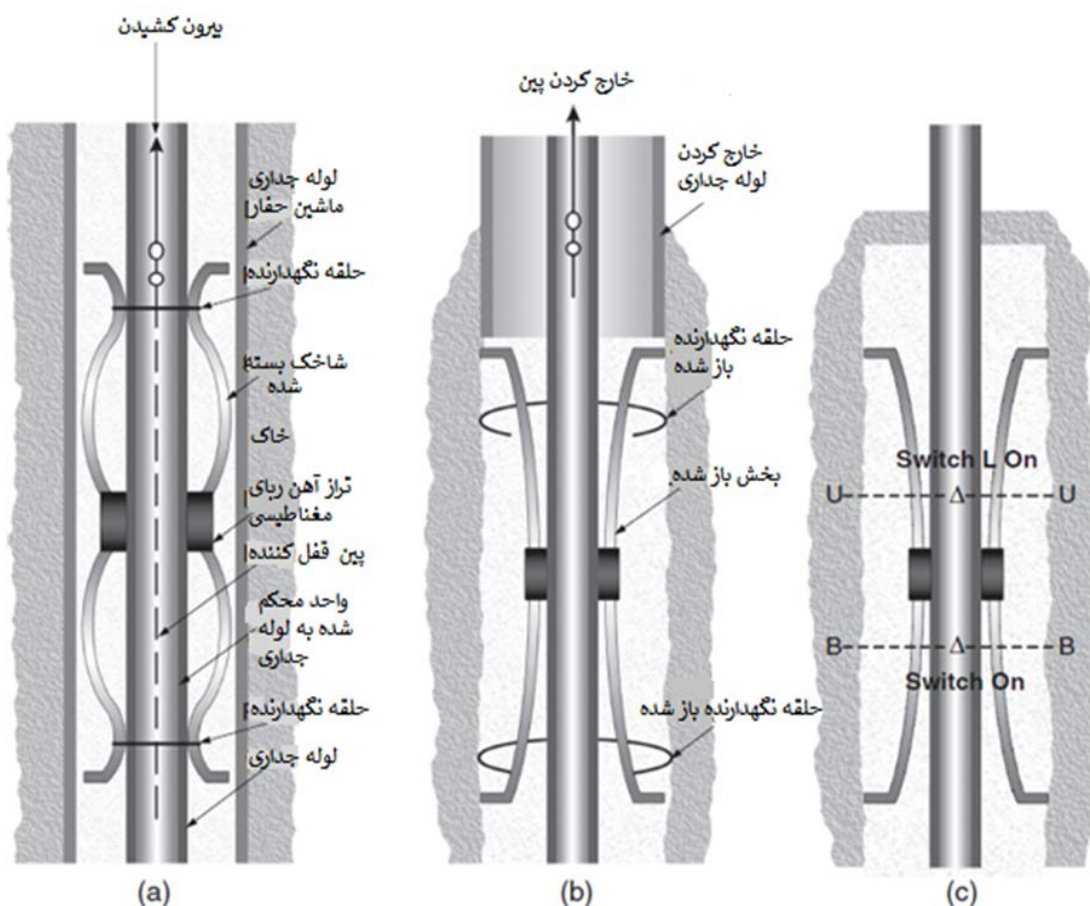
همان‌طور که ذکر شده نقاط هدف مغناطیسی به دو صورت هدف‌های فنری^۲ و بشقابک‌ها/صفحات مغناطیسی می‌باشند. نقاط هدف فنری شامل یک حلقه مغناطیسی به همراه سه یا شش پایه است که به صورت فنری باز شده و در دیواره گمانه درگیر می‌شوند. برای این منظور قبل از فرستادن لوله و نقاط هدف فنری به داخل گمانه، شاخک‌ها و پایه‌های فنری توسط تسمه یا نوارچسب فشرده و بسته می‌شوند. بعد از قرار دادن لوله و نقاط هدف فنری در داخل گمانه، قبل از تزریق دوغاب بنتونیت - سیمان با کشیدن طناب متصل به تسمه گره آن را باز می‌کنند. بدین ترتیب شاخک‌ها و پایه‌های فنری آن از هم باز شده و به جدار داخلی گمانه درگیر می‌شود. در شکل ۳-۲ توالی نصب نشان داده

^۱ Magnetic Plate

^۲ Spring Targets

شده است.

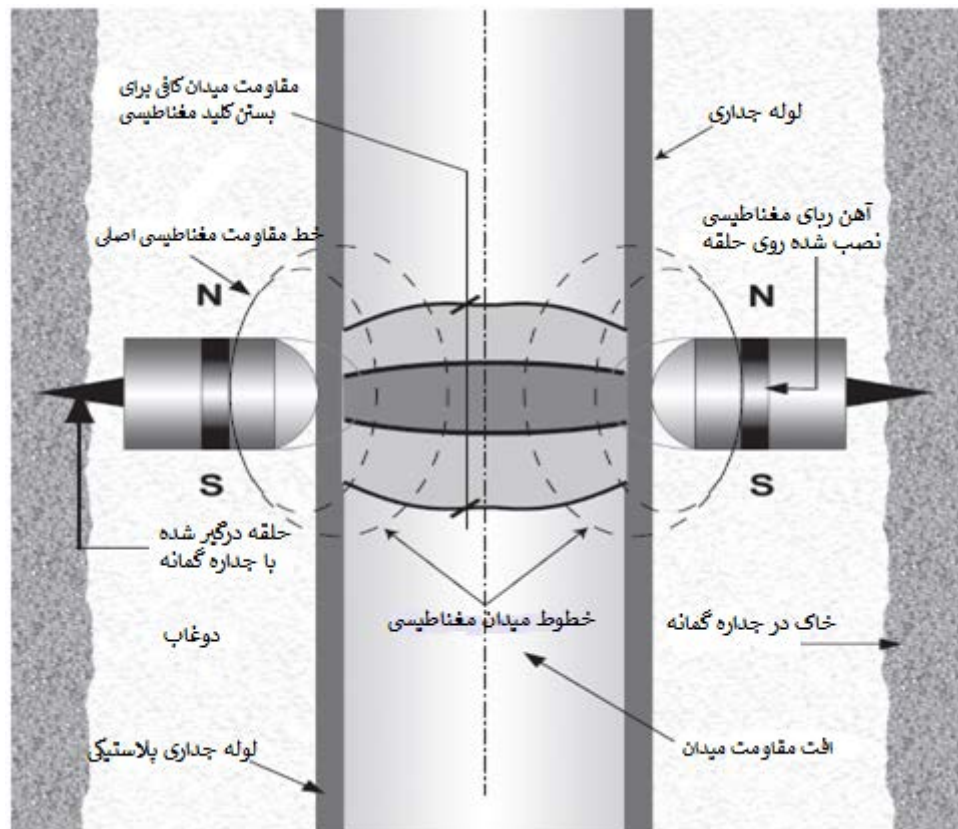
بشقاب‌های مغناطیسی که اشاره شد برای نصب در خاکریز مورد استفاده قرار می‌گیرند. بدین ترتیب که با بالا آمدن سطح خاکریز به ازای هر یک لوله که به مجموع لوله‌ها اضافه می‌گردد، یک بشقاب که دارای یک حلقه مغناطیس در داخل آن است، در تراز مورد نظر در پیرامون لوله قرار می‌گیرد. این بشقاب و حلقه داخلی آن هیچ اتصالی با جدار لوله نداشته و آزادانه همراه با نقطه نشانه فنی برای اندازه‌گیری نشست در درون گمانه نمونه ساخته شده توسط مصالح پوشاننده آن جابجا می‌شود (Slope Indicator Company, 2017).



شکل ۲-۳: نصب سیستم آهن‌ربای عنکبوتی بیرون لوله انحراف سنج (Bassett, 2011).

قرائت‌ها با فرستادن پروب اندازه‌گیری از لوله دسترسی به منظور پیدا کردن عمق حلقه مغناطیسی به دست می‌آید. کلیدهای الکتریکی حساس مغناطیسی در پروب قرار دارند که به شکل یک مدار الکتریکی در یک مغناطیس بسیار ضعیف بسته می‌شود. هنگامی که پروب، وارد میدان مغناطیسی

می‌شود کلید بسته می‌شود و باعث روشن شدن چراغ و فعال شدن صدای زنگ می‌گردد. در شکل ۴-۲ میدان مغناطیسی که توسط آهن‌رباهای مغناطیسی به وجود می‌آید به خوبی نشان داده شده است (Bassett, 2011).



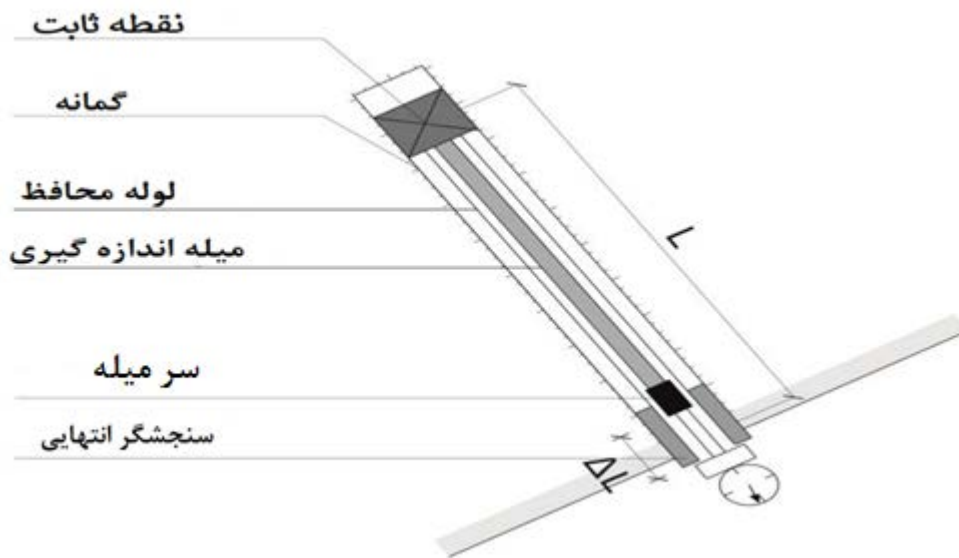
شکل ۴-۲: میدان مغناطیسی در لوله نشست سنج (Bassett, 2011).

۴-۲ کشیدگی سنج گمانه‌ای ثابت

این نوع کشیدگی سنج در خاک یا سنگ نصب می‌گردد تا تغییر فاصله نسبی بین دو یا چند نقطه در طول محور گمانه را بدون استفاده از پروب، اندازه‌گیری نماید. هرگاه موقعیت هریک از نقاط اندازه‌گیری نسبت به یک نقطه مبنا معین باشد، می‌توان تغییر مکان مطلق را نیز با استفاده از این ابزار به دست آورد. این جابجایی‌های نسبی را می‌توان با استفاده از یک سنجشگر جابجایی عقربه‌ای، سنجشگر جابجایی دیجیتالی یا یک مبدل جابجایی تار مرتعش^۱ (VWDT) اندازه گرفته شود (Soil

^۱ Vibrating Wire Displacement Transducer

(Instruments Ltd, 2017). از مهم‌ترین کاربردهای این ابزار، رفتارنگاری تغییر مکان‌های توده سنگ پیرامون فضا‌های زیرزمینی و سطوح شیب‌دار است. به‌علاوه این ابزار برای رفتار نگاری نشست‌های ناشی از متراکم شدن خاک، بالآمدگی کف در حفاری‌های روباز نیز استفاده می‌شود. اساس عملکرد کشیدگی سنج‌های گمانه‌ای ثابت در شکل ۵-۲ نشان داده شده است (Dunncliff, 1993).



شکل ۵-۲: کشیدگی سنج گمانه‌ای ثابت تک نقطه‌ای (Wulf, 2014).

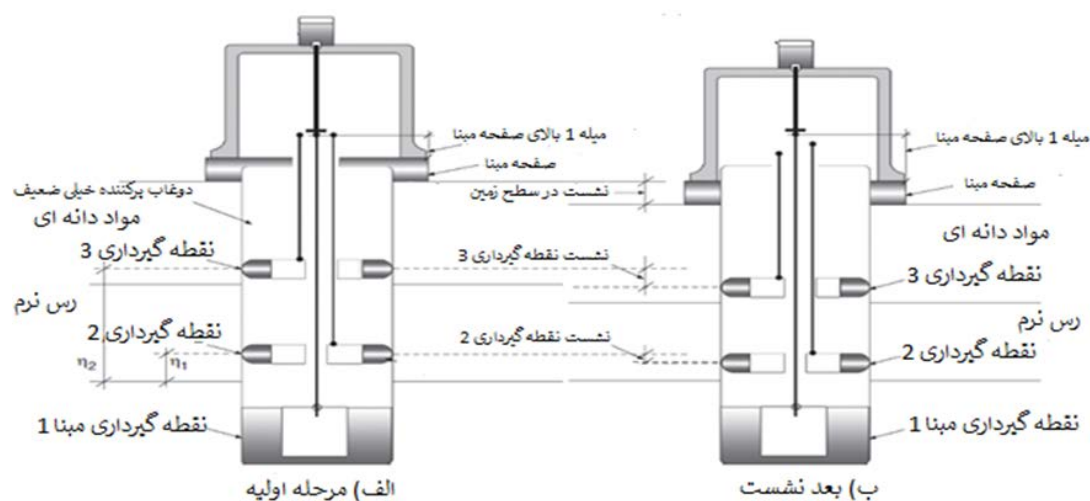
تغییر فاصله نقاط اندازه‌گیری از سر کشیدگی سنج به‌وسیله یک رابط که یک سر آنها به نقاط ثابت و سر دیگر آنها در نزدیکی سر ابزار است. با استفاده از ابزارهای مکانیکی یا ترانسدیوسرهای الکتریکی، اندازه‌گیری می‌شود. می‌توان چندین نقطه درگیر در یک گمانه تعبیه کرد که هر یک به‌وسیله رابطی به قسمت سر گمانه ارتباط پیدا می‌کنند. در این حالت یک کشیدگی سنج چند نقطه‌ای به وجود می‌آید. کشیدگی سنج‌های چند نقطه‌ای برای رفتار نگاری تغییر مکان یا الگوی کرنش در طول محور گمانه به کار می‌رود. یک کشیدگی سنج چند نقطه‌ای معادل چند کشیدگی سنج تک نقطه‌ای است که در نزدیکی همدیگر نصب شده‌اند (Dunncliff, 1993). کشیدگی سنج‌های ثابت درون گمانه‌ای برحسب نوع سیستم مبدل جابجایی به دو گروه میله‌ای و سیمی تقسیم‌بندی می‌شوند.

در کشیدگی سنج میله‌ای، عضو انتقال‌دهنده جابجایی نقطه درگیر به سر کشیدگی سنج یک میله نازک است. این میله در انتهای خود به یکی از روش‌های دوغابی، گوه‌ای، هیدرولیکی در داخل گمانه

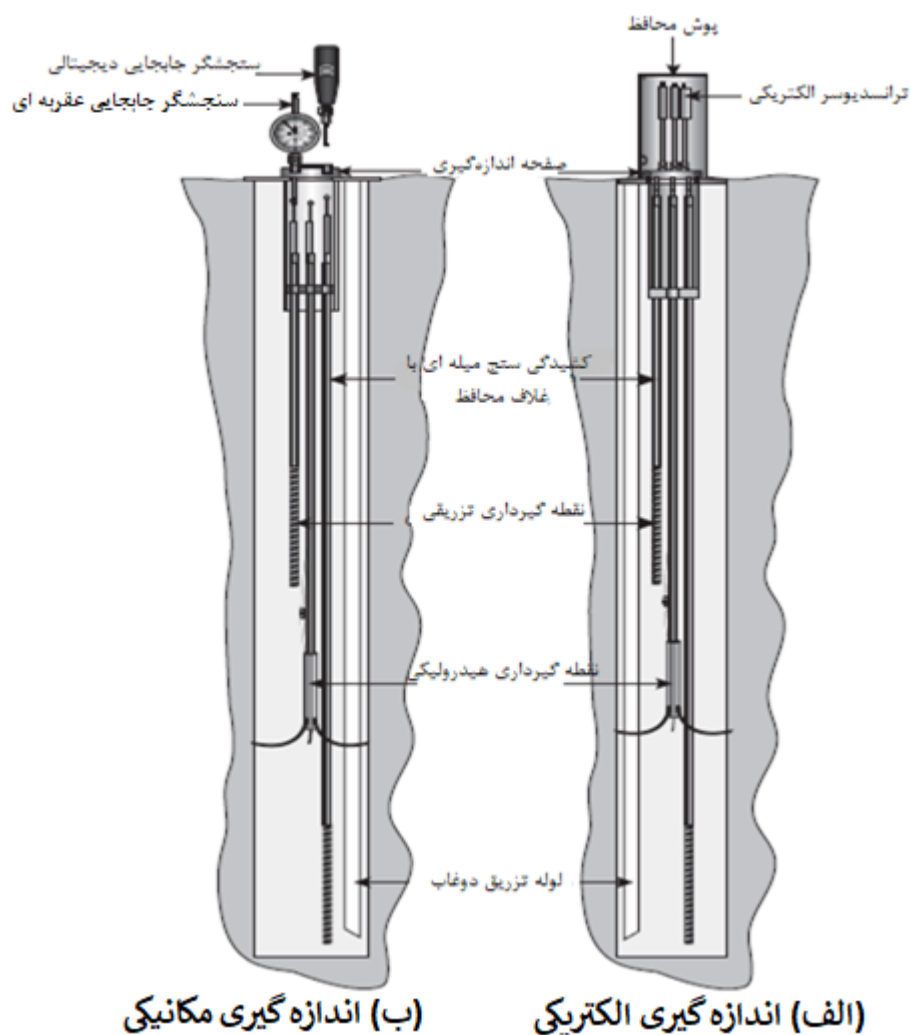
گیردار می‌شوند. قطر میله‌ها بین ۵ تا ۱۳ میلی‌متر و جنس آن می‌تواند از فولاد معمولی، فولاد ضدزنگ، آلیاژ آلومینیوم و فایبرگلاس و مواد غیرقابل انبساط باشند (Dunnicliff, 1993).

سیستم کشیدگی سنج میله‌ای دقیق و نصب و قرائت آن نسبتاً ساده است. این ابزار می‌تواند در همه جهات با اندازه‌گیری طول‌هایی تا ۱۰۰ متر، بسته به تعداد میله‌ها، در قطرهای ۳۸-۱۰۱ میلی‌متر نصب شوند (Soil Instruments Ltd, 2017). کشیدگی سنج میله‌ای چند نقطه‌ای می‌تواند تا هشت نقطه اندازه‌گیری داشته باشند و قطر میله‌ها در این نوع کشیدگی سنج نسبتاً کمتر است. این کشیدگی سنج در گمانه‌هایی تا عمق ۴۵ متر عملکرد موفقی داشته است. افزایش عمق چال، مشکل انحراف آن را به همراه دارد به‌علاوه احتمال برخورد و اصطکاک میله‌ها با افزایش عمق و تعداد آنها بیشتر شده که این از عوامل مهم بروز خطا در استفاده از این ابزار است (ASTM D4403-84, 1996).

معمولاً برای اندازه‌گیری، یکی از میله‌ها باید در ناحیه بدون جابجایی و ثابت گیردار شود، که به‌عنوان ناحیه مبنا در نظر گرفته می‌شود. به‌صورت نمونه سیستم اندازه‌گیری نشست با استفاده از کشیدگی-سنج میله‌ای به‌طور نمایشی در شکل ۲-۶ نشان داده شده است. میله‌های تکی که به‌صورت ایده آل در شکل ۲-۷ (الف) نشان داده شده است می‌توانند با تعدادی از روش‌هایی از جمله مسدودکننده حلقه‌ای سیمانی-دوگابی فشار بالا در گمانه‌ای که بقیه آن با بنتونیت/سیمان ضعیفی پر می‌شود قرار گیرند. یا با هر انسداد گیردار مکانیکی در چالی که تزریق شده، در پایین‌ترین حد خود نصب شوند. جزئیات دستگاه و اجزای آن در شکل ۲-۷ نشان داده شده است (Bassett, 2011).



شکل ۲-۶: اندازه‌گیری نشست با استفاده از کشیدگی سنج میله‌ای (Bassett, 2011).



شکل ۲-۷: سیستم کشیدگی سنج میله‌ای (الف) اندازه‌گیری الکتریکی، (ب) اندازه‌گیری مکانیکی و دستی (Bassett, 2011).

۲-۴-۱ اجزای کشیدگی سنج میله‌ای

کشیدگی سنج های میله ای از اجزاهای مختلفی تشکیل شده است. اجزای اصلی این نوع کشیدگی سنج در ادامه توضیح داده خواهد شد.

۲-۴-۱-۱ درپوش مرجع

اندازه‌گیری‌ها در سر مرجع انجام می‌شوند. سرهای مرجع مکانیکی می‌تواند در هنگامی که دسترسی به کشیدگی سنج آسان باشد استفاده شوند. اندازه‌گیری‌ها با یک میکرومتر عمق سنج انجام می‌شود. سرهای مرجع الکتریکی دارای سنسورهای می‌باشند و موقعی که دسترسی به سرهای مرجع مشکل یا جایی که نظارت پیوسته مورد نیاز باشد استفاده می‌شوند. در این مورد اندازه‌گیری با سنسورهای جابجایی و یک بازخوانی یا ثبت کننده اطلاعات به دست می‌آید.

۲-۴-۱-۲ مفصل تلسکوپی

یک مفصل تلسکوپی بین درپوش مرجع و بالای میله قرار می‌گیرد که اجازه تنظیم در موقعیت‌هایی از درپوش مرجع را می‌دهد.

۲-۴-۱-۳ میله‌ها

میله‌ها از فایبرگلاس یا فولاد ضدزنگ ساخته می‌شوند. کشیدگی سنج‌های میله‌ای فایبرگلاس در کارخانه مونتاژ می‌شوند و به محل برای نصب حمل می‌شوند. انعطاف‌پذیری این کشیدگی سنج‌ها باعث نصب راحت‌تر آن‌ها در مناطق محدود مثل تونل‌ها می‌شود. کشیدگی سنج‌های میله‌ای فولادی ضدزنگ باید در محل مونتاژ شوند با این حال میله‌های صلب‌تر آن‌ها می‌تواند برای گیرداری اعماق عمیق‌تر مورد استفاده قرار گیرد. در جدول ۱-۲ حداکثر طول پیشنهاد شده برای میله‌ای فولادی و فایبرگلاس پیشنهاد شده است (Slope Indicator Company, 2017).

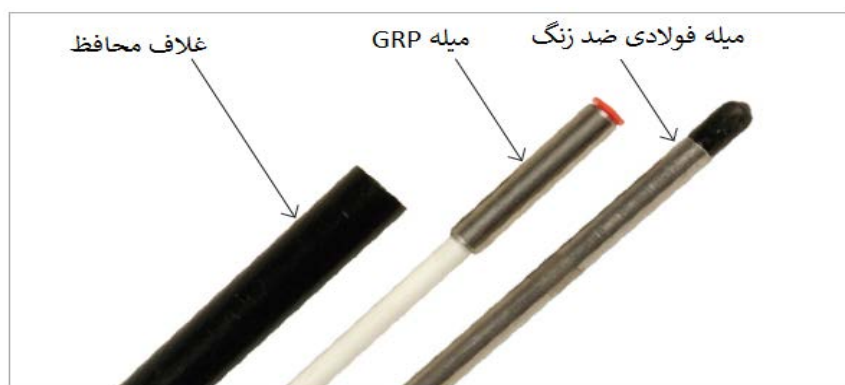
جدول ۱-۲: حداکثر طول میله‌های کشیدگی سنج در حالت کششی و فشاری (Slope Indicator).

Company, 2017)

حداکثر طول میله‌ها: کششی / فشاری		
جهت	فایبرگلاس	فولاد
قائم روبه پایین	۱۵ / ۲۰ متر	۳۰ / ۴۰ متر
قائم روبه بالا	۳۰ / ۴۵ متر	۴۵ / ۶۰ متر
۴۵ درجه روبه پایین	۲۰ / ۲۵ متر	۳۰ / ۴۰ متر
۴۵ درجه روبه بالا	۲۵ / ۳۵ متر	۴۰ / ۵۵ متر
افقی	۲۰ / ۳۵ متر	۳۰ / ۴۵ متر

۲-۴-۱-۴ لوله محافظ

میله‌های فایبرگلاس در طول‌های پیوسته‌ای از لوله‌های پلاستیکی و میله‌های فولادی نیز در لوله‌های پلاستیکی به طول‌های ۱۰ فوت پوشانده می‌شوند.



شکل ۲-۸: میله فولادی و لوله محافظ کشیدگی سنج‌های میله‌ای (Soil Instruments Ltd, 2017).

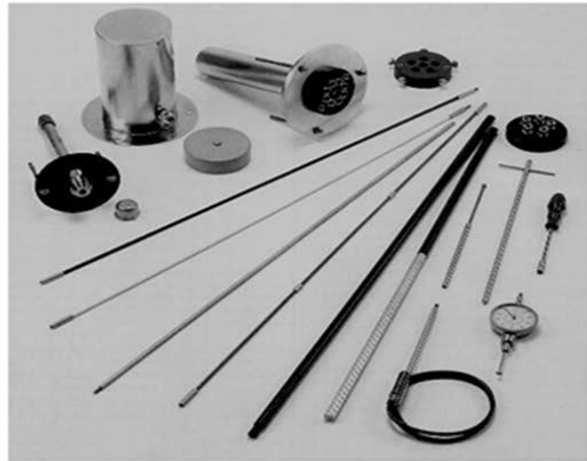
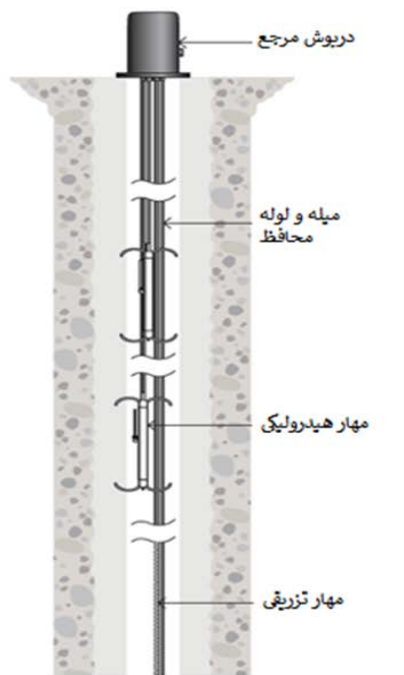
۲-۴-۱-۵ مهار^۱

مهاریا به‌منظور سازگاری با شرایط محیطی انتخاب می‌شوند. مهاریا تزریقی برای سنگ و مهاریا هیدرولیکی برای خاک و مهاریا مسدودکننده^۲ هم برای سنگ و یا خاک مناسب هستند. مهار مسدودکننده مخصوصاً در سنگ‌های درزه‌دار یا خاک‌های بدون چسبندگی یا جایی که جریان

^۱ Anchor

^۲ packer

آب وجود دارد مناسب است.



شکل ۲-۹: اجزای کشیدگی سنج میله‌ای (Soil Instruments Ltd, 2017).

همچنین در جدول ۲-۳ مشخصات اجزای کشیدگی سنج‌های میله‌ای ساخت شرکت (Soil Instruments Ltd جمع آوری شده است.

جدول ۲-۴: مشخصات اجزای کشیدگی سنج میله‌ای (Soil Instruments Ltd, 2017).

سیستم قرائت	سنجشگر جابجایی		نوع
	عقربه‌ای		بازه
	۰/۰۱ mm		دقت
میله	فایبرگلاس		جنس
	۶ mm		قطر
	۱ m, ۲ m, ۳m,		طول
	۸ (دستی)/ ۶ (کنترل از دور)		حداکثر تعداد میله

ادامه جدول ۲-۲

نوع	تزریقی	هیدرولیکی (تکی یا دوتایی)
جنس	گالوانیزه	فولاد
قطر	۱۶ mm	۳۲ mm
طول	۵۴۰ mm	۴۵۰ mm تکی و ۸۲۰ mm دوتایی
قطر گمانه	-	۷۵ mm, ۱۰۰-۲۰۰ mm,
حداکثر تعداد نقاط گیرداری	۸	
جنس	PVC	
طول	۱ m, ۲ m, ۳ m,	
قطر داخلی	۹/۶ mm	
قطر بیرونی	۱۶/۷ mm	

۲-۴-۲ تعداد نقاط اندازه‌گیری کشیدگی سنج میله ای

کشیدگی سنج‌های میله‌ای می‌توانند بیش از ۶ نقطه نصب شوند. در عمل تعداد نقاط اندازه‌گیری با اندازه گمانه، نوع و تعداد نقطه گیرداری مورد استفاده، قطر لوله محافظ و ... محدود می‌شود. جدول ۳-۲ قطر گمانه مورد نیاز را نشان می‌دهد (Slope Indicator Company, 2017).

جدول ۳-۲: قطر گمانه برای تعداد نقاط اندازه‌گیری (Slope Indicator Company, 2017).

نقاط کنترلی	قطر گمانه	
۱ تا ۶ نقطه گیرداری تزریقی یا هیدرولیکی، ۱ تا ۳ نقطه گیرداری مسدود کننده	۷۶ میلی‌متر	۳ اینچ
۴ نقطه گیرداری مسدود کننده	۱۰۱ میلی‌متر	۴ اینچ

۵ اینچ	۱۲۶ میلی متر	۶ نقطه گیرداری مسدود کننده
--------	--------------	----------------------------

۲-۴-۳ نصب کشیدگی سنج‌های میله‌ای

جزئیات نصب معمولاً توسط نیازهای محل مشخص می‌شوند. با این وجود مراحل به صورت کلی در زیر توضیح داده می‌شود: (Slope Indicator Company, 2017).

۲-۴-۳-۱ شرایط لازم گمانه

کشیدگی سنج‌های میله‌ای متناسب با اینکه چند نقطه‌ای باشند برای گمانه‌هایی با قطر ۶۰ تا ۹۰ میلی متری (۲/۴ تا ۳/۸ اینچ) و بیشتر طراحی می‌شوند. گمانه باید حدود ۱ متر (۳ فوت) عمیق تر از عمیق ترین نقطه گیرداری حفاری شود.

۲-۴-۳-۲ مونتاژ

کشیدگی سنج‌های میله‌ای فایبرگلاس از پیش مونتاژ می‌شوند، بنابراین هیچ محل مونتاژی مورد نیاز نخواهد بود. کشیدگی سنج‌های میله‌ای فولادی ضدزنگ باید در محل اتصال داده شده و به طور کامل کشیدگی سنج (به غیر از حسگرها) بر روی هم قرار داده شوند و لوله‌های تزریق آماده می‌گردد. در صورتی که فضای کافی برای نصب ابزار در فضای آزاد نباشد، نصب میله‌ها بر روی هم، به طور همزمان همراه با نصب آن‌ها در گمانه انجام می‌گیرد، ولی باید دقت شود که میله‌ها دچار کمانش نشوند. در بعضی موارد نصب هر میله و مهار به طور جداگانه امکان پذیر بوده و از عمیق ترین مهارها شروع می‌شود. لوله‌های تزریق نیز به مهارها متصل می‌گردند. در تمام موارد از طنابی جهت اطمینان از عدم افتادن میله‌ها درون گمانه به مهارها استفاده می‌شود.

۲-۴-۳-۳ تزریق

بالای گمانه و محل ابزارگذاری را مشخص، و با محفظه‌ای محافظت شده و بعد از اطمینان از نصب میله‌ها از طرح اختلاط‌های دوغاب مشخص شده برای تزریق استفاده می‌شود. هنگام استفاده و تزریق از لوله‌های بلند پلی اتیلن ابتدا برای حداقل کردن اصطکاک لوله، با پمپ آب شسته می‌شود. در پایان

عملیات تزریق و پایداری آن‌ها، حسگرها را جاگذاری نموده و قرائت اولیه انجام داده می‌شود.

۲-۵ انحراف سنج

انحراف سنج ابزاری است درون گمانه‌ای که برای اندازه‌گیری تغییر شکل جانبی و جابجایی‌های افقی درون گمانه استفاده می‌شود. این ابزار انحراف را در جهت عمود بر راستای گمانه (قائم، افقی یا مایل) اندازه‌گیری می‌کند و سپس به کمک توابع مثلثاتی می‌توان انحراف و زاویه تمایل را به جابجایی تبدیل نمود. این ابزار از یک جعبه کنترل کننده و یک پروب متصل به کابل تشکیل شده است. پروب در درون لوله راهنمای قابل انعطاف به پایین گمانه فرستاده می‌شود. پروب لغزنده در لوله راهنمای قابل انعطاف، که دارای چهار شیار داخلی با زوایای ۹۰ درجه نسبت به هم است، هدایت شده و زاویه انحراف لوله را هر نیم متر اندازه‌گیری می‌کند. لوله‌های انحراف سنج معمولاً از جنس ^۱ABS به طول ۳-۱/۵ متر است. قطر معمول این لوله‌ها ۷۰ میلی‌متر بوده ولی لوله‌هایی با قطرهای ۴۸، ۶۰، ۶۵ و ۸۵ میلی‌متر هم وجود دارند. لوله راهنما ممکن است درون گمانه حفاری شده و یا در پشته‌های خاکی حین عملیات خاکریزی نصب شود. به علاوه در بیشتر موارد راستای لوله در جهت قائم است که در این شرایط انحراف سنج داده‌هایی را فراهم می‌آورد که معرف تغییر شکل افقی است.

به‌طور کلی انحراف سنج‌ها از چهار قسمت اصلی تشکیل می‌شوند: (Slope Indicator Company, 2017)

- ۱- لوله راهنما از جنس پلاستیک، آلومینیوم، فایبرگلاس یا ABS ساخته می‌شوند.
- ۲- پروب قابل حمل دارای چرخ‌های فنری که حامل ترانس‌دیوسر حسگر اندازه‌گیری شیب و انحراف است.

۳- دستگاه قرائت کننده قابل حمل برای قرائت و ذخیره داده‌های اندازه‌گیری

۴- کابل الکتریکی مدرج به نشانگرهای نیم متری برای اتصال پروب به قرائت کننده

پروب شامل یک یا دو مبدل حساس است که میزان انحراف را نسبت به حالت قائم و یا افقی در دو

^۱ Acrylonitrile-Butadiene-Styrene

جهت اندازه‌گیری می‌کند. بدنه پروپ به‌صورت آب‌بند و از جنس فولاد ضدزنگ ساخته شده و مقاوم در برابر ضربه است. پروپ انحراف سنج دارای دو جفت چرخ فنری به فاصله ۵۰ سانتی‌متری از هم بوده که به آن این امکان را می‌دهد که در درون شیپارهای داخلی که در زوایای ۹۰ درجه از هم در لوله راهنمای قابل انعطاف قرار دارند، چفت شده و بدون لغزش در طول لوله حرکت کند. برای کار، پروپ را در داخل شیپارهای لوله انحراف سنج قرار داده و همزمان با بالا آوردن از انتهای آن، داده‌های اندازه‌گیری توسط کابل اتصال از پروپ به لاگر انحراف سنج منتقل شده و این دستگاه میزان تغییر شکل‌های افقی (در صورت نصب قائم لوله‌ها) در فواصل مشخص را اندازه‌گیری کرده و به‌صورت دیجیتال نشان داده و ثبت می‌کند (Dunncliff, 1993).



شکل ۲-۱: طرح کلی انحراف سنج و عملکرد آن (Dunncliff, 1993).

۲-۶ ابزار ترکیبی انحراف سنج - نشست سنج

امروزه برای اندازه‌گیری جابجایی‌های افقی و قائم توده سنگ و خاک از ابزار تلفیقی انحراف سنج - نشست سنج استفاده می‌شود که با نصب حلقه و یا صفحات مغناطیسی به لوله انحراف سنج همزمان با تغییر شکل افقی، نشست قائم محیط دربرگیرنده لوله راهنما نیز اندازه‌گیری می‌شود. که در این صورت سیستم به کار رفته را انحراف سنج - نشست سنج می‌نامند (Slope Indicator Company, 2017).

۲-۷ نصب انحراف سنج - نشست سنج درون گمانه‌ای

مراحل نصب سیستم ترکیبی انحراف سنج - نشست سنج در زیر شرح داده شده است:

- حفر گمانه با قطر مناسب، متناسب با قطر لوله راهنما و قطر حلقه مغناطیسی انجام می‌گیرد.
- ضروری است که چند متر انتهای گمانه در سنگ بکر بستر و یا فونداسیون سازه جهت نصب حلقه‌های مغناطیسی مبنا حفاری شده باشد.
- کنترل کردن عمق گمانه و موقعیت نصب انحراف سنج، با توجه به تراز نصب بعد از اتمام حفاری.
- جهت یابی راستای اصلی شیارهای انحراف سنج در راستای حداکثر جابجایی قابل انتظار
- جهت شروع عملیات نصب، ابتدا یک شاخه لوله ۱/۵ متری همراه با حلقه مغناطیسی مبنا را انتخاب کرده و با استفاده از چسب آب‌بند و چسب نواری دور تا دور درپوش انتهایی پیچانده تا کاملاً آب‌بند شود. سپس با احتیاط لوله را داخل گمانه هدایت کرده و به مقدار حدود ۱ متر از آن را از گمانه بیرون نگه داشته تا انجام مراحل بعدی نصب به سهولت انجام شود.
- اتصال لوله‌های ۳ متری راهنما به یکدیگر توسط کوپلینگ‌های مرتبط
- نکته بسیار حائز اهمیت این است که پس از اتمام اتصال لوله‌ها و قبل از آغاز عملیات تزریق گمانه، باید یکی از شیارها را که آن را شیار A+ می‌نامیم به سمتی که انتظار حداکثر حرکت و جابجایی به آن سمت وجود دارد قرار گیرد (Slope Indicator Company, 2017).

۸-۲ جمع‌بندی

با توجه به موارد ارائه شده، کشیدگی سنج‌های گمانه‌ای، از ابزارهای اندازه‌گیری جابجایی سطحی و عمقی به شمار می‌روند. از انواع ابزارهای کشیدگی سنج گمانه‌ای می‌توان به کشیدگی سنج مغناطیسی و میله‌ای نام برد که درون گمانه‌های با قطرهای مشخص قرار می‌گیرند. کشیدگی سنج‌های مغناطیسی شامل لوله دسترسی از جنس ABS، حلقه‌های مغناطیسی/ عنکبوتی بوده که در عمق‌های مشخص قرار می‌گیرند و قرائت از طریق پروب اندازه‌گیری درون لوله انجام می‌شود. کشیدگی سنج‌های میله‌ای که به دو صورت تک نقطه‌ای یا چند نقطه‌ای هستند شامل میله در طول‌های مختلف و مهار گیرداری است که درون دوغاب ثابت می‌شود، با جابجایی مهار و حرکت میله قرائت صورت می‌گیرد.

فصل سوم

پیشینه پژوهش

۳-۱ مقدمه

یکی از مراحل مهم در نصب ابزارهای کشیدگی سنج، پر کردن فضای خالی بین لوله و دیواره داخلی گمانه است. پرکننده یک گمانه ابزار دقیق، بخشی است که خیلی اوقات توجه ای به آن نمی‌شود. رفتار مواد پرکننده که بیشترین تماس را با سازند و ابزار دارد مسئله بحرانی برای به دست آوردن اندازه‌گیری‌های صحیح است. در صورتی که این فضا با مصالح مناسب پر نشود و نتواند تماس مناسب و پایداری بین لوله‌های کشیدگی سنج و جداره گمانه را ایجاد کند آنگاه نتایج اندازه‌گیری قابل اعتماد نخواهد بود.

مصالحی که معمولاً برای پر کردن گمانه‌های ابزار دقیق استفاده می‌شود، شامل سیمان، مصالح دانه‌ای ماسه و بنتونیت^۱ است. تجربه نشان داده که دوغاب سیمان - بنتونیت بهترین گزینه به عنوان مصالح پرکننده درون گمانه بوده و کاربرد بسیاری دارد. همچنین در مواردی که نیاز به کاهش سختی دوغاب باشد می‌توان در تهیه دوغاب به جای سیمان از خاکستر بادی^۲ استفاده کرد (Mikkelsen, 2002).

۳-۲ دوغاب سیمان-بنتونیت

دوغاب سیمان - بنتونیت به طور گسترده در حوزه رفتار سنجی ابزارها استفاده می‌شود. دوغاب نه به عنوان یک بتن و نه به عنوان ملات به شمار می‌رود. تفاوت بزرگ بین بتن، ملات یا دوغاب، شکل‌پذیری یا سیالیت آن در مرحله اولیه است. اگرچه دوغاب همانند بتن همان مواد را داراست ولی سیالیت یا شکل‌پذیری بسیار بیشتری نسبت به بتن معمولی دارد. این مقدار از سیالیت لازم است تا دوغاب در فضاهای خالی جریان یابد (Vanza et al., 2013).

خواص دوغاب سیمان-بنتونیت به نوع سیمان و بنتونیت و نیز تجهیزات، نسبت و طرح اختلاط آنها و دما وابسته است. عمدتاً دوغاب باید به اندازه کافی سیال باشد تا به راحتی از طریق لوله به داخل

^۱ bentonite

^۲ Fly Ash

گمانه پر از آب پمپ شود. پرکننده دوغاب بنتونیت که تنها از بنتونیت و آب تشکیل شده است نمی‌تواند از نظر حجمی پایداری لازم برای مقابله با فشار آب منفذی ناشی از فرایند هیدراته را داشته باشد. بنابراین اضافه کردن سیمان حتی به مقدار کم به خاطر گیرش اولیه آن از خواص منبسط شوندگی بالای بنتونیت جلوگیری می‌کند. مقاومت دوغاب می‌تواند با توجه به زمین پیرامون ابزار با کنترل محتوی سیمان و تنظیم طرح اختلاط آن‌ها تعیین شود. کنترل تراکم‌پذیری (سختی) و نفوذپذیری چندان آسان نیست. حتی دوغاب‌های سیمانی ضعیف‌تر بسیار سخت‌تر از خاک‌های رسی تحکیم یافته عادی با همان مقاومت باقی هستند. محتوای مواد جامد بنتونیت نسبت به محتوای

سیمان بیشترین تأثیر را روی نفوذپذیری دوغاب بنتونیت - سیمان دارد (Mikkelsen, 2002)

نوع ایده‌آل دوغاب باید با زمین اطراف سازگار باشد. یک مخلوط ضعیف‌تر دوغاب عملکرد ابزار را در صورتی که دوغاب به‌درستی هم در گمانه تزریق شود تحت تأثیر قرار نمی‌دهد. همچنین یک مخلوط قوی‌تر هم ممکن است رفتار مستقل از زمین اطراف از خود نشان دهد (Dunnicliff, 1993).

لیتل جان^۱ (۱۹۸۲) اظهار داشت که بنتونیت دارای ظرفیت جذب آب، ظرفیت تبادل بالای کاتیون و توانایی تشکیل ساختارهای ژل مانند حتی در غلظت‌های پایین را دارد. با اندازه کوچک آنها برای تثبیت سیمان به‌منظور جلوگیری از آب اندازی^۲ استفاده می‌شوند. همچنین نشان داد برای دوغاب بنتونیت/ سیمان که مقاومت کمی مورد نیاز باشد پرکننده بنتونیت به‌منظور افزایش حجم دوغاب استفاده می‌شود. او همچنین بیان کرد که دوغاب سیمانی باید به اندازه کافی سیال باشد تا بتواند پمپاژ و تزریق به‌طور مؤثر صورت گیرد و به اندازه کافی برای ممانعت از جابجایی و فرسایش بعد از تزریق پایدار باشد. برای دوغاب‌های مورد استفاده برای کاهش نفوذپذیری از شکستگی سنگ‌ها یا خاک‌ها، سیالیت، اندازه ذرات و آب انداختگی مهم هستند (Littlejohn, 1982).

برلند و همکاران^۳ (۱۹۷۲) دوغاب اطراف لوله دسترسی کشیدگی سنج مغناطیسی را به‌عنوان یک

^۱ Littlejohn

^۲ bleeding

^۳ Burland et.al

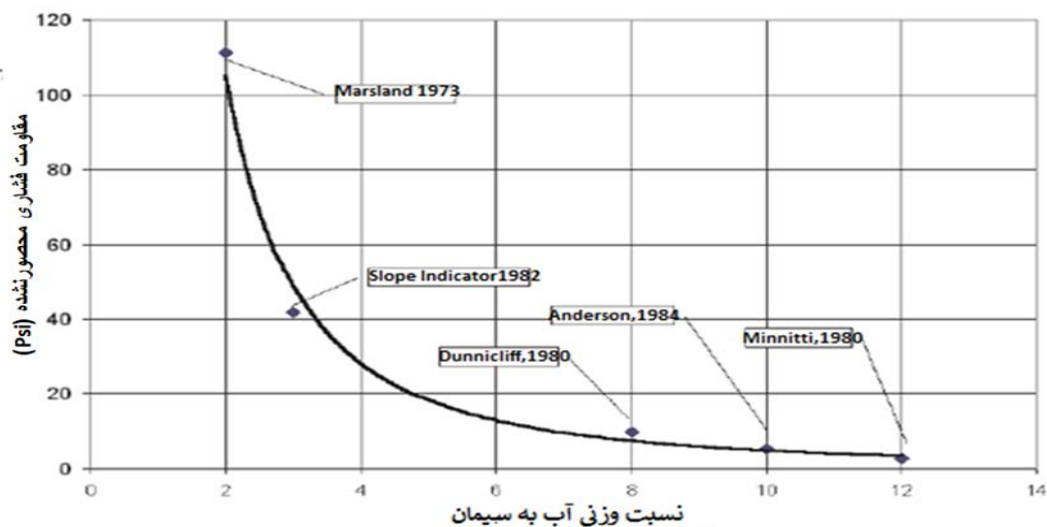
ماده نرم انعطاف پذیر که قادر به جلوگیری از فروپاشی گمانه باشد توصیف کردند. همچنین برای تزریق گمانه‌ها در زمین نرم و مستعد ریزش، بعد از نصب کشیدگی سنج‌ها با دوغاب بنتونیت غلیظ را پیشنهاد داده‌اند (Burland et al., 1972).

۳-۳ مشخصات مکانیکی دوغاب سیمان - بنتونیت

قانون کلی برای تزریق هر نوع ابزار در گمانه توجه به مشخصات تغییر شکل و مقاومت خاک اطراف آن به جای نفوذپذیری است. چندین پژوهشگر مقاومت دوغاب بنتونیت/ سیمان را مورد بررسی قرار داده‌اند. معمولاً با اندازه‌گیری مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های مکعبی یا استوانه‌ای کوچک انجام گرفته است.

گرینوود و رافل^۱ (۱۹۶۳) بیان کرده‌اند که مقاومت فشاری محصور نشده ۷ روزه دوغاب بنتونیت- سیمان معمول به‌طور کلی در محدوده تقریباً ۱/۴ تا ۳۵ کیلو نیوتن بر مترمربع و برای یک دوغاب بنتونیت - سیمان شامل ۱۰۰ گرم سیمان در هر لیتر آب و مقدار رس برابر با ۴/۷۵ درصد وزن سیمان، مقاومت فشاری مکعب در ۷ روز 20 KN/m^2 به دست می‌آید. با این حال اگر مقدار بیشتری از سیمان استفاده شود، مقاومت دوغاب بسیار بالاتری می‌تواند به دست آید. برای مثال یک دوغاب سیمان - بنتونیت شامل ۷۸۰ گرم سیمان در هر لیتر آب و مقدار بنتونیت ۴/۷۵ درصد از وزن سیمان مقاومت فشاری مکعب ۷ روزه‌ای برابر 460 KN/m^2 به دست می‌آید (Greenwood & Raffle, 1963). داده‌های مقاومت که به صورت غیررسمی از منابع مختلف توسط نویسندگان طی سالیان قبل جمع آوری شده است در شکل ۱-۳ خلاصه شده است. روند خط کشیده شده از طریق نقاط داده‌ها نشان می‌دهد که نسبت آب به سیمان، مقاومت دوغاب را کنترل می‌کند و با افزایش نسبت آب به سیمان مقاومت کاهش می‌یابد (Marsland, 1973).

^۱ Greenwood and Raffle



شکل ۳-۱: مقاومت ۲۸ روزه دوغاب سیمان - بنتونیت با نسبت طرح اختلاط آب به سیمان (Marsland, 1973).

مارسلند و کواترمن^۱ (۱۹۷۴) گزارش داده‌اند که کشیدگی سنج‌های گمانه‌ای معمولاً با خاک یا دوغابی با مقاومت نزدیک به مقاومت خاک اطراف پر می‌شوند، همچنین در استفاده از کشیدگی سنج‌های مغناطیسی چند نقطه‌ای، دوغاب سیمان - بنتونیت با مقاومت ۷ روزه‌ای که بیش از یک سوم مقاومت خاک اطراف نباشد را پیشنهاد کرده‌اند (Marsland, & Quarterman, 1974).

دورهام^۲ (۱۹۹۶) نشان داد که مقاومت برشی دوغاب بنتونیت/ سیمان با گذشت زمان افزایش می‌یابد. در بسیاری از مخلوط‌ها مقاومت برشی بعد از یک سال هم افزایش می‌یابد. همچنین نشان داد که برای دوغاب‌هایی با محتوی جامد بیشتر، مقاومت برشی تا حدود سه ماه عمدتاً تحت تأثیر مقدار سیمان است اما دوره بعد از آن تحت تأثیر مقدار بنتونیت و سیمان خواهد بود. مقاومت برشی برای دوغاب‌هایی با مقدار جامد کم، تحت تأثیر بنتونیت است (Durham, 1996).

ویل^۳ (۱۹۹۷) برای کابل‌های بازتاب‌سنج (TDR^۴) که یک نوع ابزار الکترونیکی برای تعیین گسل‌ها و ناپیوستگی‌ها استفاده می‌شود، از دوغاب سیمان - بنتونیت استفاده کرده است. او نشان داد که

^۱ Marsland and Quarterman

^۲ Durham

^۳ Will

^۴ Time Domain Reflectometry

مقاومت فشاری محصور نشده زمانی که مقدار بنتونیت نسبتاً ثابت باقی بماند (بین ۱/۸ تا ۶/۹٪) مستقیماً به محتوای سیمان و نسبت آب به سیمان بستگی دارد. برای به دست آوردن مقاومت فشاری ۳ روزه در حدود ۵۰ الی ۲۰۰ psi با مقدار بنتونیت بین ۱/۸ الی ۶/۹٪ بایستی نسبت آب به سیمان بین ۱ الی ۲ انتخاب شود. نتایج مقاومت نشان می‌دهد که فاکتور افزایش مقاومت ۲۸ روزه دوغاب نسبت به مقاومت ۳ روزه آن به‌طور متوسط ۳/۲ برابر است که این فاکتور می‌تواند از ۲/۱ الی ۴/۶ متغیر باشد. برای به دست آوردن مقاومت ۲۸ روزه ۵۰ الی ۲۰۰ psi بجای ۳ روز، نسبت آب به سیمان بایستی ۱ الی ۲ برابر کاهش یابد. همچنین مقدار مدول یانگ مماسی دوغاب در محدوده ۲ الی ۶۹ Ksi اندازه‌گیری شده است. این مقدار همان مدول مورد انتظار برای رس‌ها است که نشان می‌دهد اضافه کردن بنتونیت به سیمان منجر به رفتار شبیه به رس می‌گردد. این رفتار باعث فراهم شدن امکان مقایسه آن با مصالح ژئوتکنیکی می‌گردد (Will, 1997).

جمشیدی (۲۰۰۷) با استفاده از یک مدل عددی به کمک نرم‌افزار المان محدود PLAXIS، به‌صورت دوبعدی تأثیر سختی دوغاب به خاک در میزان نشست قائم را مورد بررسی قرار داد. او نشان داد که در مقادیر کم سختی دوغاب به سختی خاک (E_g/E_s) اختلاف نشست خاک اطراف گمانه نسبت به نشست دوغاب کمتر بوده و با افزایش این نسبت زیاد می‌شود. (Jamshidi, 2007).

صالحی (۱۳۸۷) آزمایش‌هایی را با طرح اختلاط‌های مختلف با سیمان، بنتونیت و خاکستر بادی انجام داد. نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که افزایش بنتونیت بیشترین تأثیر را در کاهش آب انداختگی و کاهش آب، بعد از آن بیشترین تأثیر را دارد. در این میان افزایش خاکستر بادی کمترین تأثیر را داراست. چگالی خشک نمونه‌های دوغاب با افزایش میزان خاکستر بادی، افزایش می‌یابد که با مقایسه آن، با تنش برشی سطح مشترک بین دوغاب و لوله روند مشخصی را در تنش برشی مشاهده می‌شود. او همچنین نشان داد که پدیده آب انداختگی و در نتیجه جداشدگی سبب بروز خطاهای قابل توجهی در اندازه‌گیری مقاومت برشی سطح مشترک بین دوغاب و لوله و مقاومت فشاری تک‌محوره می‌شود. (صالحی، ۱۳۸۷).

بايومی^۱ (۲۰۱۱) نیز به کمک نرم‌افزار آباکوس به صورت دوبعدی به مطالعه پارامتری بررسی تأثیر صلبیت دوغاب بر روی اندازه‌گیری نشست با استفاده از کشیدگی سنج گمانه‌ای نصب شده در یک محیط خاک الاستیک همگن همسانگرد با عمق محدود تحت یک رویه اضافی یکنواخت پرداخته است. مطالعه عددی نشان داد که اگر نسبت مدول الاستیک دوغاب- خاک در حدود ۱ باشد حداقل خطاها در نشست می‌تواند حاصل شود. همچنین تغییر شکل قائم دوغاب در گمانه با افزایش تنش عمودی در دوغاب و سختی دوغاب (Eg) کنترل می‌شود. اختلاف بیشتر بین مدول سختی دوغاب و خاک یعنی نسبت Eg/Es بزرگ‌تر، منجر به جابجایی نسبی بزرگ‌تر خاک/دوغاب و تنش برشی القایی بزرگ‌تر سطح مشترک می‌شود (Bayoumi, 2011).

سونبی و همکاران^۲ (۲۰۱۲) بر روی خواص دوغاب بنتونیتی برای کاربردهای ژئوتکنیکی آزمایش‌هایی انجام داده‌اند که نتایج آزمایش نشان می‌دهد که مقدار بنتونیت تأثیر قابل توجهی روی سیالیت، خواص تغییر شکل‌پذیری و مقاومت فشاری دوغاب دارد. افزایش در مقدار بنتونیت برعکس نسبت آب به بنتونیت (W/B)، منجر به افزایش مقادیر زمان جریان، اندازه چسبندگی صفحه، ویسکوزیته پلاستیک و تنش تسلیم، و کاهش آب اندازی آب و مقاومت فشاری در ۳ روز، ۷ روز و ۲۸ روز می‌شود (Sonebi et al., 2012).

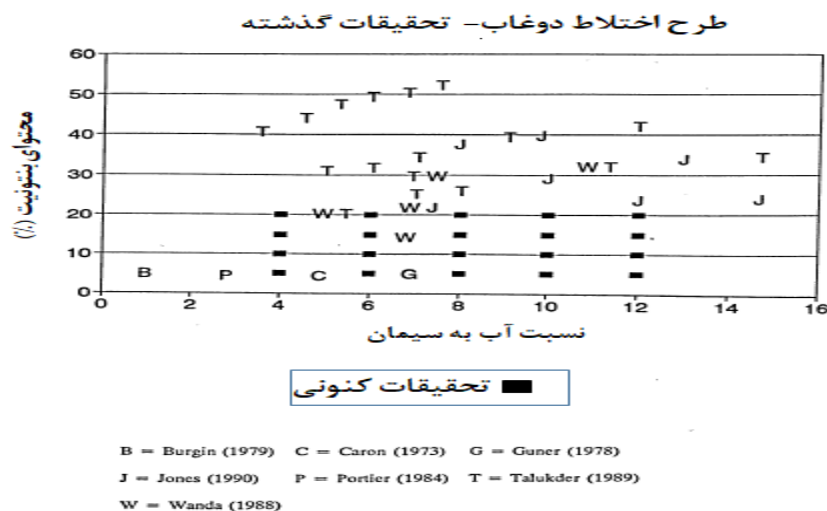
۳-۴ طرح اختلاط

طرح اختلاط دوغاب سیمانی بر اساس نسبت حجمی به منظور اجتناب از روش وزن کردن در محل انجام می‌شود. محدوده نسبت حجمی بین آب و سیمان در محدوده ۱/۶:۰ تا ۱/۶:۰ برای کاربردهای مختلف رایج است. اگر ماسه به عنوان پرکننده استفاده شود نسبت وزنی ماسه به سیمان به طور معمول بیشتر از ۲ نیست (Vanza et al., 2013). اختلاط‌های مختلفی با نسبت‌های مختلف آب به سیمان و مقدار بنتونیت انجام شده است که خلاصه‌ای از اختلاط‌های دوغاب در نظر گرفته شده توسط

^۱ Bayoumi

^۲ Sonebi. et al

پژوهشگران گذشته که به صورت نموداری با نسبت آب به سیمان به محتوای بنتونیت در شکل ۲-۳ نشان داده شده است (Durham, 1996).



شکل ۲-۳: طرح اختلاط دوغاب در نظر گرفته شده توسط پژوهشگران گذشته (Durham, 1996).

ویل (۱۹۹۷) برای مدل سازی اختلاط، در محل یکسری آزمون های آزمایشگاهی انجام داد تا طی آن تأثیر هیدراسیون بنتونیت و زمان اختلاط دوغاب بر مشخصات آن را تعیین نماید. نزدیک ترین نتیجه آزمایش در خصوص یکسان بودن مقاومت فشاری رس و دوغاب بنتونیت -سیمان زمانی حاصل گردید که بنتونیت کاملاً از قبل هیدراته شده و ۳۰ دقیقه برای اختلاط آن زمان صرف شده باشد (Will, 1997).

آلکویسی^۱ و همکاران (۲۰۰۵) سه طرح مختلف دوغاب سیمانی بدون ماسه که در جدول ۱-۳ نشان داده شده است برای کاربردهای دیوار پرده تزریق استفاده کرده اند که در آن هر کدام به ترتیب دارای نسبت آب به سیمان ۱، ۰/۴ و ۳/۶۴ هستند (Al Kuisi et al., 2005).

برای مقایسه طرح اختلاط دوغاب سیمان - بنتونیت گزارش شده و خصوصیات آنها برای کاربردهای مختلف در جدول ۲-۳ نشان داده شده است. محدوده گسترده ای از نسبت اختلاط دوغاب و خواص آن، تأکید بر اهمیت طرح اختلاط مناسب با توجه به کاربرد آنها دارد. با این وجود

^۱ Al Kuisi

خواص یک طرح اختلاط می‌تواند به‌طور قابل توجهی برای کاربردی معین متغیر باشد (Bayoumi, 2011).

جدول ۱-۳: انواع طرح اختلاط دوغاب برای کاربرد در دیواره پرده تزریق (Al Kuisi et al., 2005).

طرح اختلاط در هر مترمکعب				
افزودنی (لیتر)	بنتونیت (کیلوگرم)	سیمان (کیلوگرم)	آب (لیتر)	نام دوغاب
۲۰	۱۸	۷۵۰	۷۵۰	GIN
-	-	۱۴۰۰	۵۶۰	پرکننده
-	۲۵	۲۵۰	۹۱۰	غلاف

جدول ۲-۳: طرح اختلاط دوغاب سیمان - بنتونیت (Bayoumi, 2011)

منبع	یادداشت	B/C ^c	W/C ^b	q _u ^a	کاربرد
Mikkelsen and Green (2003)	داده‌های غیررسمی	-	2	760 kPa (28-day)	نامشخص
Mikkelsen and Green (2003)	داده‌های غیررسمی	-	3	290 kPa (28-day)	نامشخص
Mikkelsen and Green (2003)	داده‌های غیررسمی	-	8	69 kPa (28-day)	نامشخص
Mikkelsen and Green (2003)	داده‌های غیررسمی	-	10	42 kPa (28-day)	نامشخص
Mikkelsen and Green (2003)	داده‌های غیررسمی	-	12	22 kPa (28-day)	نامشخص
Marsland (1973)	داده‌های غیررسمی	-	-	0.25 (q _u) _{soil} (7-day)	نشست
Marsland and Quarterman (1974)	سوسپانسیون بنتونیت در خاک آبرفتی	-	-	≤0.1 (q _u) _{soil}	نشست
Marsland and Quarterman (1974)		-	-	≤1/3 (q _u) _{soil}	نشست
Dunncliff and Green (1988)		-	-	15 to 25 kPa (28-day)	نشست
Mossaad et al. (1996)		-	-	50 to 125 kPa (28-day)	نشست
Mikkelsen (2002)	خاک های نرم	0.4	6.6	28 kPa (28-day)	نشست
Mikkelsen (2002)	خاک های متوسط تا سخت	0.3	2.5	345 kPa (28-day)	نشست
Blackburn (2002)		-	2	1 to 5 (q _u) _{soil}	کابل TDR
Dowding and O'Connor (2000)	پرکردن در ریس نرم	0.05	1.9	500 kPa	کابل TDR
Dowding and O'Connor (2000)	ریس سخت با رگه های آریس نرم	0.07	0.47	22 MPa	کابل TDR
Will (1997)		2	2	350 kPa (3-day)	کابل TDR
Vaughan (1969)		-	4 ^d	-	نفوذ پذیری
Vaughan (1973)		1	4	-	نفوذپذیری

^a مقاومت فشاری محصور نشده

^b نسبت وزنی آب به سیمان

^c نسبت وزنی بنتونیت به سیمان

طبق نظر میکلسن (۲۰۰۲)، برای انجام روش‌های صحرایی ساده به منظور ثابت ماندن نسبت آب به سیمان و کنترل بهتر مقاومت و مدول دوغاب در ابتدا سیمان با آب ترکیب شود. اگر بنتونیت در ابتدا مخلوط شود نسبت آب به سیمان را به دلیل تولید دوغاب قابل پمپ نمی‌توان کنترل کرد. در ساخت دوغاب هر نوع پودر بنتونیت می‌تواند با ترکیب سیمان پرتلند و آب استفاده شود، اما مقدار

بنتونیت مناسب تا حدی به عیار بنتونیت، ترتیب اختلاط، pH و دمای آب بستگی دارد. همچنین دو طرح اختلاط با مقاومت ۲۸ روزه برای نسبت‌های آب به سیمان ۲/۵ و ۶/۶ به ترتیب برابر ۵۰ و ۴۰ پوند بر اینچ مربع برای دوغاب مورد استفاده در گمانه‌های نشست سنجی در جدول ۳-۳ ارائه داده است.

جدول ۳-۳: طرح اختلاط برای دوغاب سیمان - بنتونیت (Mikkelsen, 2002).

طرح اختلاط دوغاب برای خاک‌های متوسط و سخت		
نسبت وزنی	وزن	مواد
۱	۹۴ پوند (یک کیسه)	سیمان پرتلند
۲/۵	۳۰ گالن	آب
۰/۳	۲۵ پوند	بنتونیت
طرح اختلاط دوغاب برای خاک‌های نرم		
نسبت وزنی	وزن	مواد
۱	۹۴ پوند (یک کیسه)	سیمان پرتلند
۶/۶	۷۵ گالن	آب
۰/۴	۳۹ پوند	بنتونیت

تجربه نشان داده است که اگر آب و سیمان در نسبت‌های وزنی بزرگ‌تر از حدود ۰/۷ الی ۱ بدون اضافه کردن بنتونیت یا بعضی از انواع مواد پرکننده (رس یا آهک) استفاده شود جداسازی مواد درون دوغاب رخ می‌دهد لذا در تمام موارد پرکننده مناسب به سیمان معلق اضافه می‌شود تا یک دوغاب یکنواخت غلیظ قابل پمپ ایجاد شود.

مقدار بنتونیتی که برای اختلاط لازم است به فاکتورهایی که قبلاً اشاره شده متغیر خواهد بود. مقدار بنتونیت نشان داده شده در جدول ۳-۳ تنها به‌عنوان یک راهنما و همچنین برای تخمین مواد تعیین شده برای انتقال به محل باید استفاده شود. با این روش اگر آب و بنتونیت در ابتدا مخلوط شوند بنتونیت بیشتری نیاز خواهد بود که اگر بخواهیم نفوذپذیری کمتری در توده تزریق شده داشته

باشیم یک امتیاز محسوب می‌شود زیرا افزایش محتوی بنتونیت منجر به کاهش نفوذپذیری می‌شود بنابراین دلیل دیگری برای اختلاط آب و سیمان قبل از اضافه کردن بنتونیت است (Mikkelsen, 2002).

۳-۵ اندرکنش بین خاک و سازه و عوامل مؤثر بر آن

اندرکنش بین خاک و سازه یک مسئله بحرانی در مهندسی ژئوتکنیک است. رفتار یکنواخت و متناوب سطح مشترک خاک - سازه تأثیر مهمی بر پاسخ مکانیکی سیستم اندرکنش خاک - سازه دارد. بنابراین رفتار سطح مشترک باید با تمرکز بر ویژگی‌های مختلف، متمایز از مواد دیگر بررسی شود (Gu et al., 2017). فرایند بررسی سطح مشترک خاک - سازه که به توسعه تکنیک‌های آزمایش و تئوری‌ها در مهندسی ژئوتکنیک بستگی دارد را می‌توان تقریباً به سه مرحله به شرح زیر تقسیم کرد: مرحله اول (قبل از دهه ۱۹۶۰): در این مرحله تمرکز تحقیق بر روی رفتار مقاومت در برنامه‌های عملی بود. برای مثال اصطکاک دیوار در فرمول فشار جانبی زمین بر طبق نظریه کولمب می‌تواند به عنوان یک پارامتر مقاومتی سطح مشترک خاک - دیوار شناخته شود. در این مرحله سطح مشترک به‌طور خاص مورد بررسی قرار نگرفته است.

مرحله دوم (دهه بین ۱۹۸۰-۱۹۶۰): رابطه تنش - کرنش سطح مشترک یک نگرانی بزرگی در این مرحله به شمار می‌رفت دستاوردهای سریع از تکنیک‌های عددی و امکان بررسی‌های بیشتر برای توسعه تکنیک‌های آزمایش و اندازه‌گیری، باعث شد که به جز مقاومت، رفتار غیرخطی و الاستو-پلاستیک سطح مشترک با استفاده از طیف وسیعی از دستگاه‌های آزمایش مورد بررسی قرار گیرد. همچنین چند مدل ساختاری نیز برای توصیف رفتار سطح مشترک پیشنهاد شد که در تجزیه و تحلیل عددی سیستم خاک - سازه با المان‌های سطح مشترک به کار گرفته شده‌اند. هدف اصلی تحقیق در این مرحله رابطه تنش مماسی - جابجایی ماکروسکوپی سطح مشترک بود.

مرحله سوم (از دهه ۱۹۸۰): رفتار سطح مشترک خاک - سازه به‌صورت اصولی با چند پیشرفت مهم به دست آمده از جمله استفاده از رابطه تنش نرمال و مماسی - جابجایی، به‌جای رابطه تنش

مماسی - جابجایی در مطالعات اولیه مورد توجه قرار گرفته است. همچنین پاسخ، تحت مسیرهای پیچیده مانند بارگذاری چرخه‌ای نیز مورد بررسی قرار گرفته است. اندازه‌گیری‌های میکروسکوپی همراه با پیشرفت قابل توجهی در اندازه‌گیری‌های ماکروسکوپی به کار گرفته شده است. طیف وسیعی از انواع سطح مشترک برای خاک‌ها و سازه‌های مختلف به وجود آمده است. همچنین مدل‌های ساختاری برای توصیف پاسخ غیرخطی، الاستو-پلاستیک توسعه داده شده است. بسیاری از انواع روش‌های عددی شامل مدل‌های مختلف سطح مشترک پیشنهاد شده و به‌طور گسترده در پروژه‌های عملی مورد استفاده قرار گرفته است (Zhang & Zhang, 2009).

آزمایش‌های بسیاری برای رفتار سطح مشترک بین خاک‌های مختلف (ماسه، رس، شن) و مصالح ساختمانی (فولاد، بتن) تحت انواع بارگذاری مختلف (یکنواخت، چرخه‌ای) و شرایط مرزی (تنش نرمال ثابت، سختی نرمال ثابت، حجم ثابت) انجام شده است (Gu et al., 2017). روش‌های تجربی مختلفی در آزمون‌های برشی سطح مشترک با آزمون برش مستقیم و آزمون برش ساده که بیشتر رایج بود مورد استفاده قرار گرفته است. تکنیک‌های مدرن و پیشرفته‌تر مانند عکاسی (Hu & Pu, 2004) پرتونگاری (Tejchman, 1995) و سرعت سنجی تصویری ذرات (PIV^1) (DeJong et al., 2003) برای بررسی بیشتر مکانیسم‌های اساسی مربوط به رفتار سطح مشترک خاک - سازه ثبت شده است. بررسی‌های پیشین نشان داده‌اند که رفتار سطح مشترک ماسه - سازه ممکن است توسط عواملی مانند زبری سطح، تراکم نسبی خاک، شکل ذرات، اندازه دانه، کانی شناسی خاک و سطح تنش عمودی تأثیر پذیرد (DeJong et al., 2009; Uesugi & Kishida, 1986b).

یوزوگی و همکاران^۲ (۱۹۸۸) و هو و پو^۳ (۲۰۰۴) نشان دادند که یک سطح مشترک صاف و هموار از حالت شکست الاستیک-پلاستیک کامل پیروی می‌کند و حداکثر تنش برشی و تغییر حجم در یک جابجایی سطح مشترک محدود، با اتساع بسیار ناچیز، نزدیک سطح مشترک به دست می‌آید. در

^۱ particle image velocimetry

^۲ Uesugi. et al

^۳ Hu and Pu

مقابل، برای یک سطح مشترک زبر و ناهموار، تمرکز کرنش در یک لایه نازک ماسه، مجاور به سطح سازه با اتساع بزرگ رخ می‌دهد (Uesugi et al., 1988; Hu & Pu, 2004).

تعدادی شبیه‌سازی با ^۱DEM برای بررسی رفتار سطح مشترک خاک - سازه در مقیاس میکروسکوپی انجام شده است. به عنوان مثال جنسن^۲ و همکارانش (۲۰۰۱) با استفاده از DEM به بررسی اثرات زبری سطح، شکل ذرات و شکستگی ذرات پرداختند. نتایج آنها نشان داد میدان جابجایی ذرات به‌طور قابل توجهی با زبری سطح مشترک و شکل ذرات تحت تأثیر قرار می‌گیرد. با افزایش زاویه‌داری ذرات، چرخش ذرات محدودتر می‌شود و در نتیجه مقاومت افزایش می‌یابد و از زون برشی معین جلوگیری می‌کند. همچنین دریافتند که خرد شدن دانه، منجر به زون برشی بیشتری بدون کاهش قابل توجه در مقاومت برشی خاک دانه‌ای می‌شود (Jensen et al., 2001). ونگ^۳ و همکاران (۲۰۰۷) آزمایش‌های برش مستقیم را در امتداد سطح مشترک ذرات کروی متراکم و یک سطح ساختاری زبر انجام داده‌اند. نتایج نشان داد که مقاومت سطح مشترک به توسعه ناهمسانگردی بافت و ناهمسانگردی نیروی تماسی در تماس بین ذرات و مرز بستگی دارد (Wang, 2007).

پنگ^۴ و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از DEM، به بررسی رفتار سطح مشترک بین ماسه و شمع با استفاده از یک سری آزمایش‌های برش مستقیم تحت شرایط مرزی مختلف پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که تنش قائم اولیه و تراکم نسبی خاک اطراف بر نسبت تنش محرک و افزایش تنش قائم سطح مشترک اثر می‌گذارد (Peng et al., 2014).

ایل شیخ^۵ و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از نرم‌افزار DEM، رفتار برشی ذرات کروی بین دو سطح دیوار زبر را شبیه‌سازی کرده‌اند. آنها نشان داده‌اند که چگونه سرعت برشی، زبری دیوار و تراکم مناطق ناهموار در امتداد دیوار تحت تأثیر ضریب اصطکاک مؤثر و برش موضعی سطح مشترک است. (El

^۱ Discrete Element Method

^۲ Jensen

^۳ Wang

^۴ Peng

^۵ El Cheikh

۳-۵-۱ آزمون‌های برشی سطح مشترک

آزمایش‌های مختلفی برای مطالعه ویژگی‌های مکانیکی سطح مشترک خاک-سازه وجود دارد. دایتز^۱ (۲۰۰۰) محدودیت‌ها و مزایای تجهیزات آزمایش و تنظیمات مختلف موجود را توصیف کرده است (Dietz, 2000). اغلب دستگاه برش مستقیم برای آزمون سطح مشترک استفاده می‌شود. کارهای اولیه توسط پوتایندی^۲ (۱۹۶۱)، لیتلتون^۳ (۱۹۷۶)، ورنیک^۴ (۱۹۷۸) با استفاده از دستگاه آزمایش برش مستقیم انجام شد (Stutz, 2016).

یوشیمی و کیشیدا^۵ (۱۹۸۱) یک دستگاه پیچش حلقه‌ای برای آزمایش سطح تماس به کار برده‌اند و تغییر شکل در خاک ماسه را با استفاده از عکس برداری پرتو x مشاهده کرده است (Yoshimi & Kishida, 1981). یوزوگی و کیشیدا (۱۹۸۶) دستگاه آزمایش برش ساده‌ای را برای مطالعه رفتار سطح مشترک بین انواع مختلفی از خاک و صفحه فولادی با زبری مختلف به کار برده‌اند. کار جامع آنها به این نتیجه رسید که زبری سطح تأثیر مهمی بر روی ضریب اصطکاک در هنگام تسلیم شدن دارد (Uesugi & Kishida, 1986). یوزوگی و همکاران (۱۹۸۸) رفتار ذرات در نزدیکی سطح مشترک با استفاده از عکس نمای نزدیک ثبت کردند. در این تحقیق تشکیل یک زون برشی با ضخامت برابر با ۵ برابر اندازه متوسط دانه درون توده سنگ در امتداد سطح مشترک ناصاف را مشاهده کرده‌اند (Uesugi et al., 1988). ین و همکاران^۶ (۱۹۹۵) یک آزمایش برش مستقیم را برای مشاهده توزیع جابجایی نسبی در امتداد سطح مشترک انجام دادند. اوگین و فخریان^۷ (۱۹۹۶) دستگاه سطح مشترک برش

^۱ Dietz

^۲ Potyondy

^۳ Littleton

^۴ Wernick

^۵ Yoshimi and Kishida

^۶ Yin et al

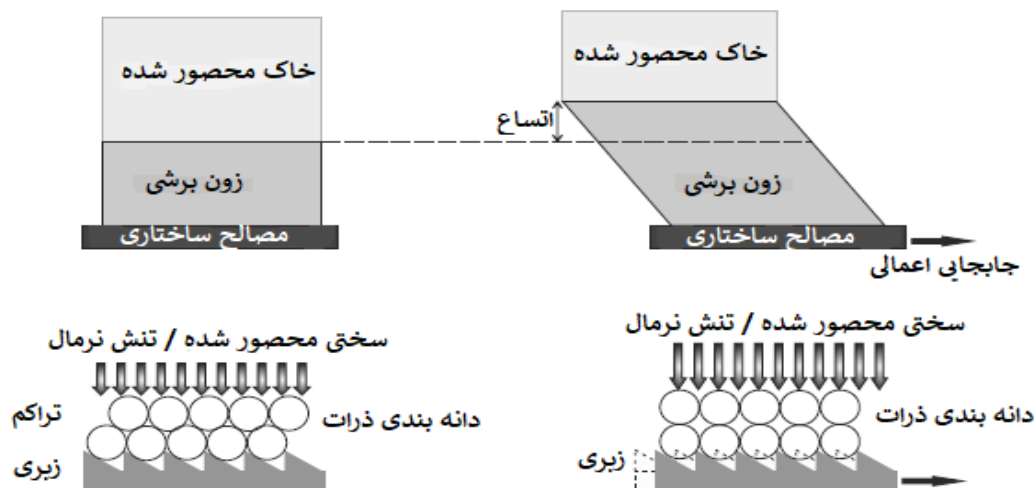
^۷ Evgin and Fakharian

ساده C3DSSI^۱ را برای انجام آزمایشات جابجایی مماسی کنترل شده چرخه‌ای دو سویه با سختی‌های نرمال مختلف ساختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که مسیر تنش، تأثیر مهمی بر جابجایی مماسی- تنش برشی و رفتار تغییر حجمی سطح تماس می‌گذارد (Evgin & Fakharian, 1996).

۳-۵-۲ جنبه‌های کلیدی رفتار سطح مشترک

هدف از این بخش ارائه خلاصه‌ای جامع از پدیده‌های مختلف، برای تشخیص و مدل‌سازی سطح مشترک ریزدانه و دانه درشت است. پوتایاندی (۱۹۶۱) نتیجه گرفت که رفتار سطح مشترک تحت تأثیر عواملی مانند مصالح ساختمانی مختلف (چوب، فولاد و بتن)، شرایط سطحی مختلف (زبری و صافی)، انواع مختلف خاک‌ها (ماسه، رس) و چسبندگی مواد دانه‌ای و تغییر بارگذاری نرمال بین خاک - سطح مشترک سطوح اصطکاکی است (Potyondy, 1961).

فیورونت و همکاران (۱۹۹۹) مهم‌ترین موارد بر تأثیر رفتار سطح مشترک خاک-سازه در خاک‌های دانه‌ای، زبری سطح، اندازه دانه بندی، گسیختگی خاک، تراکم نسبی خاک، ثابت سختی نرمال (K) نام برد. اثرات مهم برای سطح مشترک خاک - سازه در شکل ۳-۳ نشان داده شده است. موارد مهم‌تر در ادامه تشریح می‌شود. (Fioravante et al., 1999).



شکل ۳-۳: رفتار سطح مشترک و عوامل مهم برای رفتار سطح مشترک حجمی (Nakayama, 2007)

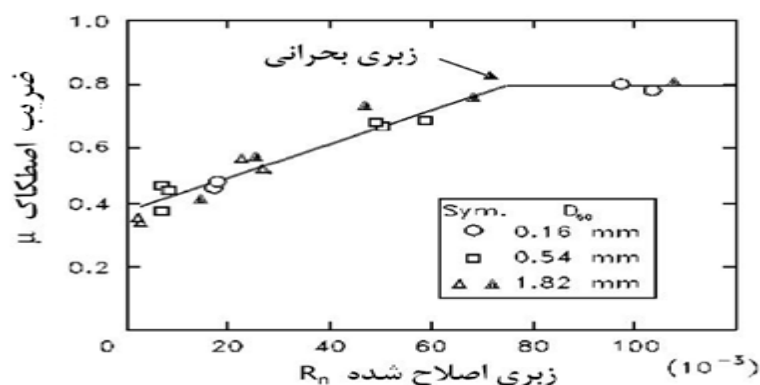
^۱ Cyclic 3-D Simple Shear Interface

۳-۵-۲-۱ زبری سطح

زبری سطح، نقش برجسته‌ای در خصوصیات و رفتار سطح مشترک خاک/سنگ - سازه دارد. پوتایندی (۱۹۶۱) اظهار داشت که زبری سطح مشترک، ضریب اصطکاک پیوسته شمع و گیرداری را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Potyondy, 1961).

یوشیمی و کشیدا (۱۹۸۱) در بررسی نقش زبری سطوح پیوسته بر روی رفتار برشی سطوح مشترک پیشگام بودند. آنها با استفاده از دستگاه برش ساده، نشان دادند که اصطکاک سطح مشترک به زبری سطوح پیوسته با حداکثر زاویه اصطکاک سطح مشترک، که کمتر از زاویه اصطکاک ماسه مورد آزمایش بوده است، وابسته است. به‌ویژه برای سطوح صاف، زاویه اصطکاک سطح مشترک کمتر از نصف زاویه اصطکاک داخلی ماسه است (Yoshimi & Kishida, 1981).

یوسوگی و کیشیدا (۱۹۸۶) با یک سری آزمایش‌های انجام شده با دستگاه برش ساده بر روی ماسه و فولاد رابطه‌ای میان سختی سطح و اصطکاک سطح مشترک بدست آورده‌اند. به کمک پارامتر زبری اصلاح شده (R_n)، آنها نشان دادند که در زبری بحرانی با افزایش R_n ، مقاومت برشی سطح مشترک به صورت خطی افزایش می‌یابد. در زبری سطحی بحرانی، جایی که مقاومت برشی سطح مشترک برابر با مقاومت داخلی برشی خاک می‌شود، تمرکز برش به خاک مجاور انتقال یافته و در بالای این ناحیه افزایش زبری سطح تأثیری ندارد (Uesugi & Kishida, 1986).



شکل ۳-۴: زبری سطح نسبت به ضریب اصطکاک برای سطح مشترک فولاد و ماسه (Uesugi & Kishida, 1986).

ياسوفوكو و همكارن (۲۰۰۳) اظهار داشتند كه زبرى سطح يك شاخص خوب نسبت به تغيير شكل در سطح مشترك از حالت تسليم تا باقىمانده است (Yasufuku et al., 2003).

هو و پو (۲۰۰۴) يك سري از آزمون برش مستقيم ماسه - فولاد براى به دست آوردن رابطه تنش-كرنش انجام داده‌اند. آنها دريافتند كه زبرى نسبى اثر مهمى بر روى مقاومت بيشينه دارد (Hu & Pu, 2004).

ديجانگ و وستگيت (۲۰۰۹) نتايج تحقيقات گذشته (پوتايندى (۱۹۶۱) و كيشيدا و يوزوگى (۱۹۸۷) را تاييد كردند كه زبرى سطح، تنش حداكثر و همچنين رفتار نرم شوندگى حداكثر پس از آن را در خاك‌هاى دانه‌اى تحت تاثير قرار مى‌دهد (DeJong & Westgate, 2009).

تاثير پاسخ موضعى توسط ديجانگ و وستگيت (۲۰۰۹) مورد بررسى قرار گرفت. پاسخ موضعى نزديك سطح مشترك سازه نشان مى‌دهد كه مقدار كرنش كلى در واقع تحت تاثير زبرى سطح قرار مى‌گيرد. براى سطح مشترك صاف، كرنش برشى و حجمى در نزديكى سطح مشترك متركز هستند (DeJong & Westgate, 2009).

چن و همكاران^۱ (۲۰۱۵) اثر اصطكاك بتن و رس قرمز را مورد بررسى قرار داده‌اند. براى سطح مشترك‌هاى صاف شكست بر روى سطح خاك- سازه رخ مى‌دهد. بديهى است براى سطوح بسيار زبر، شكست در داخل توده خاك رخ مى‌دهد. علاوه بر اين مشاهده كردند كه اتساع در تنش نرمال پايين تر با سطح مشترك زبر افزايش مى‌يابد و رفتار مقاومت برشى به شدت تحت تاثير قرار نمى‌گيرد (Chen et al., 2015).

فليقا و همكاران^۲ (۲۰۱۶) آزمون‌هاى سطح مشترك برش مستقيم با بافت‌هاى مختلف در جهت برش و سطوح مواد انجام داده‌اند. آنها گزارش دادند كه مواد (فولاد و ...) تاثيرى بر رفتار برشى ندارد اما نسبتاً بر زبرى سطح در سطح مشترك تاثير مى‌گذارد (Feligha et al., 2016).

^۱Chen et al

^۲ Feligha et al.

۳-۵-۲-۲ چسبندگی

پوتایندی (۱۹۶۱) به بررسی اصطکاک پوسته ای بین مواد سازه ای و انواع خاک ها از جمله خاک های چسبنده پرداخته است. نتایج او نشان داد که در ارزیابی اصطکاک پوسته برای خاک های چسبنده، اصطکاک داخلی و چسبندگی باید در نظر گرفته شود (Potyondy, 1961).

تسوباکی هارا و کشیدا (۱۹۹۳) آزمایشی بر روی اصطکاک بین خاک های چسبنده و فولاد متوسط به منظور مشاهده رفتار اصطکاکی انجام داده اند. آنها سه مدل شکست با لغزش کامل در سطح مشترک، شکست برشی درون خاک و رفتار آمیخته شده ارائه کرده اند (Tsubakihara & Kishida, 1993). همچنین چن و همکاران سطح مشترک بین رس قرمز- بتن را مورد بررسی قرار داده اند. آنها دریافتند با توجه به چسبندگی و اصطکاک بافت رس، مقاومت برشی اصطکاکی روی زبری سطح شامل نیروهای چسبندگی و اصطکاکی سطوح رس و بتن است. آنها نشان داده اند نیروی چسبندگی بر سطح مشترک با مقدار زبری افزایش می یابد. همچنین مشاهده نمودند مقاومت سطح مشترک صاف شامل چسبندگی بافت رس و اصطکاک بین بافت رس و سطح بتن است (Chen et al., 2015).

۳-۵-۲-۳ متوسط اندازه ذره

متوسط اندازه دانه تأثیر مهمی در رابطه با رفتار سطح مشترک دارد. یوزوگی و همکاران (۱۹۸۸) نشان دادند که اندازه ذره و زبری سطح به طور خاص مهم هستند (Uesugi et al., 1988). این ارتباط توسط فیورنوانت (۲۰۰۲) نیز تأیید شده است. قطر متوسط (۵۰D) نقش ویژه ای در ضخامت نوار برشی دارد. پوتایندی (۱۹۶۱) و کیشیدا و یوزوگی (۱۹۸۷) این یافته ها را تأیید کردند. اندازه ذره عامل مهمی در رفتار نرم شوندگی^۱ و سخت شوندگی^۲ در مواد دانه ای است (Potyondy, 1961; Uesugi & Kishida, 1986b).

^۱ softening

^۲ hardening

۳-۵-۲-۴ تراکم نسبی خاک

تراکم خاک پارامتر مهمی برای رفتار حجمی سطح مشترک است. یاسوفوکو و همکاران (۲۰۰۳) نشان دادند که با افزایش تراکم، زاویه اصطکاک سطح مشترک افزایش می‌یابد (Yasufuku et al., 2003). دیجانگ و وستگیت (۲۰۰۹) تأثیر نسبت پوکی را بر روی توسعه تنش در خاک اطراف به ویژه اگر بارگذاری چرخه‌ای در سطح مشترک اعمال شود را نشان دادند. به‌طور کلی مشخص است که چگالی یک عامل کلیدی در پیش بینی تغییر شکل خاک در ناحیه سطح مشترک است (DeJong & Westgate, 2009).

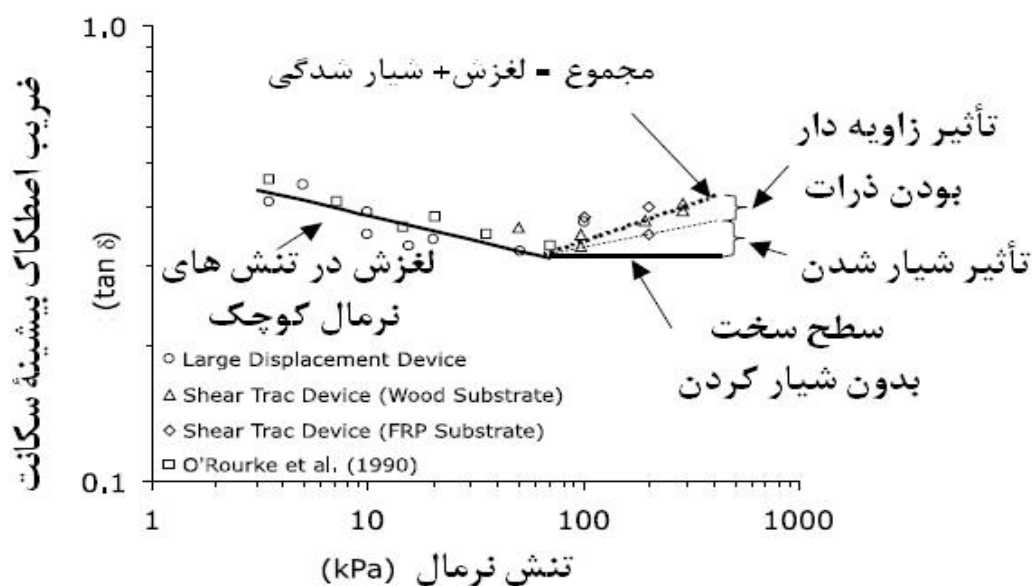
۳-۵-۲-۵ سختی و تنش نرمال محصور شده

تنش و سختی محدود به سطح مشترک بر رفتار سطح مشترک تأثیر می‌گذارند. هانسن^۱ (۱۹۶۱) نشان داد که در آزمایش‌های جعبه برشی، تغییر شکل عمودی به نسبت تنش اعمالی بستگی دارد. همین فرضیه برای آزمایش‌های برشی سطح مشترک نیز درست است. از فیزیک مسئله روشن است که فشاری که در جهت نرمال به سطح مشترک عمل می‌کند تغییر شکل را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Stutz, 2016). یوزوگی و همکاران (۱۹۸۸) گزارش دادند که رفتار پلاستیک با همان مقدار تغییر شکل برشی تحت تنش‌های نرمال بالاتر افزایش می‌یابد (Uesugi et al., 1988).

فراست و داو^۲ (۱۹۹۹) تأثیر تنش نرمال را بر مقاومت سطح مشترک مصالح پیوسته صاف را مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها نشان دادند که در سختی ثابت، در ابتدا با افزایش تنش نرمال، مقاومت برشی سطح مشترک کاهش می‌یابد. در این ناحیه، تعداد و مساحت اجزای خاک با سطح المان با افزایش تنش نرمال افزایش یافته و در نتیجه، سبب می‌شود که تنش واقعی تماسی در هر جزء کاهش یافته و در نتیجه مقاومت برشی سطح مشترک کاهش می‌یابد (Dove & Frost, 1999).

^۱ Hansen

^۲ Frost and Dove



۳-۶ جمع بندی

همان‌طور که در این فصل به آن اشاره شد یکی از مراحل نصب ابزارهای کشیدگی سنج استفاده از دوغاب بنتونیت - سیمان به عنوان پرکننده گمانه است که از اهمیت خاصی در اندازه‌گیری مقدار جابجایی، برخوردار است. دوغاب استفاده شده در گمانه باید سازگاری مناسبی با محیط اطراف گمانه داشته باشد. از جمله عوامل دیگری که می‌تواند در خطای اندازه‌گیری تأثیرگذار باشد اندرکنش بین خاک و سازه است که آزمایش‌های مختلفی برای سطح مشترک خاک - سازه وجود دارد. اغلب از آزمون‌های برش مستقیم برای تشخیص رفتار سطح مشترک استفاده می‌شود. عواملی مانند زبری سطح، اندازه ذرات و تراکم نسبی خاک و سختی و تنش نرمال محصور شده بر سطح مشترک تأثیر دارند. بررسی‌های انجام گرفته نشان می‌دهد که زبری سطح تأثیر زیادی بر اصطکاک بین سازه و خاک دارد. همچنین تراکم نسبی نیز بر رفتار حجمی سطح مشترک تأثیر دارد که با افزایش تراکم زاویه اصطکاک سطح مشترک افزایش می‌یابد.

فصل چهارم

مطالعه‌های

آزمایشگاهی

۱-۴ مقدمه

برای تعیین خصوصیات دوغاب پرکننده گمانه‌های کشیدگی سنج، تعدادی نمونه‌های دوغابی با طرح اختلاط مختلف ساخته شده است. در این بخش به‌طور کامل به بررسی مشخصات مصالح مورد استفاده و مراحل و چگونگی ساخت نمونه‌های دوغاب و آزمایش‌های انجام شده پرداخته خواهد شد.

۲-۴ مشخصات مصالح مصرفی

برای ساخت دوغاب پرکننده گمانه‌های کشیدگی سنج به‌طور معمول از ترکیب سیمان و بنتونیت و آب استفاده می‌شود. سیمان مورد استفاده در این پژوهش از نوع سیمان پرتلند تیپ ۱ از کارخانه سیمان شاهرود تهیه شده که مشخصات شیمیایی و فیزیکی آن در جدول ۱-۴ ارائه شده است.

جدول ۱-۴: ویژگی فیزیکی و شیمیایی سیمان مصرفی (shahroud cement company, 2017)

ویژگی‌های سیمان پرتلند نوع یک				
شیمیایی		فیزیکی		ردیف
۲۱/۱۷	اکسید سیلیسیوم (SiO ₂) (%)	۲۹۵۵	سطح مخصوص (بلین) (cm ² /g)	۱
۴/۴۵	اکسید آلومینیوم (Al ₂ O ₃) (%)	۰/۰۶۴	آزمون اتوکلاو (درصد)	۲
۳/۹۴	اکسید آهن (Fe ₂ O ₃) (%)	۱۴۵	زمان گیرش با ابتدایی (دقیقه)	۳
		۳:۴۰	نهایی (ساعت)	
۶۳/۶۵	اکسید کلسیم (CaO) (%)	۲۴۰	مقاومت فشاری ۳ روزه (Kg/cm ²)	۴
۱/۵۶	اکسید منیزیم (MgO) (%)	۳۰۵	مقاومت فشاری ۷ روزه (Kg/cm ²)	۵
۲/۵۷	انیدریک سولفوریک (So ₃) (%)	۴۰۲	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (Kg/cm ²)	۶
۰/۳۴	اکسید سدیم (Na ₂ O) (%)	-	-	۷
۰/۵۴	اکسید پتاسیم (K ₂ O) (%)	-	-	۸
۱/۶۲	آهک آزاد (%)	-	-	۹
۵۲/۷	سیلیکات تری کلسیم (C ₃ S) (%)	-	-	۱۰
۲۱/۴	سیلیکات دی کلسیم (C ₂ S) (%)	-	-	۱۱

ادامه جدول ۴-۱

۱۲	-	-	آلومینات تری کلسیم (C ₃ A) (%)	۵/۱
----	---	---	---	-----

همچنین بنتونیت مورد استفاده از شرکت فرزان پودر تهیه شده است. مشخصات شیمیایی بنتونیت که با استفاده از روش XRF انجام شده در جدول ۴-۲ آورده شده است.

جدول ۴-۲: ویژگی شیمیایی بنتونیت مصرفی (Farzanpowder company, 2017)

ردیف					ویژگی شیمیایی بنتونیت
۱	SiO ₂	٪ ۶۳/۱۴	۷	MnO	٪ ۰/۰۵
۲	Al ₂ O ₃	٪ ۱۱/۵۹	۸	CaO	٪ ۳/۰۳
۳	Na ₂ O	٪ ۲/۱۴	۹	P ₂ O ₅	٪ ۰/۰۳
۴	MgO	٪ ۲/۹۳	۱۰	Fe ₂ O ₃	٪ ۲/۵۴
۵	K ₂ O	٪ ۰/۳۴	۱۱	SO ₃	٪ ۰/۷۵
۶	TiO ₂	٪ ۰/۲۱	۱۲	LoI	٪ ۱۲/۹۸

آبی که در ترکیب دوغاب استفاده شده آب آشامیدنی شهرستان شاهرود بوده است. سازگاری یا تطابق مناسب ابزار کشیدگی سنج با محیط اطراف برای حصول دقت بالا ضروری است. این سازگاری در حالت ایده آل با برابر بودن سختی دوغاب با سختی محیط اطراف گمانه به دست می آید. جهت تعیین دوغاب با سختی های متفاوت از طرح اختلاط های مختلفی استفاده می شود که با توجه به کارهای انجام شده به طور مثال توسط (Mikkelsen, 2002)، (Al Kuisi et al., 2005) و همچنین شرکت Slope Indicator و Soil Instruments Ltd که برای نصب نشست سنج ها در خاک، طرح اختلاط دوغاب سیمان - بنتونیت ارائه داده اند. طرح نهایی نسبت اختلاط برای ساخت نمونه های

آزمایشگاهی در جدول ۳-۴ ارائه شده است.

جدول ۳-۴: طرح اختلاط دوغاب سیمان - بنتونیت

نسبت بنتونیت به سیمان (B/C)	نسبت آب به سیمان (W/C)	ردیف
۰/۳	۲	۱
۰/۴		
۰/۵		
۰/۳	۳	۲
۰/۴		
۰/۵		
۰/۳	۴	۳
۰/۴		
۰/۵		

۳-۴ دستگاه‌های مورد استفاده در آزمایشگاه

برای ساخت نمونه‌های استوانه‌ای از دستگاه‌ها و وسایل آزمایشگاه بتن دانشگاه صنعتی شاهرود استفاده شده است که در ادامه توضیح داده شده است.

۱-۳-۴ ترازوی دیجیتالی

برای تعیین نسبت‌های وزنی هر یک از طرح اختلاط‌ها از ترازویی با دقت ۰/۰۱ گرم استفاده شده که در شکل ۱-۴-الف) نشان داده شده است.

۲-۳-۴ مخلوط‌کن^۱

به‌منظور تهیه مخلوط همگن مواد مورد نیاز برای ساخت دوغاب از یک مخلوط‌کن با ظرفیت ۵ لیتر استفاده شده است. این مخلوط‌کن که در شکل ۱-۴-ب) نشان داده شده است قابلیت چرخش در ۳

^۱ mixer

سرعت ۲۱۸، ۴۱۸ و ۶۰۳ دور بر دقیقه با همزن‌های مختلف را دارا بوده که در این آزمایش از سرعت ۲۱۸ دور بر دقیقه استفاده شده است.

۳-۳-۴ دستگاه بارگذاری

برای انجام آزمایش و اعمال بارگذاری فشاری از دستگاه بارگذاری نیمه خودکار Digimax compact line ساخت شرکت Controls ایتالیا (شکل ۴-۲) استفاده شده است. به منظور انجام انواع آزمایش‌های فشاری تک‌محوره، سه محوره، برزیلی و خمشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. دستگاه دارای جک فشاری هیدرولیکی با قابلیت اعمال بار 3000 kN با قابلیت اندازه‌گیری و ثبت نتایج به صورت خودکار با دیتالاگر ۸ کاناله و متعلقات دستگاه سلول هوک و جک فشار هیدرولیک دستی برای اعمال فشار جانبی حداکثر تا 100 MPa است. دستگاه دارای دو فک دیسکی با قطر ۳۰ سانتی‌متر و ضخامت ۴ سانتی‌متر روی دیسک‌های دیگر قرار دارند فک بالای دستگاه ثابت است که بارگذاری از فک پایین انجام می‌گیرد. نرخ بارگذاری برحسب MPa/s یا KN/s و با دقت ۰/۱ است.



(ب)



(الف)

شکل ۴-۱: (الف) دستگاه ترازوی دیجیتالی، (ب) دستگاه مخلوط‌کن دوغاب



شکل ۴-۲: دستگاه بارگذاری نیمه خودکار Digimax compact line

۴-۴ مراحل ساخت نمونه آزمایشی دوغاب پرکننده

در مرحله اول با توجه به نسبت‌های وزنی ارائه شده در جدول ۴-۳، مصالح مورد نیاز با ترازوی دیجیتال وزن شده است. سپس بر طبق نظر میکلسن (۲۰۰۲) برای ثابت ماندن نسبت آب به سیمان و کنترل بهتر مقاومت و مدول دوغاب ابتدا سیمان با آب ترکیب می‌شود. در نهایت پس از ۵ دقیقه مخلوط کردن آب و سیمان، بنتونیت به ترکیب اضافه شده و طبق نظر ویل (۱۹۹۷)، برای هیدراته شدن بنتونیت و اختلاط بهتر، ۳۰ دقیقه زمان صرف شده است. دوغاب آماده شده بنتونیت - سیمان در قالب‌هایی با قطر ۵۴ میلی‌متر و نسبت ارتفاع به قطر برابر با ۲ که به منظور نچسبیدن دوغاب به اطراف جداره داخلی قالب روغن کاری شده است ریخته می‌شوند.

پس از ریختن دوغاب در داخل قالب نمونه‌ها، برای خروج هوا از داخل دوغاب از یک میله استفاده شده است. بعد از ۲۴ ساعت از زمان ساخت، قالب‌ها باز شده و برای انجام آزمایش‌ها به مدت ۲۸ روز درون ظرفی از آب قرار داده می‌شوند (شکل ۴-۴).



الف) اجزای تشکیل دهنده دوغاب



ب) اضافه کردن بتونیت به مخلوط آب و سیمان



ج) قالب های آماده و روغن کاری شده



د) دوغاب ریخته شده در قالب

شکل ۴-۳: مراحل اجرای ساخت نمونه دوغاب پرکننده



ب) محل نگهداری نمونه ها



الف) نمونه استوانه دوغابی

شکل ۴-۴: الف) نمونه ساخته شده دوغابی، ب) محل نگهداری نمونه ها در داخل محفظه حاوی آب

۴-۵ آزمایش مقاومت فشاری تک محوره

آزمایش مقاومت فشاری تک محوری یا نا محصور، مرسوم ترین آزمون آزمایشگاهی برای تعیین مقاومت فشاری و مطالعه مکانیکی خواص نمونه است. برای اعمال بار محوری به نمونه، دستگاه دارای ظرفیت کافی لازم بوده تا بار با سرعت مورد نظر اعمال شود. دستگاه مجهز به دو صفحه بارگذاری است که یکی صلب و ثابت و دیگری در جهت قائم حرکت می نماید.

بر روی نمونه ها به منظور تعیین مدول الاستیسیته و ضریب پواسون، کرنش سنج های ۴ سانتی متری

به صورت طولی و قطری نصب شده است که برای چسباندن کرنش سنج و ایجاد سطح صاف بر روی نمونه از چسب های مخصوص رزین اپوکسی استفاده شده است. سپس کرنش سنج ها به دستگاه قرائت متصل می شوند. نمونه در زیر صفحه بارگذاری قرار داده شده و با نرخ 0.1 مگاپاسکال بر ثانیه بارگذاری صورت می گیرد. مراحل انجام کار در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.



شکل ۴-۵: (الف) نمونه قبل و بعد از بارگذاری، (ب) نمونه در زیر دستگاه بارگذاری

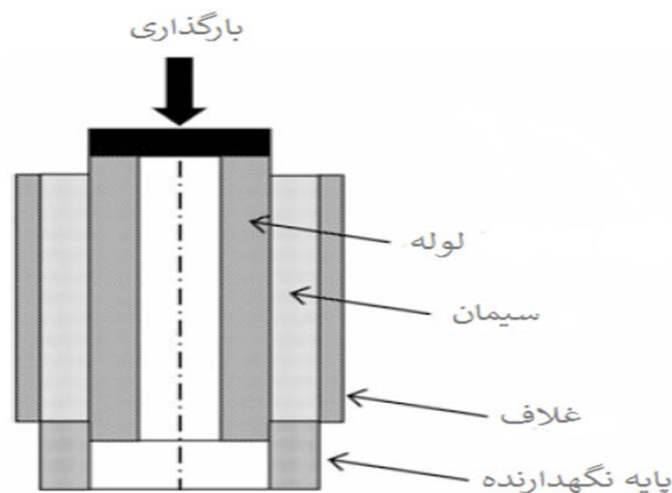
۴-۶ آزمون برون رانی^۱

برای تخمین مقاومت اتصال سطحی^۲ بین سیمان و لوله از جنس ABS ابزار انحراف سنج - نشست سنج که به عنوان مقاومت برشی سطح مشترک در نظر گرفته می شود از آزمون برون رانی استفاده می شود (Liu et al., 2013; Opedal et al., 2014). که شماتیکی از آن در شکل ۴-۶ نشان داده شده است. آزمایش شامل یک نمونه ترکیبی با یک لوله در وسط و سیمان اطراف آن است. در طول آزمون، لوله به سمت پایین فشار داده می شود که موجب شکست و جابجایی در دوغاب می شود. مقاومت برشی سطح مشترک، با تقسیم بار حداکثر لحظه شکست بر سطح تماس بین لوله و سیمان اطراف

^۱ Push out test

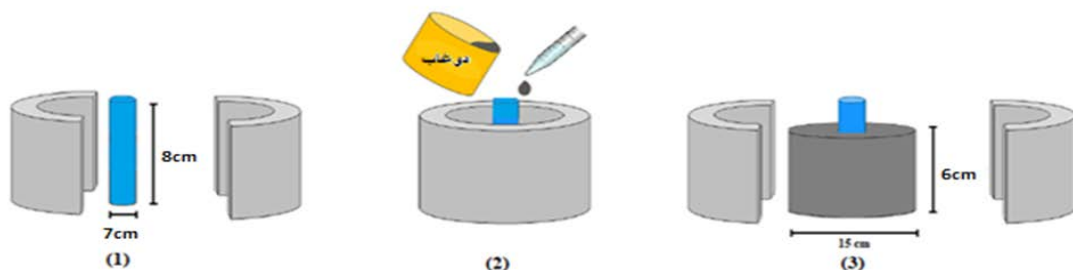
^۲ interfacial bonding strength

محاسبه می‌شود (Opedal et al., 2014).



شکل ۴-۶: آزمون برون‌رانی برای مقاومت برشی سطح مشترک (Lavrov & Torsæter, 2016).

با فرض قطر گمانه ۱۵ سانتی‌متر و با توجه به قطر ۷ سانتی‌متری لوله داخلی، ضخامت دوغاب اطراف لوله حدود ۴ سانتی‌متر برای تهیه نمونه و شرایط آزمایش در نظر گرفته شده است. برای ساخت نمونه از قالبی با قطر ۱۵ سانتی‌متر و لوله‌ای با جنس ABS به طول حدود ۸ سانتی‌متر و قطر ۷ سانتی‌متر استفاده شده است. برای دوغاب از درصد اختلاط ارائه شده در جدول ۳-۴ استفاده گردیده است. روش آماده سازی نمونه طبق مراحل شکل ۴-۷ و شکل ۴-۸ انجام شده است.



شکل ۴-۷: مراحل آماده سازی نمونه (Opedal et al., 2014. Modified).

پس از ساخت نمونه برای اعمال بار روی نمونه از دستگاه Digimax compact line که در شکل ۴-۶ نشان داده شده، بکار رفته است. همچنین برای اینکه لوله داخلی در حین بارگذاری آزادی حرکت داشته باشد حلقه‌ای توخالی (شکل ۴-۹-الف) به قطر درونی ۷/۴ سانتی‌متر تهیه شده که در زیر نمونه با دقت قرار داده می‌شود به‌طوری که لوله داخلی بتواند از داخل حلقه عبور کند و نیز برای ثبت

جابجایی لوله یک کرنش‌سنج دیجیتالی به کار رفته است که در شکل ۴-۹-ب قابل مشاهده است. روش انجام آزمایش به این صورت است که همزمان با اعمال بار به لوله درونی، مقدار جابجایی لوله به ازای مقدار بار وارده توسط کرنش‌سنج دیجیتالی نصب شده بر روی فک بالایی دستگاه ثبت می‌شود و این قرائت‌ها تا هنگامی که بار به نقطه اوج رسیده و سپس به‌طور ناگهانی و یا به آرامی کاهش یابد انجام می‌شود.



الف) قالب



ب) لوله ABS



ج) مخلوط دوغاب



د) نمونه ساخته شده بعد از ۲۴ ساعت

شکل ۴-۸: قالب و مراحل ساخت نمونه آزمایش



ب) انجام آزمایش



الف) حلقه توخالی

شکل ۴-۹: الف) حلقه توخالی، ب) نمونه و کرنش‌سنج دیجیتالی نصب شده بر روی دستگاه بارگذاری

۷-۴ نتایج مطالعات آزمایشگاهی

با توجه به آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری انجام گرفته نتایج آن برای هر نسبت اختلاط

در جدول ۴-۴ ارائه شده است.

جدول ۴-۴: نتایج به دست آمده از آزمایش تک‌محوره

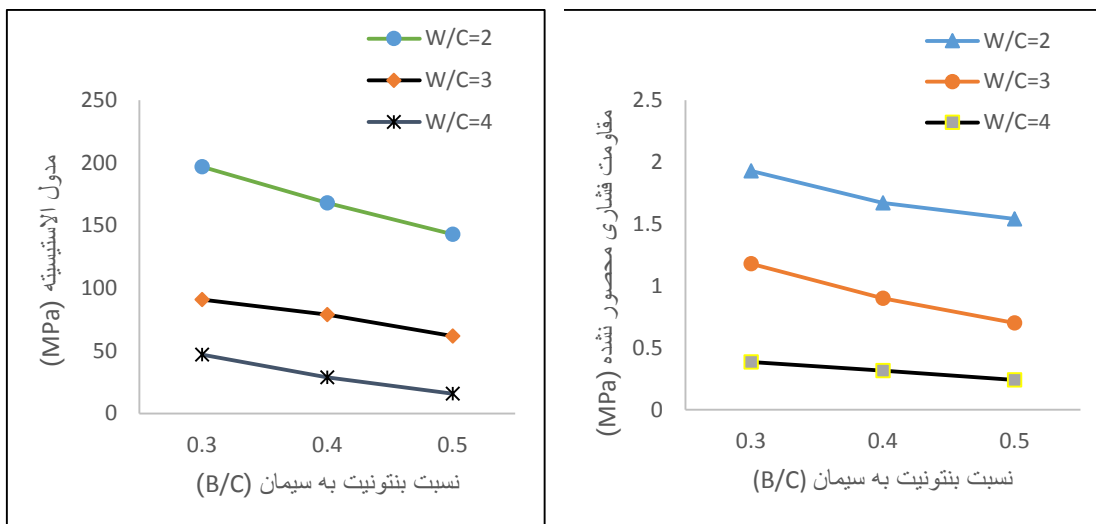
ردیف	نسبت آب به سیمان (W/C)	نسبت بنتونیت به سیمان (B/C)	چگالی نمونه (Kg/m ³)	مقاومت فشاری فشاری محصور نشده (MPa)	مدول الاستیسیته (MPa)	ضریب پواسون
۱	۲	۰/۳	۱۳۶۵	۱/۹۳۰	۱۹۷	۰/۲
		۰/۴	۱۳۴۲	۱/۶۷۰	۱۶۸	۰/۲۵
		۰/۵	۱۳۵۶	۱/۵۴۰	۱۴۳	۰/۲۳
۲	۳	۰/۳	۱۲۶۸	۱/۱۸	۹۱	۰/۲۶
		۰/۴	۱۱۶۶	۰/۹	۷۹	۰/۲۷
		۰/۵	۱۱۱۲	۰/۷	۶۲	۰/۲۵
۳	۴	۰/۳	۱۲۵۴	۰/۳۸۶	۴۷	۰/۲۵
		۰/۴	۱۲۲۸	۰/۳۱۵	۲۹	۰/۲۱
		۰/۵	۱۱۸۶	۰/۲۴۸	۱۶	۰/۲۷

همان‌طور که در جدول ۴-۴ و شکل ۴-۱۰ ارائه شده است با افزایش نسبت آب به سیمان و

درصد بنتونیت، وزن مخصوص نمونه دوغابی و مقاومت فشاری تک‌محوره و مدول الاستیسیته آن

کاهش یافته است. این امر نشان دهنده آن است که با افزایش درصد بنتونیت رفتار خمیری در نمونه

افزایش می‌یابد.



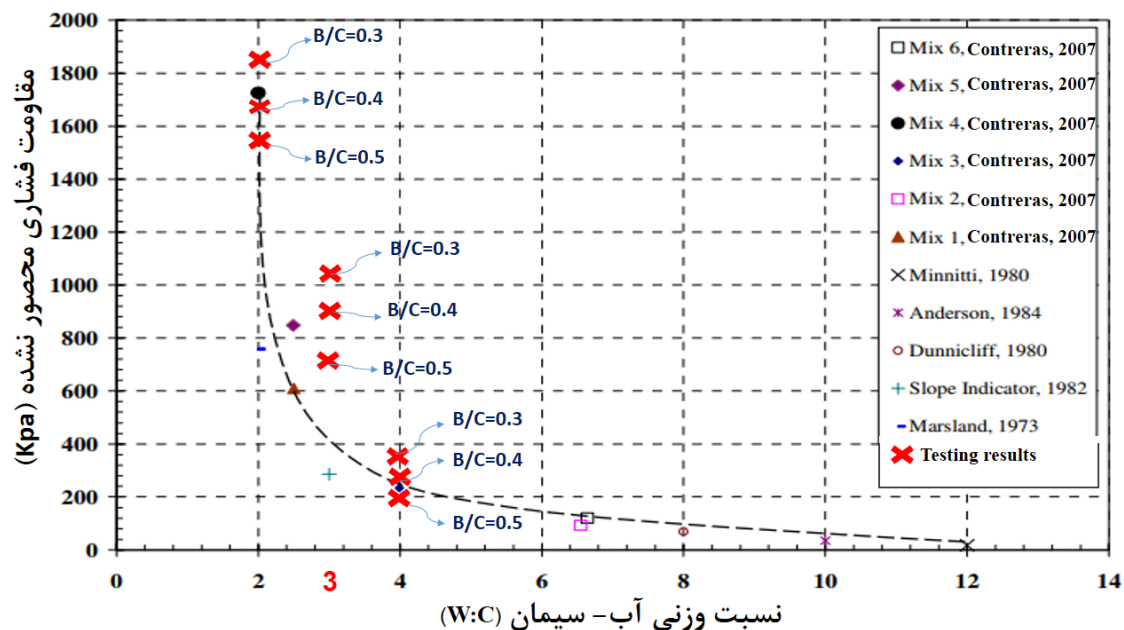
(الف) تغییرات مقاومت فشاری به نسبت B/C (ب) تغییرات مدول الاستیسیته به نسبت B/C

شکل ۴-۱۰: نمودار تغییرات مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته در نسبت بنتونیت به سیمان و آب به سیمان های مختلف

برای مقایسه نتایج بدست آمده با تحقیق های گذشته، از نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه دوغاب سیمان - بنتونیت ارائه شده توسط (Contreras et al., 2007) با نسبت های اختلاط مختلف که در جدول ۴-۵ ارائه شده و همچنین نویسندگان استفاده شده است. این نتایج به صورت نموداری در شکل ۴-۱۱ ارائه شده است.

جدول ۴-۵: طرح اختلاط استفاده شده در آزمون آزمایشگاهی (Contreras et al., 2007)

طرح	نسبت وزنی		
	آب:	سیمان:	بنتونیت
۱	۲/۵:	۱:	۰/۳۵
۲	۶/۵۵:	۱:	۰/۴
۳	۳/۹۹:	۱:	۰/۶۷
۴	۲:	۱:	۰/۳۶
۵	۲/۴۹:	۱:	۰/۴۱
۶	۶/۶۴:	۱:	۱/۱۹



شکل ۴-۱۱: مقایسه نتایج مقاومت فشاری محصور نشده بدست آمده با تحقیق های گذشته (Contreras et al., 2007. Modified)

با توجه به نمودار مشاهده می شود که مقادیر مقاومت فشاری محصور نشده به دست آمده در این پژوهش برای نسبت های اختلاط مختلف، تقریباً در این بازه قرار دارد و اختلاف جزئی با توجه به شرایط آزمایش مختلف طبیعی است.

همچنین برای به دست آوردن مقاومت برشی بین لوله و دوغاب بر اساس معیار موهر-کولمب داریم

(صالحی، ۱۳۸۷):

$$\tau = c_{int} + \sigma_n \tan \varphi_{int} \quad (4-1)$$

که:

τ : تنش برشی

c_{int} : چسبندگی سطح مشترک

σ_n : تنش عمود بر صفحه گسیختگی

φ_{int} : زاویه اصطکاک داخلی سطح مشترک

با توجه به اینکه آزمایش تک محوره در فشار جانبی صفر انجام می شود، مقدار تنش عمود بر صفحه

گسیختگی برابر با صفر در نظر گرفته شده و رابطه تنش برشی به صورت زیر ساده می شود:

$$\tau = c_{int} \quad (۲-۴)$$

که مقدار مقاومت برشی سطح مشترک همان طور که ذکر شده، با تقسیم بار حداکثر بر سطح تماس بین لوله و سیمان اطراف محاسبه می شود.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (۳-۴)$$

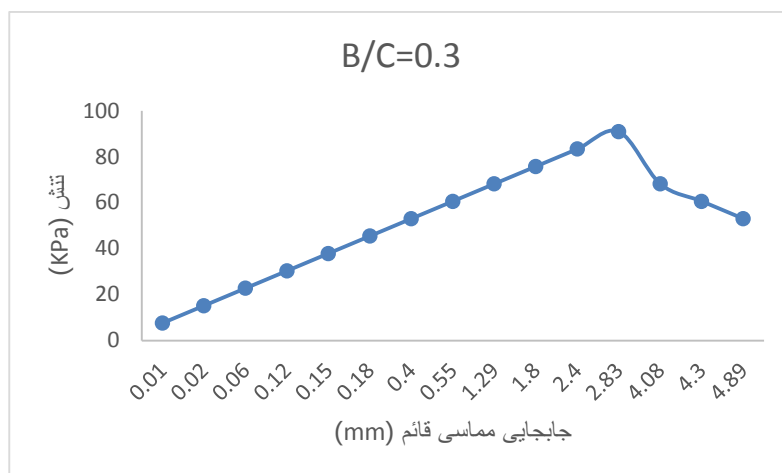
همچنین مقدار سطح تماس بین لوله و دوغاب از رابطه (۴-۴) به دست می آید:

$$A = \pi \times d \times h \quad (۴-۴)$$

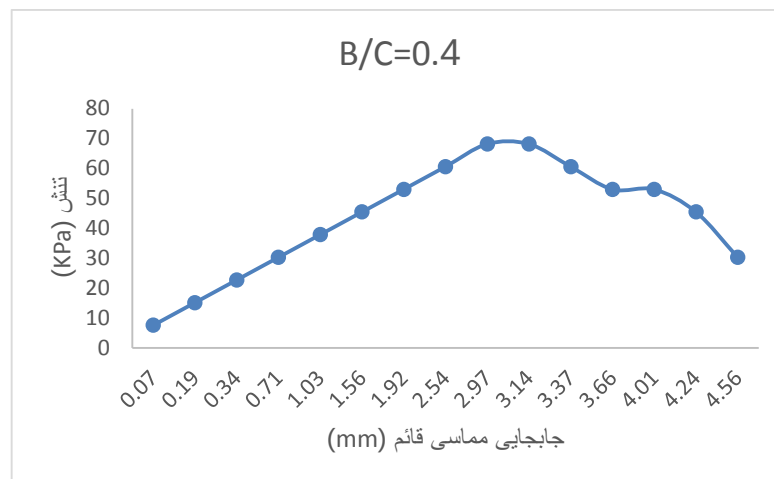
که d: قطر بیرونی لوله

h: طول نمونه درگیر شده لوله و سیمان است.

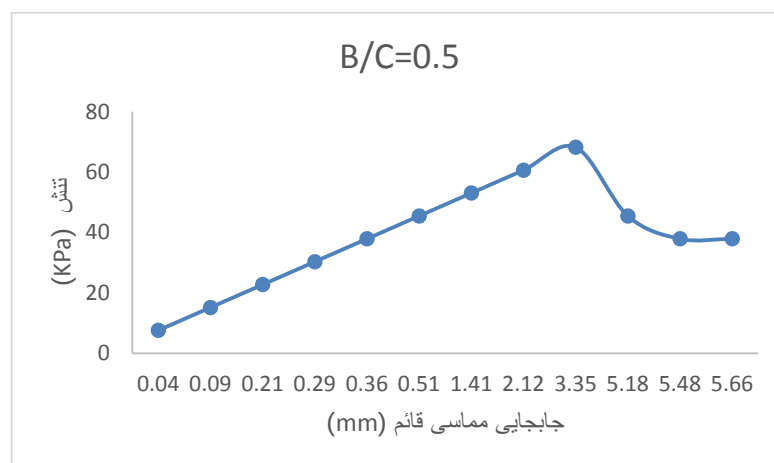
در این آزمایش قطر لوله آزمایش ۷ سانتی متر و طول نمونه درگیر شده ۶ سانتی متر در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه مقدار حداکثر تنش به دست آمده همان تنش برشی بین لوله و دوغاب خواهد بود نموداری برحسب تنش در برابر جابجایی مماسی قائم رسم می گردد. سپس مقدار تنش در نقطه اوج به عنوان حداکثر مقاومت برشی سطح مشترک لوله و سیمان تعیین می شود. به عنوان نمونه نمودار تنش - جابجایی مماسی قائم برای هر سه طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان ۳، در شکل های زیر نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۲: نمودار تنش برشی سطح مشترک دوغاب و لوله برای نسبت B/C= ۰/۳

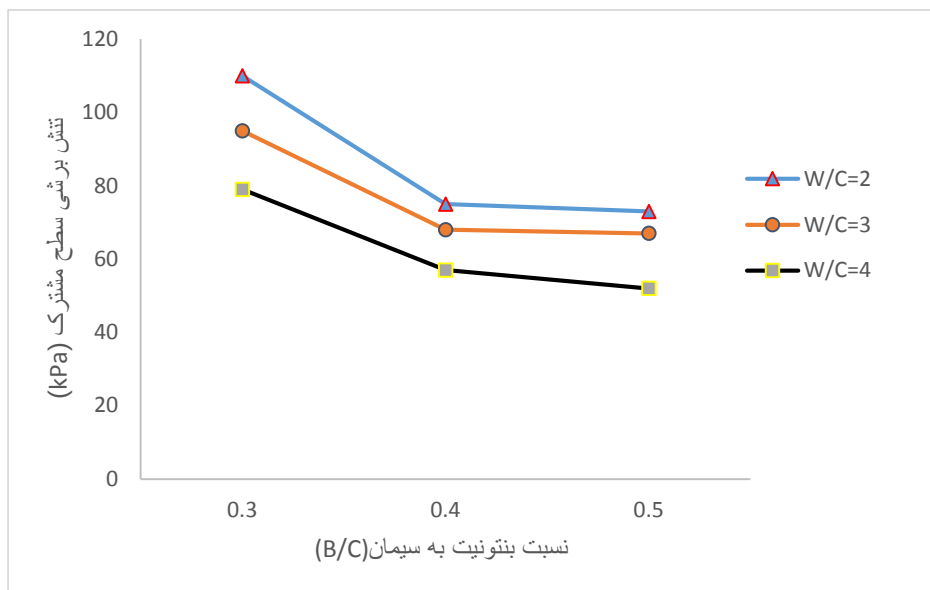


شکل ۴-۱۳: نمودار تنش برشی سطح مشترک دوغاب و لوله برای نسبت $B/C=0.4$



شکل ۴-۱۴: نمودار تنش برشی سطح مشترک دوغاب و لوله برای نسبت $B/C=0.5$

با توجه به نمودارهای ارائه شده در شکل‌های فوق می‌توان مشاهده نمود که با افزایش نسبت بنتونیت به سیمان حداکثر مقدار تنش برشی از مقدار تقریباً ۹۱ کیلو پاسکال در نسبت بنتونیت به سیمان ۰/۳ به حدود ۶۸ کیلو پاسکال در نسبت بنتونیت به سیمان ۰/۵ کاهش پیدا کرده است. به‌طور کلی اگر حداکثر مقدار تنش برشی سطح مشترک را برای هر سه طرح اختلاط با نسبت‌های آب به سیمان مختلف مقایسه شود، می‌توان دریافت که مقدار تنش برشی سطح مشترک با افزایش نسبت آب به سیمان کاهش می‌یابد. همچنین تنش برشی سطح مشترک در نسبت بنتونیت به سیمان ۰/۴ ثابت می‌شود و تغییر محسوسی مشاهده نمی‌شود.



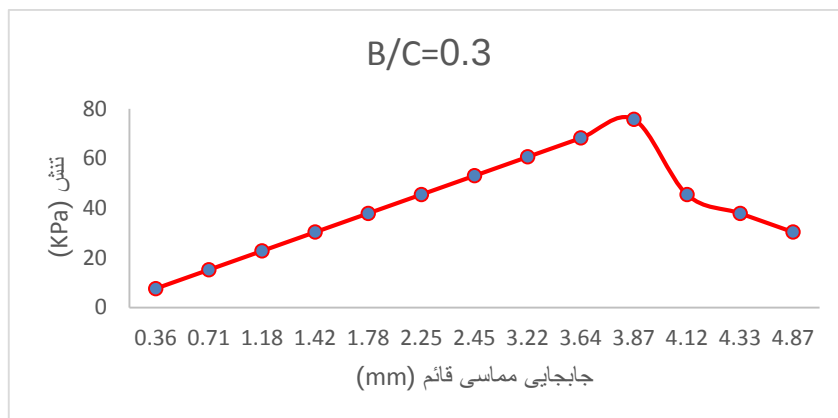
شکل ۴-۱۵: تنش برشی سطح مشترک برای نسبت‌های مختلف بتنویت به سیمان

همچنین به منظور تعیین تأثیر روغن کاری بر مقدار تنش برشی سطح مشترک دوغاب - لوله، سطح خارجی لوله به طور کامل روغن کاری شده (شکل ۴-۱۶-الف) و همانند قبل آزمون برون رانی انجام شده که نتیجه آن در شکل ۴-۱۷ نشان داده است.



شکل ۴-۱۶: الف) روغن کاری بر سطح خارجی کل لوله، ب) قالب مورد استفاده

روغن کاری سطح خارجی لوله‌ها باعث کاهش اصطکاک و سهولت لغزش لوله و مصالح پیرامون شده که با توجه به شکل ۴-۱۷ نیز می‌توان دریافت مقدار تنش برشی سطح مشترک دوغاب - لوله حدود ۷۶ کیلو پاسکال به دست آمده که در مقایسه با نمودار شکل ۴-۱۲ حدود ۲۱ درصد کاهش یافته است.



شکل ۴-۱۷: نمودار تأثیر روغن کاری کاری بر مقدار تنش برشی سطح مشترک دوغاب و لوله برای نسبت $B/C=0/3$

۴-۸ جمع بندی

در این فصل به مواد و مصالحی که در ساخت نمونه دوغابی مورد استفاده قرار گرفته اشاره شده است. مراحل انجام کار و آزمون‌های آزمایشگاهی انجام شده، ارائه شده است. با توجه به نتایج آزمون آزمایشگاهی این نتیجه حاصل شد که با افزایش درصد بنتونیت و نسبت آب به سیمان، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته نمونه دوغابی کاهش پیدا کرده است. همچنین آزمون برون رانی برای تعیین چسبندگی و مقدار تنش برشی سطح مشترک انجام گرفته است که مشاهده شده است با افزایش درصد بنتونیت و افزایش نسبت آب به سیمان، تنش برشی سطح مشترک کاهش می‌یابد.

مدل سازی عددی و تحلیل نتایج

امروزه به صورت گسترده‌ای از روش‌های شبیه‌سازی عددی در تحلیل‌ها و طراحی‌های ژئوتکنیکی استفاده می‌شود. این روش‌ها بخصوص به دلیل توانایی که در شبیه‌سازی توأم رفتارهای خطی و غیرخطی دارند، اخیراً مورد توجه مهندسان و پژوهشگران این عرصه قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، ارائه نرم‌افزارهای کامپیوتری با الگوی عددی که انعطاف‌پذیری زیادی در ساخت و تحلیل شرایط هندسی گوناگون دارند، شرایط را برای کاربرد این روش‌ها در طراحی‌های پیچیده فراهم کرده است. در گذشته محققان ترجیح می‌داده‌اند از مدل‌های آزمایشگاهی و روش‌های تحلیلی استفاده نمایند، ولی با گسترش روش‌های عددی و استفاده از رایانه‌ها با قدرت پردازش بالا، کاربرد روش‌های عددی در حل مسائل ژئوتکنیکی از جمله تحلیل اندرکنش سازه با محیط اطراف، در سال‌های اخیر توسعه زیادی یافته است. به عبارت دیگر، امروزه روش‌های عددی جز فراگیرترین و پرکاربردترین روش‌ها در ژئوتکنیک می‌باشند که با استفاده از این روش‌ها می‌توان جزئیات تنش و تغییر شکل را در نقاط مختلف یک مدل تعیین کرد.

اگر روش‌های عددی از بابت نوع معادلات به کار رفته و روش حل مسئله تقسیم‌بندی شود، می‌توان آنها را در دو دسته روش‌های صریح و روش‌های ضمنی تفکیک نمود. در روش‌های صریح، حل مسئله به کمک حل مستقیم معادله دیفرانسیلی که برای هر المان در نظر گرفته می‌شود انجام می‌گیرد. در این روش مشتق توابع با تفاضلات معادل آنها تقریب زده می‌شود. اساس این روش برای حل معادلات، استفاده از تقریب تابع با روش تیلور است. این در حالی است که در روش‌های ضمنی حل مسائل از طریق حل مستقیم یا معکوس ماتریس‌های پارامتریک با دخالت ماتریس سختی برای هر جزء از محیط صورت می‌گیرد (Itasca Consulting Group, 2017).

روش‌های عددی بر اساس الگوی معادلات به کار رفته به چهار روش المان محدود^۱، تفاضل

^۱Finite Element Method

محدود^۱، اجزاء مجزا^۲ و المان مرزی^۳ تقسیم می‌شوند که در بین روش‌های فوق، روش المان محدود جزء روش‌های ضمنی بوده و روش‌هایی مانند تفاضل محدود و اجزاء مجزا در دسته روش‌های صریح قرار می‌گیرند (Itasca Consulting Group, 2017). در این مدل‌سازی سعی بر آن شده است که با به کارگیری نرم‌افزار مناسب به مدل‌سازی و بررسی اندرکنش بین ابزار کشیدگی سنج و دوغاب و محیط اطراف آن پرداخته شود.

۵-۲ انتخاب نرم‌افزار مناسب مدل‌سازی عددی

انتخاب نوع نرم‌افزار به منظور مدل‌سازی بستگی به شرایط محیط مسئله و پارامترهای دخیل در آن دارد. امروزه نرم‌افزارهای زیادی برای حل مسائل ژئوتکنیکی وجود دارند که هر کدام دارای محدودیت‌ها و قابلیت‌هایی هستند. با توجه به هدف پژوهش که به بررسی اندرکنش بین دوغاب و محیط اطراف در یک محیط پیوسته می‌پردازد به طور معمول از نرم‌افزارهای المان محدود و تفاضل محدود که برای محیط پیوسته کاربرد دارند استفاده می‌شود. روش المان محدود و تفاضل محدود دارای شباهت و تفاوت‌هایی هستند که در ادامه به طور مختصر بیان می‌شود. هر دو روش، از یک سری معادلات دیفرانسیلی استفاده کرده و برای هر المان آنها را وارد معادلات ماتریسی می‌کند. با این کار نیروهای هر گره را به جابجایی‌های هر گره مرتبط می‌سازد. اگرچه معادلات تفاضل محدود از معادلات روش المان محدود مشتق شده است. ماتریس‌های حاصل برای یک ماده الاستیک مشابه، همان ماتریس‌ها در روش المان محدود است. با این حال روش تفاضل محدود در موارد زیر تفاوت دارد:

روش تفاضل محدود از روش مستقیم یا صریح و روش المان محدود از روش ماتریسی یا ضمنی برای حل معادلات استفاده می‌کند. به همین جهت مدل کردن رفتارهای پیچیده در روش تفاضل محدود به آسانی انجام می‌گیرد ولی با روش المان محدود به راحتی امکان پذیر نیست مانند: مسائلی که شامل چندین مرحله باشند، جابجایی‌ها و کرنش‌های بزرگ، رفتار مواد غیرخطی و سیستم‌های

^۱ Finite Difference Method

^۲ Discrete Element Method

^۳ Boundary Element Method

ناپایدار (حتی مواردی از تسلیم/ شکست در مناطق بزرگ یا ریزش کلی). همچنین به دلیل اینکه در روش تفاضل محدود ماتریس سختی کل تشکیل نمی‌شود زمان محاسبات کمتر است و حافظه کامپیوتری کمتری نیاز دارد. در هر مرحله نیز می‌توان تغییرات لازم را انجام داد و تغییر مکان‌ها و کرنش‌های بزرگ با تلاش محاسباتی نه چندان زیادی قابل ارزیابی است (Itasca Consulting Group, 2017). با توجه به موارد ذکر شده از روش تفاضل محدود و از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ که دقت خوبی در مدل‌سازی سطح مشترک و تحلیل نتایج دارد را برای مدل‌سازی اندرکنش دوغاب و محیط اطراف در نظر گرفته شده است.

۵-۳ معرفی نرم‌افزار $FLAC^{3D}$

برنامه $FLAC^1$ یک برنامه‌ی تفاضل محدود است که به دو صورت دوبعدی و سه‌بعدی برای محاسبات مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این برنامه توسط شرکت Itasca در سال ۱۹۸۱ به بازار آمد و انعطاف بالای این نرم‌افزار در مدل‌سازی و تحلیل مسائل ژئومکانیک و ژئوتکنیک از جمله در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، محاسبه تغییر شکل‌های بزرگ، در نظر گرفتن فشار آب حفره‌ای و ...، موجب گسترش کاربری آن در جامعه متخصصین علوم زمین شده است.

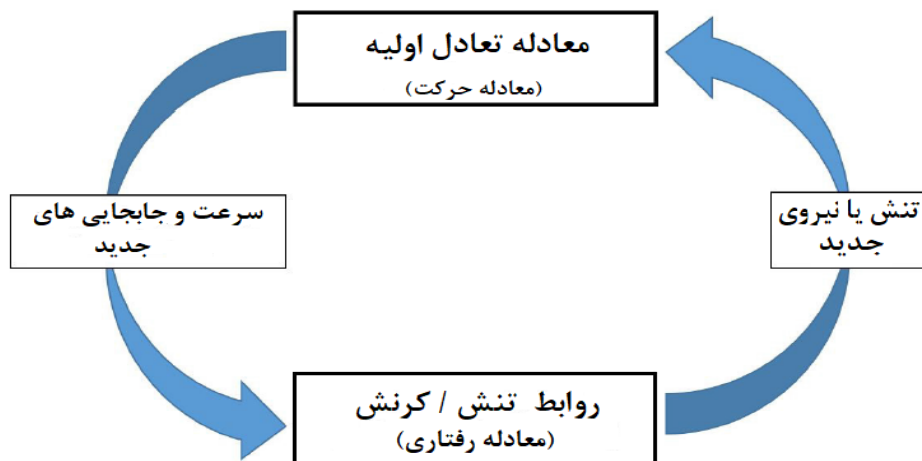
نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ می‌تواند برای شبیه‌سازی رفتار سازه‌های خاکی، سنگی و یا موارد دیگری که در زمان تسلیم ممکن است به حالت پلاستیک برسند، مورد استفاده قرار گیرد. از آنجایی که تحلیل در این نرم‌افزار بر مبنای روش آنالیز لاگرانژی انجام می‌شود، شرایط پلاستیک و ناپایداری می‌تواند با دقت زیادی مدل شود. این نرم‌افزار دارای مدل‌های پیش‌ساخته متنوعی است که برای نمونه می‌توان به مدل فضای خالی برای نمایش حفاری در شبکه و مدل تسلیم برشی و حجمی برای نمایش رفتار کرنش نرمی و نمایش گسیختگی برشی غیرقابل بازگشت و غیرخطی اشاره کرد (Itasca Consulting Group, 2017).

نرم‌افزار $FLAC$ دارای قابلیت‌های دیگری نیز است که می‌توان به چند نمونه از آن اشاره کرد:

¹ Fast Lagrangian Analysis of Continua

- زون‌هایی برای ایجاد سطح مشترک که از طریق آن می‌توان صفحات لغزش یافته یا جدا شده را شبیه‌سازی نمود.
- مدل‌های کرنش صفحه‌ای، تنش صفحه‌ای و تقارن محوری.
- مدل‌های آب زیرزمینی و تحکیم خاک.
- مدل‌های المان سازه‌ای برای شبیه‌سازی تکیه‌گاه‌های سازه‌ای (مانند حایل‌های تونل، سیستم‌های میخکوبی، راک بولت‌ها و یا پی‌های شمع کوبی شده).
- توانایی تحلیل دینامیکی مسائل و اندرکنش.
- توانایی مدل‌سازی ویسکوالاستیک و ویسکوپلاستیک (خزش).
- توانایی مدل‌سازی حرارتی و نیز مدل‌سازی توازن حرارتی و تنش مکانیکی و فشار منفذی.
- توانایی مدل‌سازی جریان دو فازه برای شبیه‌سازی جریان‌های دو فازه در محیط‌های متخلخل (برای مثال شبیه‌سازی دو جریان مختلف آب و نفت یا آب و گاز).
- برنامه‌ی FLAC همچنین دارای یک زبان برنامه‌نویسی قوی به نام FISH می‌باشد که مخفف عبارت FLACish است. با استفاده از زبان برنامه‌نویسی FISH کاربر قادر است تا توابع مورد نظر خود را در نرم‌افزار مدل نماید و یا حتی می‌تواند مدل‌های جایگزین شده توسط خود کاربر در برنامه اعمال شود (Itasca Consulting Group, 2017).
- توالی کلی محاسبات در FLAC به این صورت است که معادلات حرکت برای اولین بار به ایجاد سرعت و جابجایی از تنش‌ها و نیروها می‌پردازد. سپس نرخ کرنش از سرعت‌ها و تنش‌های جدید از نرخ‌های کرنش حاصل می‌شوند. برای هر چرخه دور حلقه یک گام زمانی^۱ در نظر گرفته می‌شود. چرخه کلی این توالی در شکل ۵-۱ نشان داده شده است.

^۱ Time step



شکل ۵-۱: چرخه اصلی در محاسبات صریح (Itasca Consulting Group, 2017).

۴-۵ فرض‌های مسئله

در این مدل‌سازی فرض شده که مدل از یک لایه همگن و خشک تشکیل شده است. به جای مدل‌سازی نشانگرهای عنکبوتی در مدل کشیدگی سنج مغناطیسی از حلقه‌های مغناطیسی استفاده شده است. همچنین هیچ تغییر حجم یا تغییرات خزشی در مدل لحاظ نشده است.

۵-۵ مراحل مدل‌سازی و حل مسئله

نصب کشیدگی سنج مغناطیسی (نشست سنج) و میله‌ای گمانه‌ای، شامل حفر گمانه در خاک موجود، ریختن دوغاب، تعبیه نشانگرها و ... است. برای مدل‌سازی یک پرکننده گمانه با دوغاب و یک لایه خاک عوامل متعددی باید در نظر گرفته شود. این عوامل شامل هندسه مدل، شرایط مرزی، تنش‌های میدانی اولیه، مشخصات خاک و دوغاب و خواص سطح مشترک خاک/دوغاب است. در ادامه هر یک از عوامل شرح داده می شود.

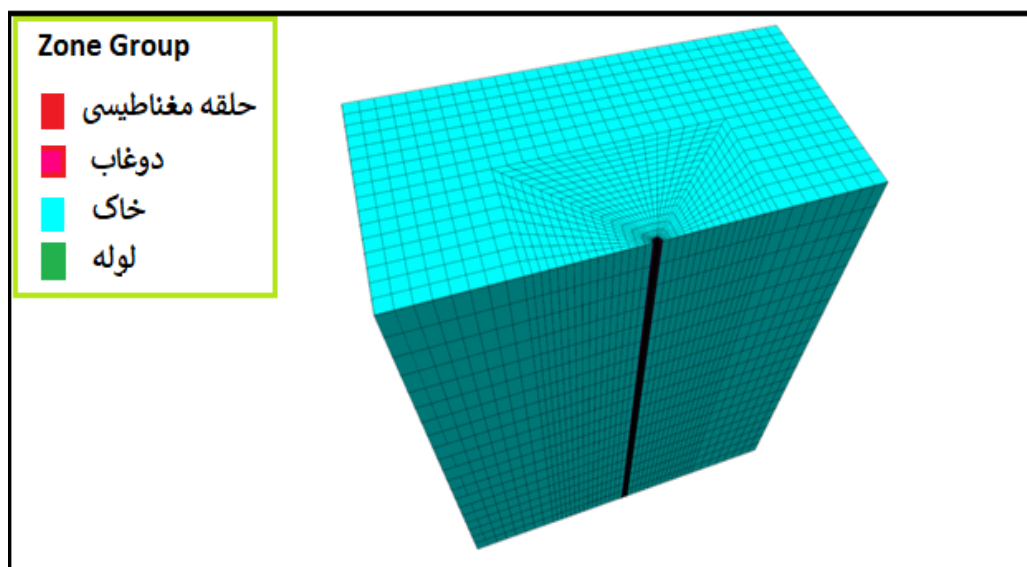
۵-۵-۱ هندسه و شبکه‌بندی مدل

اولین مرحله در اجرای یک مدل، ساخت هندسه آن است، شبکه‌بندی در این نرم‌افزار همزمان با هندسه‌سازی انجام گرفته و تعیین چگالی المان بندی به عهده‌ی کاربر است. همواره باید مطابق با اصول و قواعد حاکم بر این نرم‌افزار، یک شبکه‌بندی مناسب را پیشنهاد داد. برای این منظور چگالی

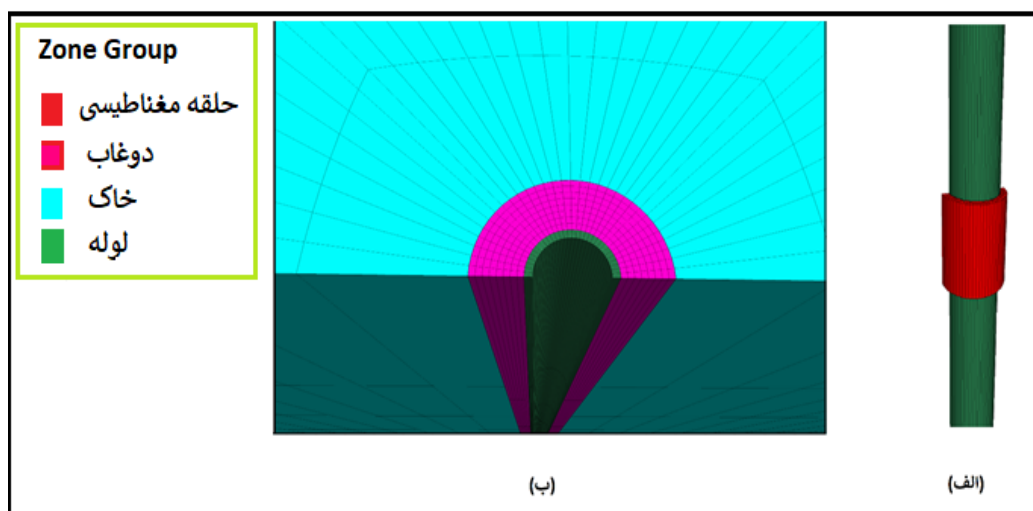
شبکه‌بندی مدل باید توزیع مناسبی داشته باشد و مقادیر منطقی برای ابعاد زون‌ها تعیین شود تا بتوان مناسب‌ترین شبکه را برای مدل ساخت. هرچه چگالی شبکه‌بندی بیشتر باشد جواب دقیق‌تری از نرم‌افزار به دست خواهد آمد. به همین منظور تحلیل حساسیتی بر روی اندازه شبکه بندی صورت گرفته و تعداد شبکه بهینه تعیین شده است. ابعاد مدل باید به گونه‌ای انتخاب شود تا تأثیر شرایط مرزی بر روی نتایج به حداقل ممکن برسد در مراجع مختلف برای دور شدن از تأثیر شرایط مرزی پیشنهاد شده است که ابعاد مدل بین ۸ تا ۱۰ برابر شعاع گمانه در نظر گرفته شود (Itasca Consulting Group, 2017).

۵-۱-۵-۱ مدل کشیدگی سنج مغناطیسی

مدل کشیدگی سنج مغناطیسی شامل لوله، حلقه مغناطیسی و دوغاب پرکننده بین لوله و جداره گمانه است. برای مدل‌سازی به علت وجود تقارن، تنها نیمی از مدل ایجاد و مورد تحلیل قرار می‌گیرد که در کاهش حجم عملیات تأثیر زیادی دارد. مدل مورد نظر با طول و عرض به ترتیب ۸ متر و ۴ متر و عمق ۱۰ متر ساخته شده است. گمانه‌ای با قطر ۱۵۰ میلی‌متر که با دوغاب سیمان- بنتونیت به ضخامت ۴ سانتی‌متر پر شده، در مدل در نظر گرفته شده است. همچنین لوله دسترسی به طول ۱۰ متر و با قطر ۷ سانتی‌متر در داخل گمانه قرار داده شده است. برای تعبیه نشانگرهای مغناطیسی به منظور ساده سازی از یک حلقه مغناطیسی که به لوله دسترسی متصل می‌شود استفاده شده است. این حلقه‌ها در فواصل ۲ و ۵ متری از سطح مدل قرار داده شده است. هندسه کلی و اجزای مدل در شکل ۵-۲ و شکل ۵-۳ نشان داده شده است. محیط اطراف گمانه با ۲۳۰۴۰ المان مربعی ساخته شده که فاصله شبکه‌ها در اطراف گمانه ۱۲/۵ سانتی‌متر و در فاصله دورتر ۲۵ سانتی‌متر است. همچنین برای شبکه‌بندی دوغاب، لوله و حلقه که در شکل ۵-۳ نشان داده شده است به ترتیب از ۸۸۳۲، ۲۵۶۰ و ۱۲۸ المان استفاده شده که فاصله شبکه‌ها از هم نیز در دوغاب ۵ میلی‌متر، در لوله ۱/۵ میلی‌متر و در حلقه ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۵-۲: هندسه کلی مدل کشیدگی سنج مغناطیسی

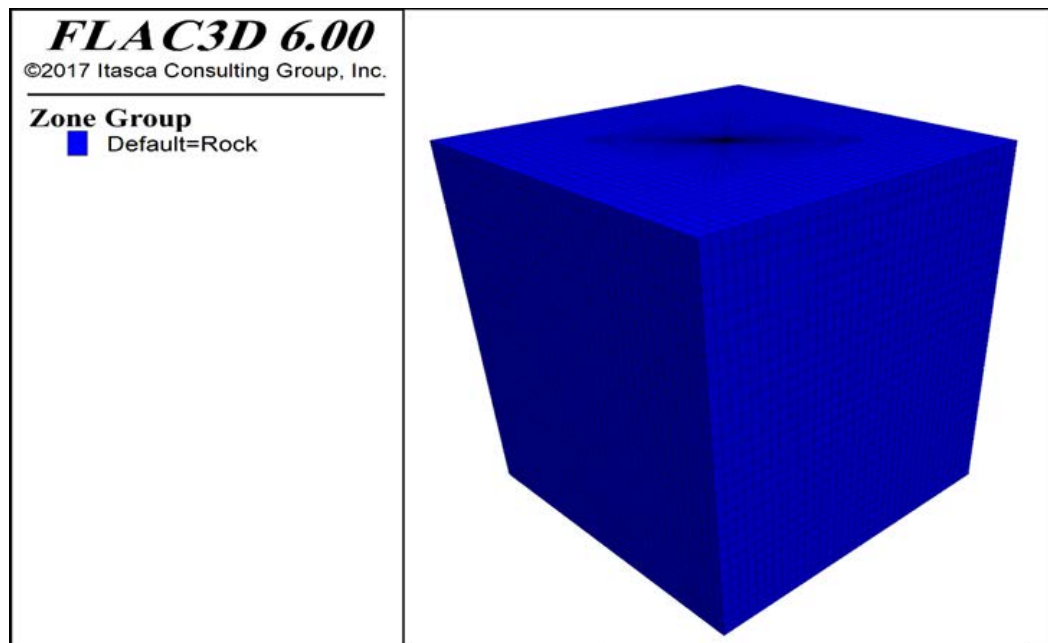


شکل ۵-۳: اجزای مدل کشیدگی سنج مغناطیسی، (الف) حلقه مغناطیسی متصل به لوله، (ب) لوله و دوغاب

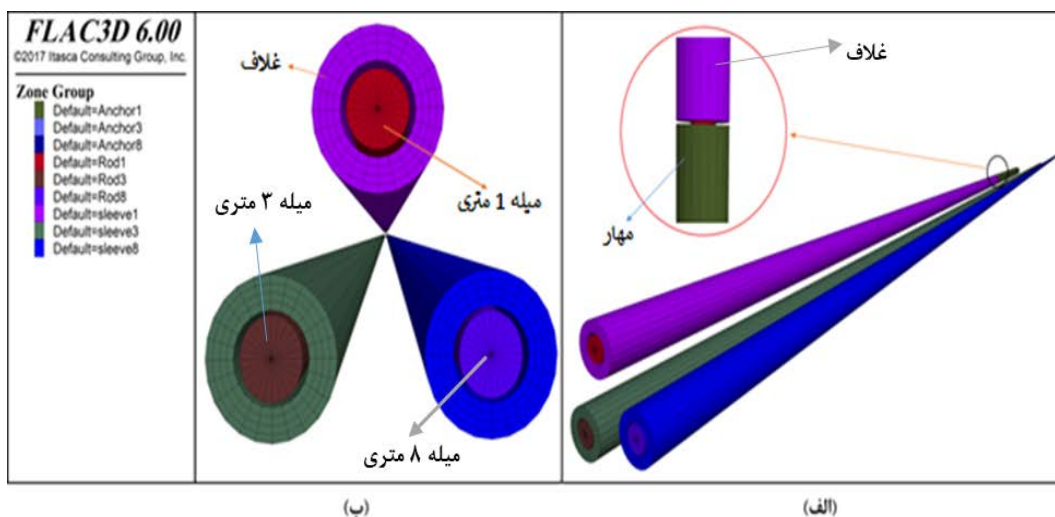
۵-۱-۲ مدل کشیدگی سنج میله‌ای

همان‌طور که در فصل دوم اشاره شده، کشیدگی سنج‌های میله‌ای می‌توانند بیش از ۶ نقطه را اندازه‌گیری کنند که در عمل تعداد نقاط اندازه‌گیری با اندازه گمانه، نوع و تعداد مهار مورد استفاده، قطر لوله محافظ و ... محدود می‌شود. به‌طور معمول کشیدگی سنج‌های میله‌ای به‌صورت ۳ نقطه‌ای در گمانه‌ای به قطر ۷۶ میلی‌متر نصب می‌شوند. برای مدل‌سازی نیز سعی شده است که تمام مراحل که در پروژه‌های عملی صورت می‌گیرد رعایت شود. قسمت‌های تشکیل دهنده کشیدگی سنج میله‌ای

شامل میله، لوله محافظ (غلاف) و مهار است که ابعاد آن با توجه به مشخصاتی که در جدول ۲-۳ فصل دوم ارائه شده در نظر گرفته شده است. مدل مورد نظر در طول و عرض به ترتیب ۸ و ۴ متر و ارتفاع ۱۰ متر ساخته شده و گمانه‌ای به قطر ۷۶ میلی‌متر در مرکز مدل ایجاد شده است (شکل ۴-۵). میله‌های کشیدگی سنج نیز در طول‌های ۱، ۳ و ۸ متری و به قطر ۸ میلی‌متر و همچنین برای محافظت از میله و عدم درگیری با دوغاب، غلافی تقریباً به اندازه طول میله‌ها و به قطر ۱۶/۷ میلی‌متر و ضخامت ۳/۵۵ میلی‌متر مدل شده‌اند. برای هندسه مهار نیز طول ۵۴ سانتی‌متر و قطر ۱۶ میلی‌متر در نظر گرفته شده که به انتهای میله‌ها متصل می‌شود. برای اتصال میله به مهار از المان سطح مشترک با چسبندگی بسیار بالا استفاده شده است. همچنین برای جلوگیری از تماس بین غلاف و مهار، فاصله ۰/۵ میلی‌متری بین مهار و غلاف در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب نقطه درگیری میله ابزار، مهار گیرداری با دوغاب پرکننده گمانه می‌باشد.

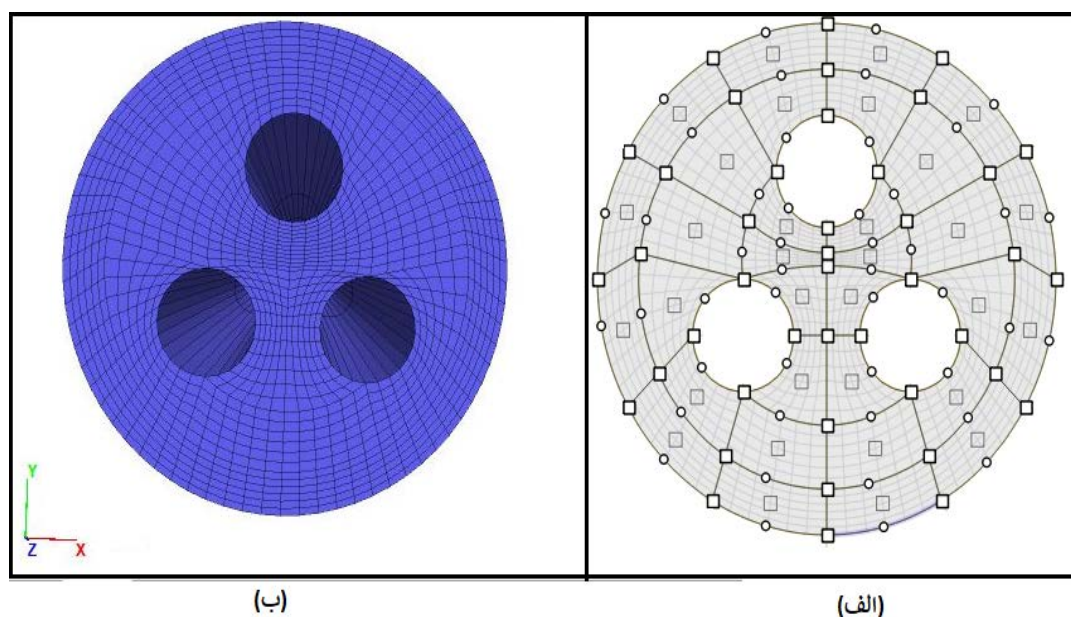


شکل ۴-۵: هندسه کلی مدل کشیدگی سنج میله‌ای

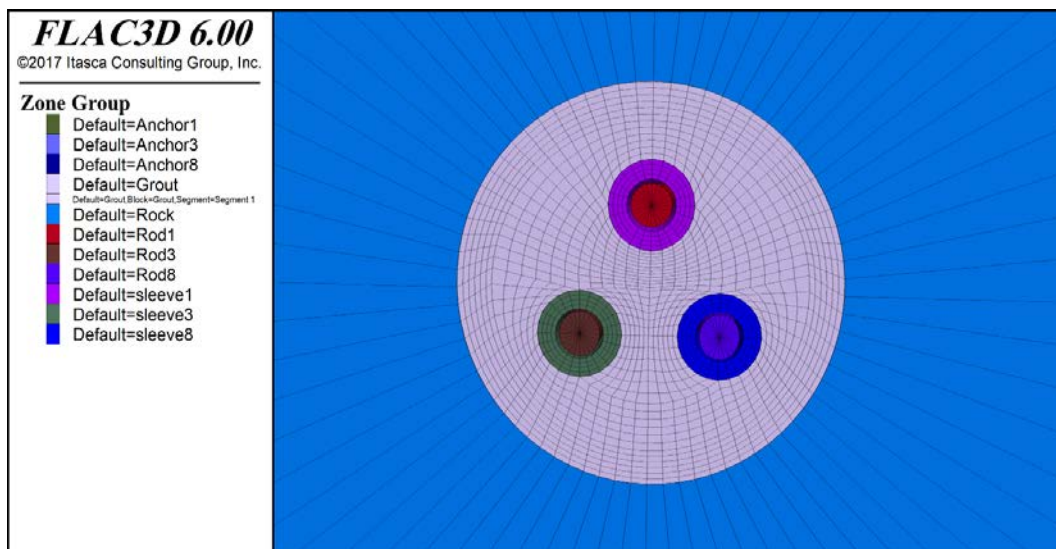


شکل ۵-۵: هندسه میله و غلاف و مهار در کشیدگی سنج میله. الف) نمای دور، ب) نمای نزدیک

با توجه به اینکه میله‌های کشیدگی سنج ۳ نقطه‌ای، هر میله با یک فاصله‌ای نسبت به هم قرار می‌گیرند، ساخت هندسه دوغاب با استفاده از کد دستوری امکان پذیر نخواهد بود، به همین منظور از گزینه Extrusion در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ استفاده شده است. به این ترتیب در ابتدا مدل دوغاب به صورت دوبعدی در نرم‌افزار AutoCad طراحی شده و در نهایت به نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ فراخوانده و در منوی Extrusion مش بندی شده است. (شکل ۵-۶). همچنین در شکل ۵-۷ نیز هندسه کلی مدل همراه با میله و دوغاب و ... نشان داده شده است.



شکل ۵-۶: ساخت هندسه دوغاب در Extrusion. ب) مدل نهایی هندسه دوغاب



شکل ۵-۷: هندسه میله‌ها و غلاف همراه با دوغاب در مدل

۵-۵-۲ مدل سازی رفتار مواد

برای مدل سازی هر یک از اجزای تشکیل دهنده مدل، باید مدل رفتاری مصالح تعریف و اختصاص داده شود. به همین منظور برای خاک، دوغاب، لوله و حلقه‌های مغناطیسی هر یک جداگانه مدل رفتاری تعریف می‌گردد. برای تحلیل مسائل اندرکنش خاک-سازه پیچیدگی در رفتار خاک منجر به توسعه مدل‌های خاک بسیاری بر اساس معیارها و مدل‌های رفتاری الاستیسیته، پلاستیک و ویسکو-الاستیک شده است. مدل سازی خاک در روش‌های پیچیده و متعددی است. خاک‌ها برای تمام محدوده بارگذاری، الاستیک خطی و پلاستیک کامل نیستند. در واقع رفتار واقعی خاک پیچیده است و انواع زیادی از رفتار را زمانی که تحت شرایط مختلف قرار می‌گیرد را نشان می‌دهد. مدل‌های ساختاری مختلفی توسط پژوهشگران مختلفی برای توصیف جنبه‌های مختلف رفتار خاک پیشنهاد شده است.

دانکان^۱ (۱۹۹۴) تقریباً ۲۰۰۰ مقالات مرتبط با کاربردهای عملی از مدل‌های ساختاری در مدل سازی را بررسی کرد. او بیان نمود مدل موهر کولمب، مدل هذلولوی^۲ و مدل اصلاح شده Cam

^۱ Duncan

^۲ Hyperbolic

Clay مدل‌های ساختاری هستند که معمولاً استفاده می‌شوند (Duncan, 1994). در این مدل‌سازی از مدل رفتاری موهر-کولمب برای خاک استفاده شده است. مدل موهر-کولمب یک مدل الاستیک خطی-پلاستیک کامل می‌باشد که مورد استفاده ترین مدل ساختاری است که در مدل‌سازی محیط خاک استفاده می‌شود. این مدل یکی از ساده‌ترین مدل‌های ساختاری خاک است که تنها دو پارامتر مقاومتی برای توصیف رفتار پلاستیک نیاز دارد. پژوهشگران با استفاده از آزمون سه محوری نشان دادند مجموعه تنش‌ی که باعث گسیختگی در نمونه واقعی خاک می‌شود به خوبی با منحنی شکست پیدا شده با مدل موهر کولمب همخوانی دارد (Brinkgreve, 2005).

رولینز^۱ و همکاران (۲۰۰۶) پیشنهاد کرده‌اند که مدل موهر کولمب خاک به‌طور معقول بیان‌کننده رفتار خاک تا جابجایی حدود ۸ mm می‌باشد. این نشان می‌دهد که در هر حرکت جانبی القا شده کمتر از ۱۰ mm مدل خاک موهر-کولمب می‌تواند به‌منظور نمایش رفتار خاک با دقتی معقول استفاده شود (Rollins et al., 2006). همچنین برای توده سنگ نیز از مدل رفتاری موهر-کولمب و هوک-براون به‌طور گسترده استفاده می‌شود. در این مدل‌سازی با توجه به اینکه محیط پیوسته است و درزه‌دار نمی‌باشد و همچنین عمق محدوده مدل‌سازی زیاد نبوده و در نتیجه تنش‌های محیط بالا نیستند. از مدل رفتاری موهر کولمب برای رفتار توده سنگ استفاده شده است (Itasca Consulting Group, 2017).

عموماً کشیدگی سنج مغناطیسی در خاک استفاده می‌شود به همین منظور برای این نوع کشیدگی سنج سه نوع خاک در نظر گرفته شده است. ابزار کشیدگی سنج‌های میله‌ای قابلیت کاربرد هم در سنگ و هم در خاک را دارا می‌باشند از این رو رفتار هم خاک و هم سنگ برای محیط اطراف گمانه در نظر گرفته شده است. برای تعیین مدل رفتاری دوغاب نیز با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته بر روی نمونه‌های دوغابی و خواص خمیری بنتونیت در دوغاب از مدل رفتاری موهر کولمب برای شبیه‌سازی حالت الاستیک و پلاستیک دوغاب استفاده شده است. برای تعیین چگالی، مدول و ضریب

^۱ Rollins

پواسون از نتایج مطالعه آزمایشگاهی فصل چهارم استفاده است. مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سطح دوغاب نیز به دلیل وجود محدودیت در انجام آزمایش سه محوره از نتایج آزمون سه محوره انجام شده در دانشگاه علم و صنعت استفاده شده است (غیاثیان و امین طاهری، ۱۳۸۸). همچنین برای مدل رفتاری لوله و میله نیز مدل رفتاری الاستیک خطی به کار گرفته شده است. پارامترهای ژئومکانیکی مصالح تشکیل دهنده محیط اطراف گمانه برای سه نوع خاک (نرم، متوسط و سخت) و توده سنگ ضعیف و متوسط در جدول ۵-۱ و نیز پارامترهای مربوط به لوله و حلقه میله و مهار که از شرکت سازنده ابزار دقیق Soil Instruments Ltd استخراج شده در جدول ۵-۲ ارائه شده است.

جدول ۵-۱: خواص مواد به کار رفته در مدل سازی (Hoek, 2000*; Subramanian, 2016; غیاثیان، امین طاهری ۱۳۸۸)

ردیف	پارامتر	دوغاب	خاک نرم (سیلت)	خاک متوسط (رس متوسط)	خاک سخت (ماسه متراکم)	توده سنگ ضعیف*	توده سنگ متوسط*
۱	چگالی (Kg/m^3)	۱۳۰۰	۱۷۵۰	۱۸۰۰	۲۰۰۰	۲۵۷۸	۲۷۸۰
۲	مدول یانگ (MPa)	-	۱۰	۴۰	۸۰	۶۰۰	۱۰۰۰۰
۳	ضریب پواسون	۰/۲۶	۰/۳۵	۰/۳	۰/۲۵	۰/۳۷	۰/۳
۴	زاویه اصطکاک (درجه)	۸	۲۵	۱۷	۳۸	۲۱/۱۷	۳۸/۴
۵	زاویه اتساع (درجه)	-	۰	۰	۱۵	-	-
۶	چسبندگی (kPa)	۲۰۰	۳	۳۰	۰	۲۷۲	۲۱۲۲

جدول ۵-۲: خواص مکانیکی به کار رفته در مدل رفتاری (Soil Instruments Ltd. 2017).

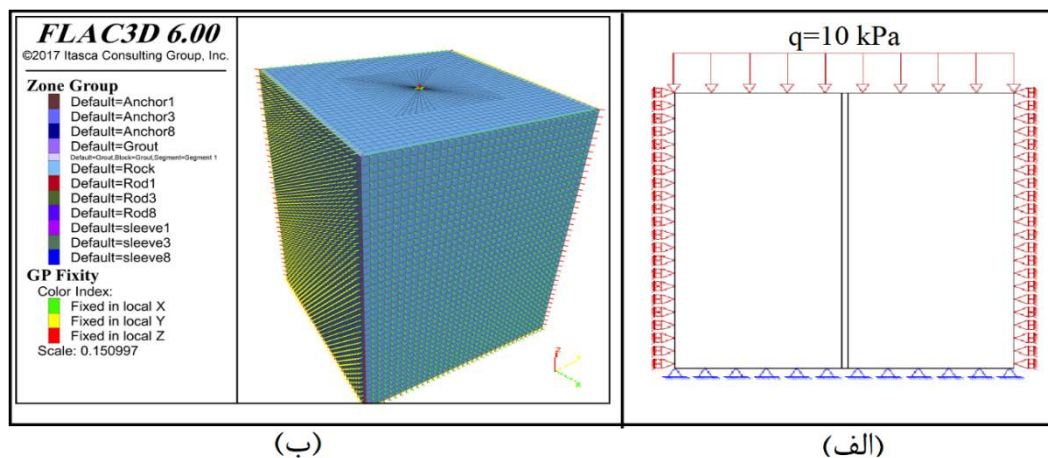
ردیف	پارامتر	واحد	لوله ABS	حلقه مغناطیسی	میله فولادی ضدزنگ	لوله محافظ (PVC)	مهار (گالوانیزه)
۱	چگالی	Kg/m ³	۱۰۴۰	۱۴۰۰	۷۸۱۰	۱۴۰۰	۷۱۳۵
۲	مدول یانگ	GPa	۲/۳	۲۸۰۰	۲۰۰	۲/۴۸	۲۰۰
۳	ضریب پواسون	-	۰/۳۵	۰/۴	۰/۳	۰/۳	۰/۲۹

۵-۳ شرایط مرزی و اولیه

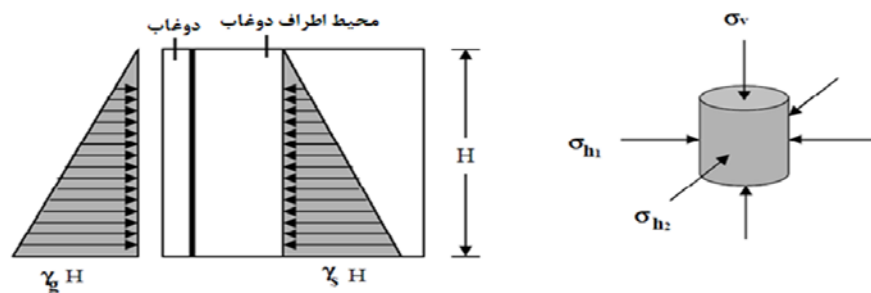
در یک مدل عددی، شرایط مرزی شامل مقادیر متغیرهای میدانی مانند میدان جابجایی، تنش، سرعت، فشار منفذی و ... است. که در مرزهای یک شبکه عددی تعریف می‌شوند. مرز به دو صورت واقعی و مصنوعی در مدل ایجاد می‌شود که مرزهایی مانند سطح زمین یا سطح گمانه مرزهای واقعی به شمار می‌روند، درحالی‌که برای بستن محدوده زون‌ها در یک محیط بی‌نهایت، از مرز مصنوعی استفاده می‌شود. در هر دو مدل کشیدگی سنج مغناطیسی و میله‌ای، مرزها در دو طرف مدل به‌صورت غلتکی در جهت $y \times x$ و کف مدل در جهت z بسته و ثابت شدند. سطح مدل به‌صورت آزاد در نظر گرفته شده که در شکل ۵-۸ نشان داده شده است. همچنین در مدل کشیدگی سنج میله‌ای، غلاف اطراف میله به‌صورت ثابت در نظر گرفته شده و میله به‌صورت آزادانه قادر به حرکت در غلاف است.

در اکثر پروژه‌های مهندسی قبل از حفر و ایجاد سازه با تنش‌های برجا مواجه خواهیم بود. با اعمال شرایط اولیه سعی می‌شود تنش‌های برجا شبیه‌سازی شوند. شبیه‌سازی حالت تنش در توده خاک و سنگ با استفاده از دستور initial انجام می‌شود. فشار روباره همان‌طور که در شکل ۵-۹ نشان داده شده است، در هر گره به شکل سه محوره توصیف می‌شود، یعنی به‌صورت یک تنش قائم و دو تنش

افقی تعریف می‌شوند. تنش‌های افقی معمولاً به عنوان کسری یا مضربی از تنش قائم روباره اعمال می‌شود بطوریکه با مشخص کردن ضریب فشار جانبی زمین (K_s) مقدار تنش افقی نیز به دست می‌آید. ضریب فشار جانبی زمین در سکون برای خاک دارای چسبندگی کمتر معمولاً بین 0.4 و 0.6 و برای خاک چسبنده بین 0.4 و 0.8 است (Bowles, 1996). به جهت سادگی یک ضریب فشار جانبی زمین ثابت برابر 0.5 در نظر گرفته شده است. این مقدار برای خاک و سنگ‌های معمولاً بارگذاری شده و دست نخورده که معمولاً توجه بیشتری در رابطه با نشست شده بسیار رایج است.



شکل ۵-۸: ثابت شدن مرزها در سه جهت z, y, x (الف) شماتیکی از بستن غلظتی و ثابت مرزها، (ب) ثابت کردن مرز مدل کشیدگی سنج میله‌ای



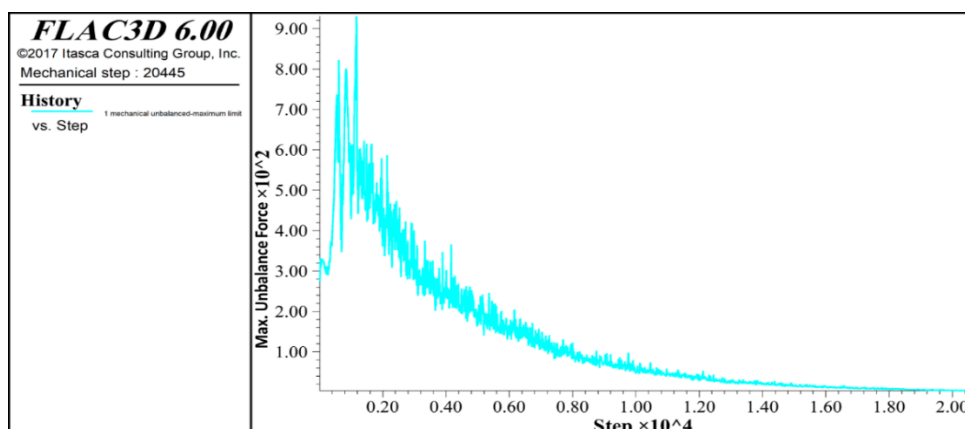
شکل ۵-۹: اعمال مدل‌سازی حالت تنش اولیه در مدل‌سازی (Bayoumi, 1999).

۵-۴ بررسی تعادل اولیه مدل

پس از اعمال مدل رفتاری و ثابت کردن مرزهای بلوک مدل، به منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی، بلوک ساخته شده از مدل بایستی بدون اعمال هیچ‌گونه شرایط اجرایی یکبار حل شود، تا جابجایی‌ها

و تنش‌های محیط به تعادل برسند. هر گره در مدل مقادیری از نیرو، زون‌ها، المان‌ها، جاذبه و غیره دریافت می‌کند. این نیروها با یکدیگر جمع شده و منجر به تشکیل شبکه‌ای از نیروها می‌شوند که بر هر گره عمل می‌کنند. به این نیروها، نیروهای نامتعادل^۱ گفته می‌شود. در مدل‌های ژئوتکنیکی برای تحقق شرط تعادل محیط، بایستی نیروهای نامتعادل در مدل بعد از طی گام‌های زمانی مشخصی به صفر میل کند. صفر شدن نیروهای نامتعادل را می‌توان یکی از ملاک‌های صحت مدل‌سازی‌های استاتیکی ژئومکانیکی در نظر گرفت. همچنین می‌توان از شاخص‌های دیگری مانند سرعت در گره‌ها و همچنین از مرزبندی‌های^۲ تنش و جابجایی قائم مدل استفاده کرد. شکل ۵-۱۰ نیروهای نامتعادل مدل را به‌طور نمونه برای مدل کشیدگی سنج مغناطیسی نشان می‌دهد که بعد از گام‌های زمانی به عنوان نمونه ۲۰۴۴۵ سیکل محاسباتی به صفر میل کرده و در نتیجه به تعادل استاتیکی رسیده است. همچنین مرزبندی جابجایی و تنش در راستای محور Z مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به شکل ۵-۱۱ می‌توان مشاهده نمود که با افزایش عمق مقدار تنش افزایش و مقدار جابجایی کاهش می‌یابد. برای تأیید مقادیر مرزبندی تنش از فرمول (۵-۱) مقدار تنش قائم در اعماق مختلف محاسبه شده و با مقدار خروجی نرم‌افزار مقایسه شده است.

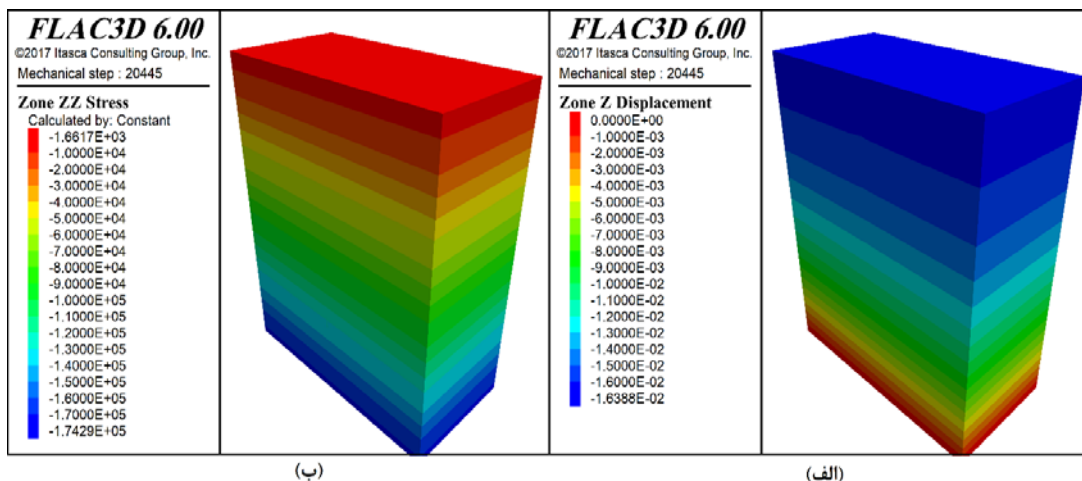
$$\sigma_v = \gamma h \quad (۵-۱)$$



شکل ۵-۱۰: نمودار تغییرات نیروهای نامتعادل مدل کشیدگی سنج مغناطیسی

^۱ Unbalance Force

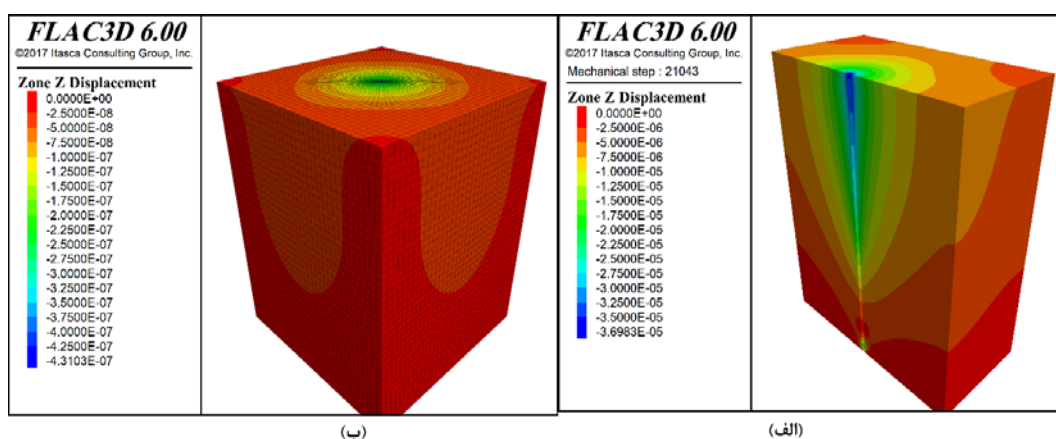
^۲ contour



شکل ۵-۱۱: (الف) مرزبندی جابجایی در راستای محور z، (ب) مرزبندی تنش در راستای محور z

۵-۵-۵ مرحله حفاری گمانه و نصب ابزار

پس از اطمینان از شرایط تعادل، مدل تحت حفاری قرار می‌گیرد. به دلیل اینکه در واقعیت، زمین قبل از تنش‌زایی در حالت سکون و بدون جابجایی است، پس سرعت و جابجایی‌هایی که در نرم‌افزار ناشی از نیروهای وارد بر گره برای به تعادل رسیدن به وجود می‌آید باید صفر شوند. درنهایت گمانه به شعاع ۷/۵ سانتی‌متر طی یک مرحله حفاری می‌گردد. تأثیر حفاری گمانه بر جابجایی و تنش محیط اطراف گمانه در شکل ۵-۱۲ نشان داده شده است. پس از حفاری و به تعادل رسیدن مدل، لوله و حلقه مغناطیسی و دوغاب که هندسه آنها در شکل ۵-۳ نشان داده شده است، به مدل اضافه می‌شود.



شکل ۵-۱۲: تأثیر حفاری گمانه بر جابجایی محیط (الف) کشیدگی سنج مغناطیسی، (ب) کشیدگی سنج میله‌ای

۵-۶ مدل سازی سطح مشترک

مدل سازی دقیق المان سطح مشترک بین خاک/سنگ - سازه برای رفتار یکنواخت و یا چرخه‌ای یک جنبه مهم در تلاش برای درک رفتار اندرکنش خاک-سازه شناخته می‌شود. بنابراین انتخاب یک روش مدل سازی مؤثر و مدل ساختاری سطح مشترک خاک-سازه مساله‌ای است که در سال‌های اخیر با توجه به پیشرفت‌های سریع در روش‌های عددی توجه ویژه‌ای شده است. نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ سطح مشترک را به صورت مجموعه‌ای از المان‌های مثلثی در نظر می‌گیرد که هر کدام از این المان‌ها توسط سه گره تعریف می‌شوند. المان‌های سطح مشترک به سطح زون متصل می‌شوند که دو المان مثلثی سطح مشترک برای هر سطح چهارضلعی زون لازم است. زمانی که سطح شبکه‌ای در تماس با یک المان سطح مشترک باشد، ناحیه تماس در گره‌های سطح مشترک که شامل سختی نرمال، سختی برشی و خصوصیات لغزشی است، شناسایی می‌شود.

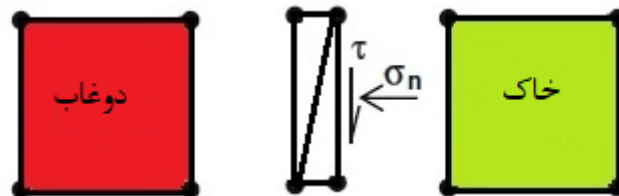
رابطه اساسی تماس بین گره سطح مشترک و سطح یک زون که به عنوان رویه و وجه هدف^۱ شناخته می‌شود، تعریف می‌گردد. در هر لحظه میزان نفوذ عمودی مطلق و سرعت برشی نسبی برای هر گره سطح مشترک و سطح متصل به آن محاسبه می‌شود. مدل رفتاری سطح مشترک از روی این دو مقدار، بردار نیروی نرمال و نیروی برشی را تعیین می‌کند. مدل رفتاری سطح مشترک به وسیله معیار خطی برشی کولمب، زاویه اصطکاک (φ_i) ، چسبندگی (c_i) ، زاویه اتساع (ψ_i) ، مقاومت کششی (σ_t) ، سختی نرمال (k_n) و سختی برشی (k_s) و مقاومت برشی تعریف می‌شود.

سطح مشترکی که دو صفحه پیوسته را از هم جدا می‌کند، زمانی که تنش برشی سطح مشترک از مقاومت برشی در راستای ناپیوستگی بیشتر شود لغزش مماسی رخ می‌دهد. بر طبق مدل اصطکاکی کولمب، تا زمانی که تنش برشی سطح مشترک به مقدار بحرانی برسد سطوح تماس، لغزشی روی یکدیگر ندارند. تنش برشی بحرانی $(\tau_{بحرانی})$ برابر تنش نرمال برشی (σ_n) در ضریب اصطکاک $(\tan \delta)$

^۱ Target face

که δ زاویه اصطکاک سطح مشترک است (Bayoumi, 1999).

$$\tau_{\text{بحرانی}} = \sigma_n \tan \delta \quad (2-5)$$



شکل ۵-۱۳: المان سطح مشترک بین خاک و دوغاب (Bayoumi, 1999. Modified).

در مدل اصطکاکی الاستیک-پلاستیک کامل کولمب وقتی که تنش برشی به حداقل مقدار مؤلفه اصطکاکی ($\sigma_n \tan \delta$) یا مقاومت برشی سطح مشترک ($\tau_{\text{بحرانی}}$) برسد لغزش سطح مشترک رخ می‌دهد. این مدل به‌طور موفقیت‌آمیز برای تجزیه و تحلیل رفتار اندرکنش خاک/شمع و مدل اصطکاک پوسته انتهایی تکیه‌گاه شمع استفاده شد (Poulos, 1980).

برای محاسبه مقادیر مربوط به سختی نرمال (K_n) و سختی برشی (K_s) در سطح مشترک از پارامتری به نام سختی معادل استفاده می‌شود به‌طور مفهومی سختی معادل مقدار سختی سخت‌ترین زون موجود در مرز مورد بررسی است و مقدار آن از رابطه (۵-۳) به دست می‌آید.

$$E_s = \max \left[\frac{(K + \frac{4}{3}G)}{\Delta Z_{\min}} \right] \quad (3-5)$$

که در آن K و G به ترتیب مدول‌های حجمی و برشی زون‌های مجاور فصل مشترک و $\Delta Z_{\min}$ کمترین عرض زون در جهت قائم است. در نهایت مقادیر مربوط به سختی برشی و سختی نرمال برابر است با: (Itasca Consulting Group, 2017).

$$K_n = K_s = 10E_s \quad (4-5)$$

برای تعیین خصوصیات سطح مشترک بین دوغاب و لوله از آزمایش برون‌رانی که در بخش ۴-۷ فصل چهارم انجام شده، استفاده شده است. با توجه به رابطه (۴-۲) مقدار چسبندگی سطح مشترک برابر با مقدار تنش برشی سطح مشترک در نظر گرفته شده است همچنین برای تعیین سختی نرمال و

برشی سطح مشترک بین دوغاب و لوله از نتایج آزمایش برون رانی و رابطه (۵-۵) استفاده می شود
(Itasca Consulting Group, 2017):

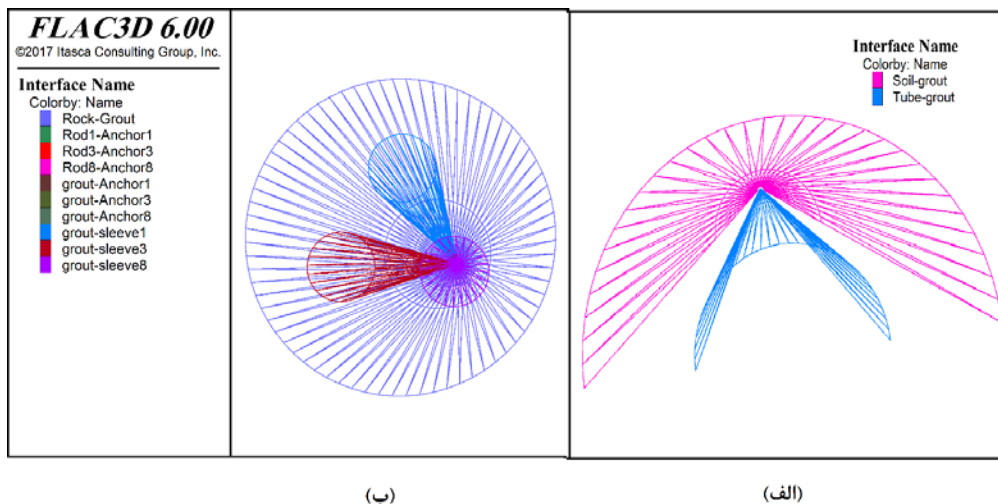
$$K_s = K_n = \sigma_n / u_n \quad (۵-۵)$$

که:

σ_n : تنش عمودی اعمالی

u_n : جابجایی عمودی است.

برای مدل کشیدگی سنج مغناطیسی دو سطح مشترک بین خاک - دوغاب و لوله - دوغاب در نظر گرفته شده است (شکل ۵-۱۴-الف). همچنین برای کشیدگی سنج میله‌ای سطح مشترک بین دوغاب و محیط اطراف، غلاف و دوغاب، مهار و دوغاب تعریف شده است که در شکل ۵-۱۴-ب) نشان داده شده است.

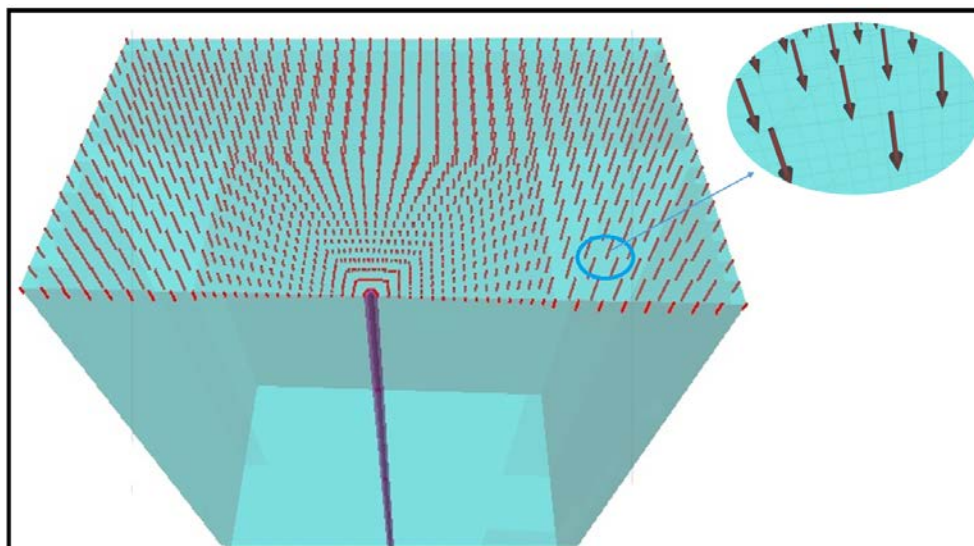


شکل ۵-۱۴: مدل سازی سطح مشترک در مدل الف) کشیدگی سنج مغناطیسی، ب) کشیدگی سنج میله‌ای

۵-۵-۷ بارگذاری

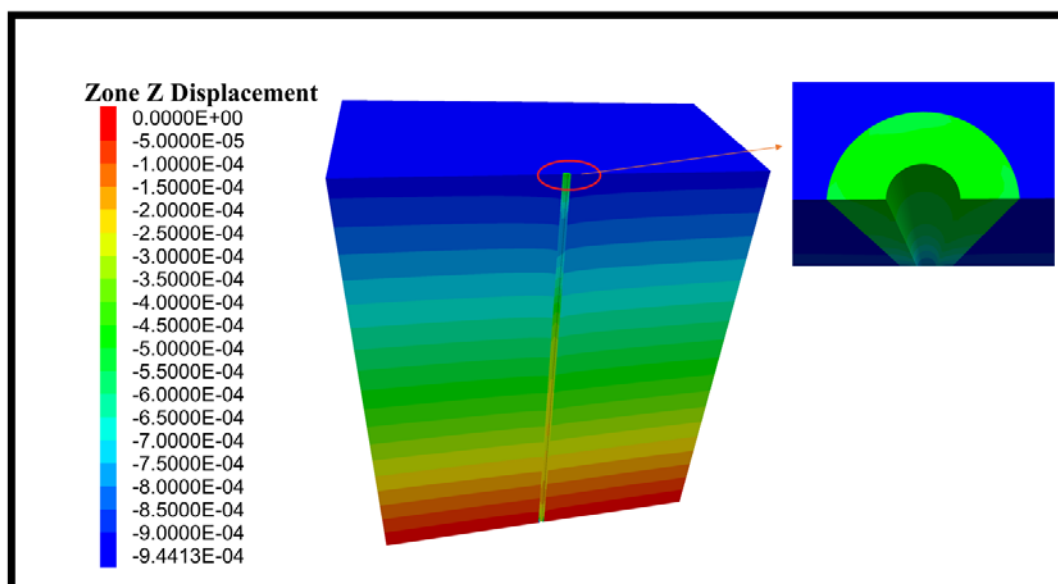
به طور معمول کشیدگی سنج‌ها در زیر پی‌ها و ... قرار می گیرند و جابجایی که در محیط ناشی از بار وارده یا وزن پی ایجاد می شود را اندازه گیری می کنند. به همین منظور برای بررسی جابجایی در محیط و دوغاب، محیط اطراف گمانه در هر دو مدل تحت سربار یکنواختی به طور مثال برابر با ۱۰

کیلو پاسکال قرار داده می‌شود که طرحی از آن به صورت شماتیک در شکل ۵-۸-الف) و نیز به عنوان نمونه از مدل کشیدگی سنج مغناطیسی در شکل ۵-۱۵ نشان داده شده است.

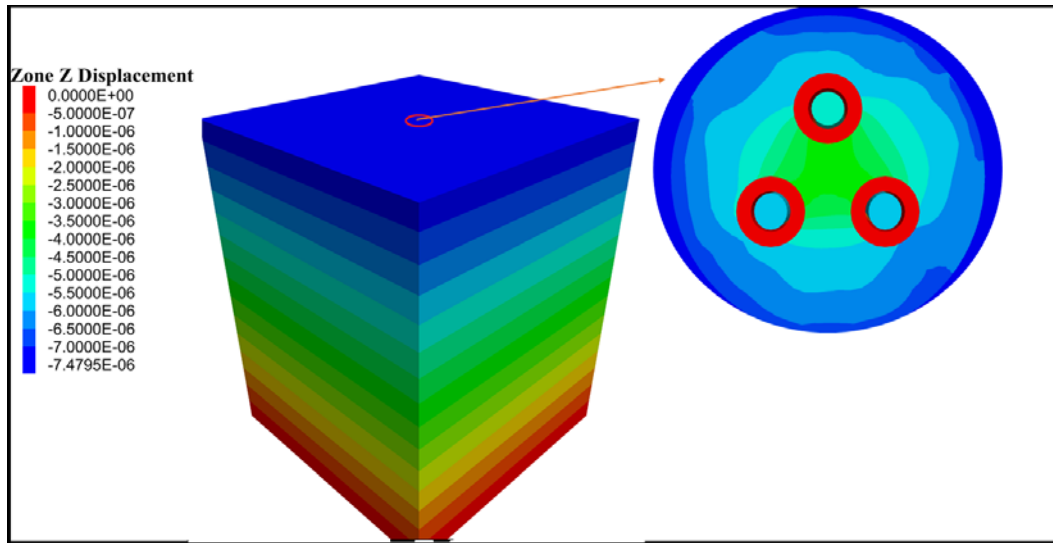


شکل ۵-۱۵: اعمال بار گسترده بر روی سطح مدل کشیدگی سنج مغناطیسی

مرزبندی جابجایی در جهت قائم پس از بارگذاری، برای کشیدگی سنج مغناطیسی و کشیدگی سنج میله‌ای در توده سنگ متوسط نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۶: مرزبندی جابجایی در جهت قائم برای مدل کشیدگی سنج مغناطیسی در خاک سخت



شکل ۵-۱۷: مرزبندی جابجایی در جهت قائم برای مدل کشیدگی سنج میله‌ای در توده سنگ متوسط

۵-۵-۸ صحت سنجی مدل عددی

اعتبار و درستی مدل عددی از دو طریق بررسی شده است، برای بررسی نشست در خاک تحت سربار از روابط تحلیلی که برای محاسبه نشست به کار می‌رود استفاده شده و همچنین برای نشست در دوغاب از داده‌های ابزار دقیق ارائه شده در تحقیق‌های گذشته استفاده شده است. از رابطه تجربی می‌توان به رابطه هار^۱ (۱۹۶۶) اشاره کرد که برای محاسبه نشست تحت بار مستطیلی به ابعاد $B \times L$ در عمق‌های مختلف اشاره کرد که به صورت زیر ارائه شده است (Das, 2017).

$$S_{e(Corner)} = \frac{PB}{2E} (1 - v^2) \left[I_3 - \left(\frac{1 - 2v}{1 - v} \right) I_4 \right] \quad (۶-۵)$$

که در آن P بار قائم یکنواخت (kN/m^2)، B عرض پی (m)، E مدول الاستیسیته (kN/m^2)، v ضریب پواسون و I_3 ، I_4 ضریب تأثیر که تابعی از $n=Z/B$ و $m=L/B$ است و از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$I_3 = \frac{1}{\pi} \left\{ \text{Ln} \left[\frac{\sqrt{1 + m^2 + n^2} + m}{\sqrt{1 + m^2 + n^2} - m} \right] + m \text{Ln} \left[\frac{\sqrt{1 + m^2 + n^2} + 1}{\sqrt{1 + m^2 + n^2} - 1} \right] \right\} \quad (۷-۵)$$

$$I_4 = \frac{n}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{m}{n\sqrt{1 + m^2 + n^2}} \right) \quad (۸-۵)$$

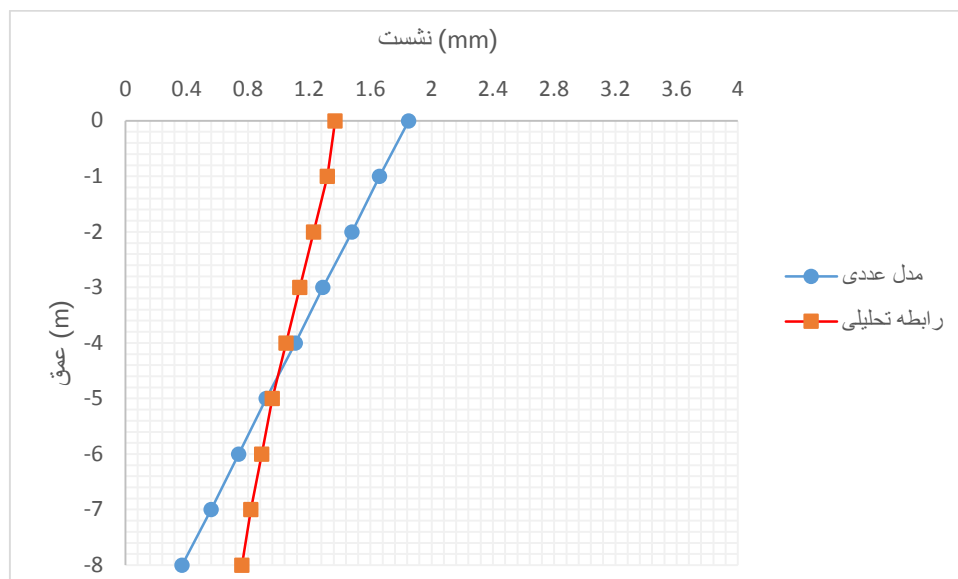
^۱ Harr

نشست مرکز سطح مستطیلی با جمع نشست‌های چهار گوشه سطح مستطیلی به ابعاد $L/2$ و $B/2$

به دست می‌آید:

$$S_{e(Center)} = \frac{PB}{E} (1 - \nu^2) \left[I_3 - \left(\frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \right) I_4 \right] \quad (9-5)$$

با توجه به روابط فوق برای عمق‌های ۱ تا ۸ متری با داده‌های حاصل از مدل عددی ایجاد شده با مشخصات یکسان و به صورت الاستیک مدل‌سازی شده است، مقایسه شده که در شکل ۵-۱۸ نشان داده شده است. چنانچه از نمودار ملاحظه می‌شود اختلاف کمی بین نتایج نشست به دست آمده از مدل عددی و رابطه تحلیلی وجود دارد که نشان دهنده صحت و اعتبار مدل‌سازی عددی برای انجام مراحل بعدی شبیه‌سازی عددی است.

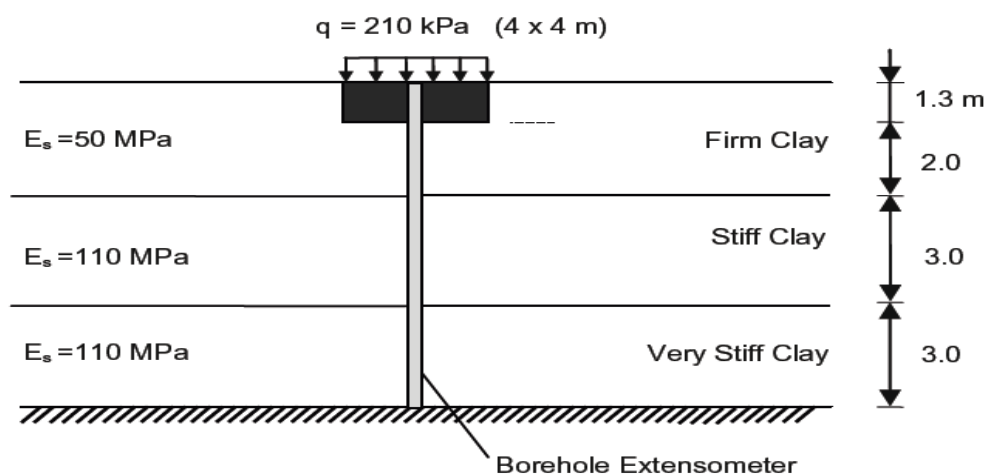


شکل ۵-۱۸: مقایسه نشست به دست آمده از مدل‌سازی عددی و رابطه تجربی

برای بررسی صحت مدل نشست سنج، از داده‌های صحرایی واقعی حاصل از نشست خاک‌های رسی انباشته شده در طول و بعد از ساخت ساختمان چند طبقه توسط اوال^۱ و همکاران (۱۹۸۶) ارائه شده استفاده شده است (Avalle, 1986). مشاهدات نشست پی که با استفاده از کشیدگی سنج‌های مغناطیسی گمانه‌ای تهیه شده در شکل ۵-۲۱ نشان داده شده است. با این وجود به مشخصات دوغاب

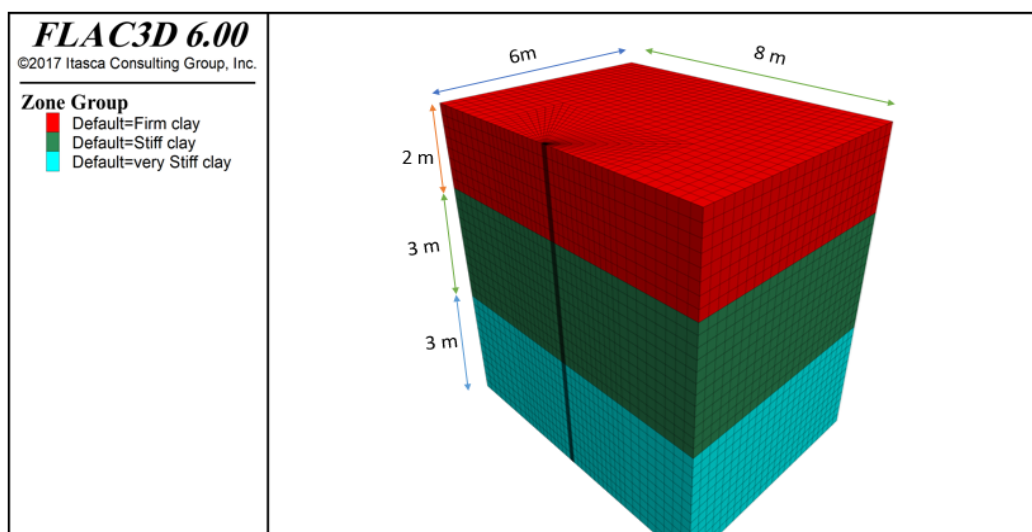
^۱ Avalle

به‌طور دقیق اشاره‌ای نشده است اما بایومی (۲۰۱۱) برای اعتبارسنجی مدل با استفاده از داده‌های این پروژه، از دوغاب با مدول الاستیسیته ۱۰ مگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳ استفاده نموده است (Bayoumi, 2011). بنابراین بر اساس اطلاعات موجود، با استفاده از این محدوده مدول الاستیسیته دوغاب می‌تواند به عنوان یک محدوده معمول برای صحت مقادیر نشست به دست آمده برای فونداسیون ساختمان چند طبقه باشد.

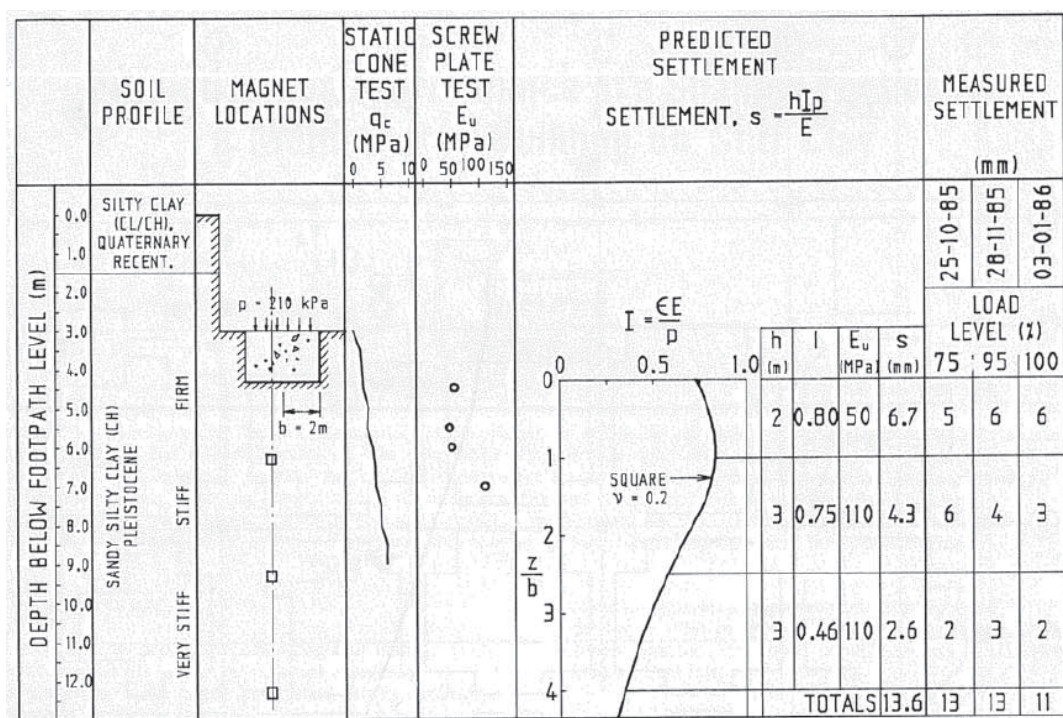


شکل ۵-۱۹: پی و پروفیل خاک جهت اعتبارسنجی مدل عددی (Bayoumi, 2011).

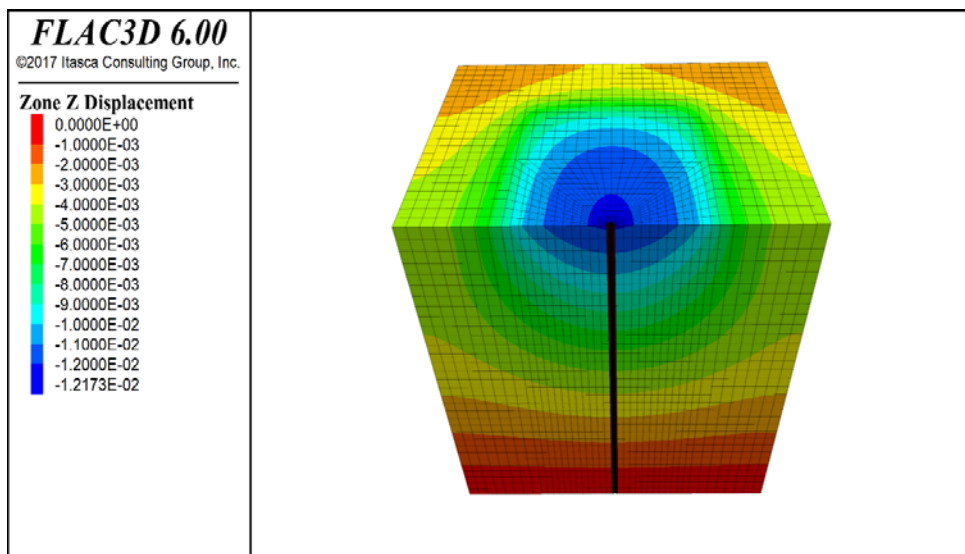
مدل عددی مورد نظر جهت اعتبار سنجی به‌صورت متقارن در ابعاد مشخص شده در شکل ۵-۲۰ و با خصوصیات ارائه شده مدل‌سازی شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از پروژه که در شکل ۵-۲۱ نشان داده شده است، مقدار جابجایی در زیر پی، بین ۱۱ تا ۱۳ میلی‌متر ارائه شده است (Avalle, 1986). مقدار جابجایی که با استفاده از مدل‌سازی به‌دست‌آمده (شکل ۵-۲۱) در نزدیک گمانه حدود ۱۲/۱ میلی‌متر و در داخل دوغاب حدود ۱۱/۸ میلی‌متر بوده که با مقدار جابجایی به‌دست‌آمده از ابزار کشیدگی سنج مطابقت قابل قبولی دارد.



شکل ۵-۲۰: مدل ساخته شده در نرم افزار $FLAC^{3D}$ جهت اعتبار سنجی



شکل ۵-۲۱: خلاصه نتایج اندازه گیری نشست پی با استفاده از کشیدگی سنج مغناطیسی (Avalle, 1986).



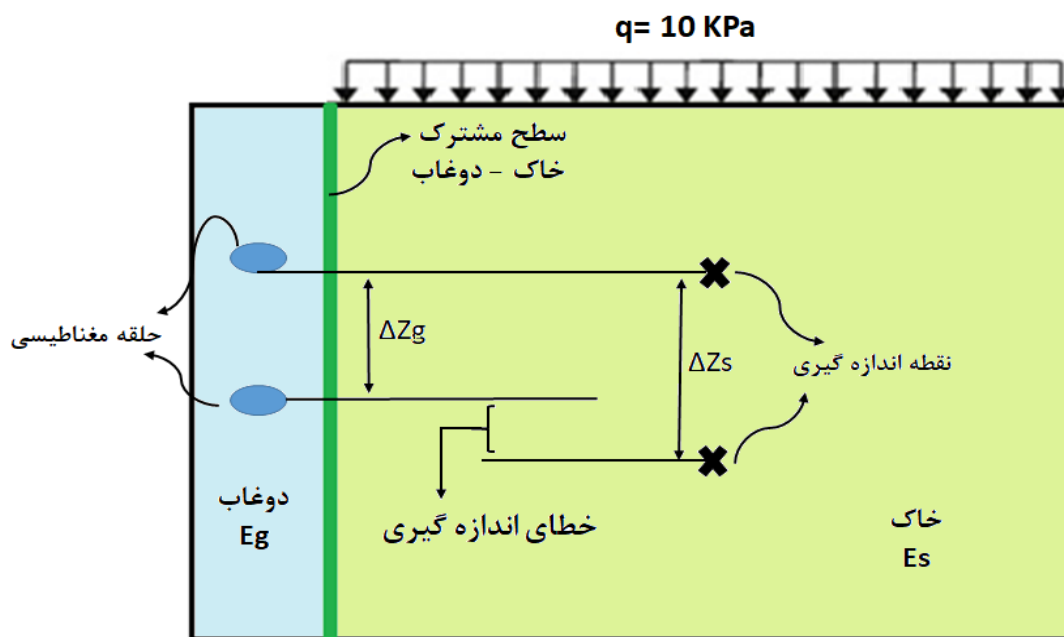
شکل ۵-۲۲: مرزبندی جابجایی قائم در زیر پی تحت سربار ۲۱۰ کیلو پاسکال

۵-۶ تعیین خطای اندازه‌گیری در مدل کشیدگی سنج مغناطیسی

به منظور بررسی اندرکنش دوغاب و محیط دربرگیرنده ابزارهای کشیدگی سنج در محیط خاکی و سنگی، جابجایی ناشی از بارگذاری در محیط اطراف گمانه و جابجایی منتقل شده به ابزار اندازه‌گیری در داخل دوغاب مورد ارزیابی قرار گرفت. همان‌طور که در بخش‌های قبلی اشاره شده، اختلاف خواص دوغاب با محیط اطراف گمانه باعث ایجاد خطاهایی در اندازه‌گیری با ابزارهای کشیدگی سنج می‌شود. برای تعیین درصد این نوع خطای اندازه‌گیری مطابق شکل ۵-۲۳ مدل تحت یک سربار اضافی دلخواه ۱۰ kPa قرار داده می‌شود و نقاطی در داخل دوغاب که حلقه مغناطیسی در آن مکان نصب شده است. و نقاطی در فاصله ۰/۵ متری از گمانه در محیط خاک، مقدار جابجایی قائم آنها اندازه‌گیری می‌شود. نقاط اندازه‌گیری با فاصله از سطح مدل مشخص شده و تفاوت بین جابجایی به دست آمده در داخل دوغاب (ΔZ_g) و متناظر آن در محیط خاک (ΔZ_s) خطای اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. در این بررسی درصد خطای اندازه‌گیری نشست از فرمول (۵-۱۰) به دست می‌آید.

$$\text{خطای اندازه‌گیری (\%)} = \frac{\Delta Z_g - \Delta Z_s}{\Delta Z_s} \times 100 \quad (5-10)$$

برای محاسبه خطای اندازه‌گیری از اثر سختی دوغاب بر نشست خاک در خارج از گمانه صرف‌نظر شده، بنابراین نقاط اندازه‌گیری برای مقدار Z_s در فاصله دورتری از گمانه (۰/۵ متر) انتخاب شده است.



شکل ۵-۲۳: روش تعیین خطای اندازه‌گیری در کشیدگی سنج مغناطیسی

عواملی که می‌توانند در درصد خطای اندازه‌گیری مؤثر باشند در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد:

۵-۶-۱ نسبت مدول دوغاب به خاک (E_g / E_s)

برای بررسی تأثیر مدول دوغاب بر روی درصد خطای اندازه‌گیری مقادیر مختلفی از مقدار مدول دوغاب نسبت به مدول محیط اطراف گمانه در نظر گرفته شده است. این مقادیر شامل نسبت‌های ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۱، ۰/۲، ۱، ۵، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ می‌شود. برای محیط خاکی اطراف گمانه نیز از خصوصیات ارائه شده در جدول ۵-۱ استفاده شده است.

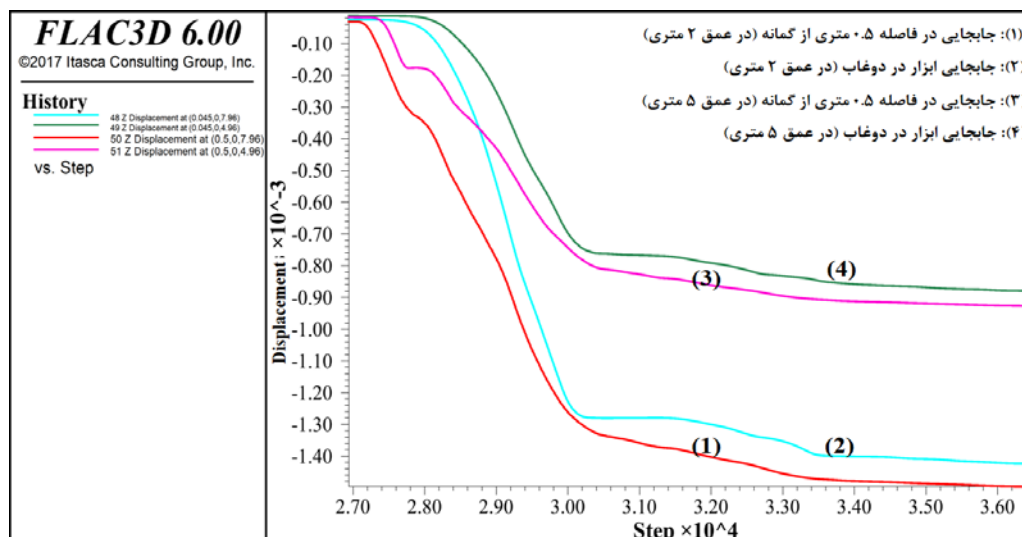
برای تعیین درصد خطای اندازه‌گیری همان‌طور که توضیح داده شده است، برای نسبت‌های مدول مختلف دوغاب به خاک، مقدار جابجایی که در محیط اطراف گمانه در نظر گرفته شده با مقدار جابجایی متناظر آن در دوغاب، مقایسه می‌شود. به‌طور مثال نمودار و مرزبندی جابجایی به‌عنوان نمونه برای نسبت مدول دوغاب به خاک برابر با ۱، که در شکل ۵-۲۴ و شکل ۵-۲۵ نشان داده شده، درصد خطای اندازه‌گیری به شرح ذیل محاسبه می‌شود:

$$\left. \begin{array}{l} \text{جابجایی در عمق 2 متری و در فاصله 0.5 متری از جداره گمانه: } -1.496 \text{ mm} \\ \text{جابجایی در عمق 5 متری و در فاصله 0.5 متری از جداره گمانه: } -0.926 \text{ mm} \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta Z_s = 0.57$$

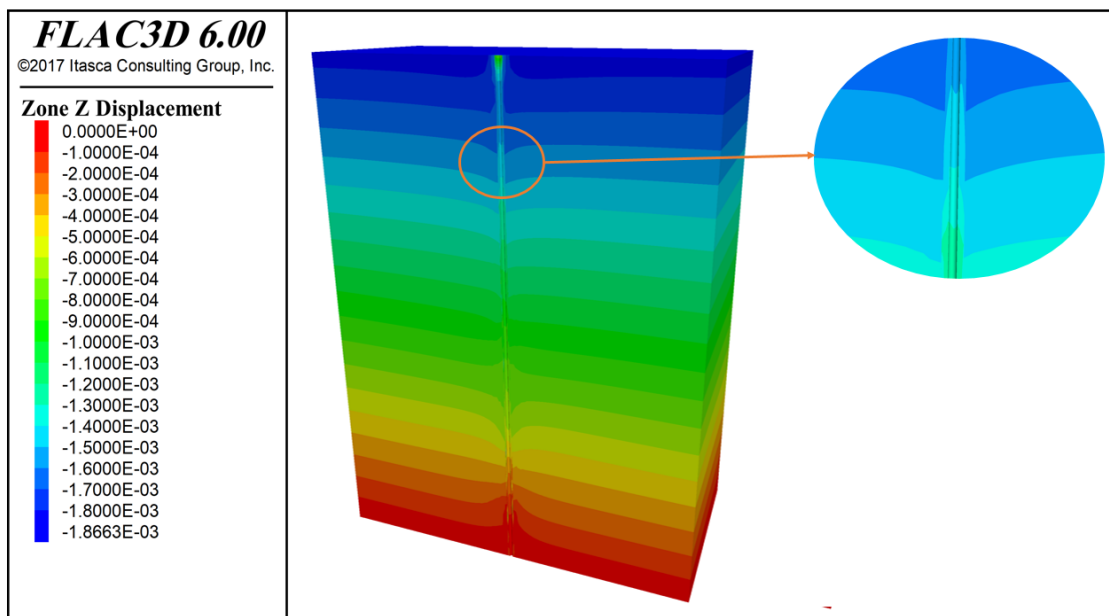
$$\left. \begin{array}{l} -1.423\text{mm} : \text{جابجایی ابزار در دوغاب و در عمق 2 متری} \\ -0.879\text{mm} : \text{جابجایی ابزار در دوغاب و در عمق 5 متری} \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta Z_g = 0.544$$

$$\text{درصد خطای اندازه گیری} = \frac{0.544 - 0.57}{0.57} \times 100 = -4.56\%$$

علامت منفی نشان دهنده تغییر شکل کمتر در دوغاب نسبت به محیط خاک است.

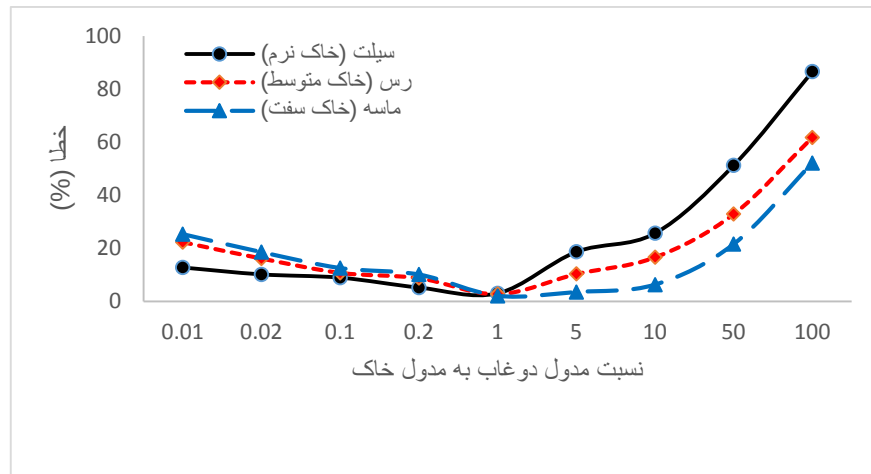


شکل ۵-۲۴: نمودار جابجایی کشیدگی سنج مغناطیسی در دوغاب و محیط خاک متوسط با نسبت $E_g/E_s=1$



شکل ۵-۲۵: مرزبندی جابجایی کشیدگی سنج مغناطیسی در دوغاب و محیط خاک متوسط با نسبت $E_g/E_s=1$

درصد خطای اندازه‌گیری برای نسبت‌های مختلف مدول دوغاب به مدول خاک برای سه نوع خاک مختلف (سیلت، رس و ماسه) مورد بررسی قرار گرفته است که نتیجه آن در شکل ۵-۲۶ ارائه شده است.



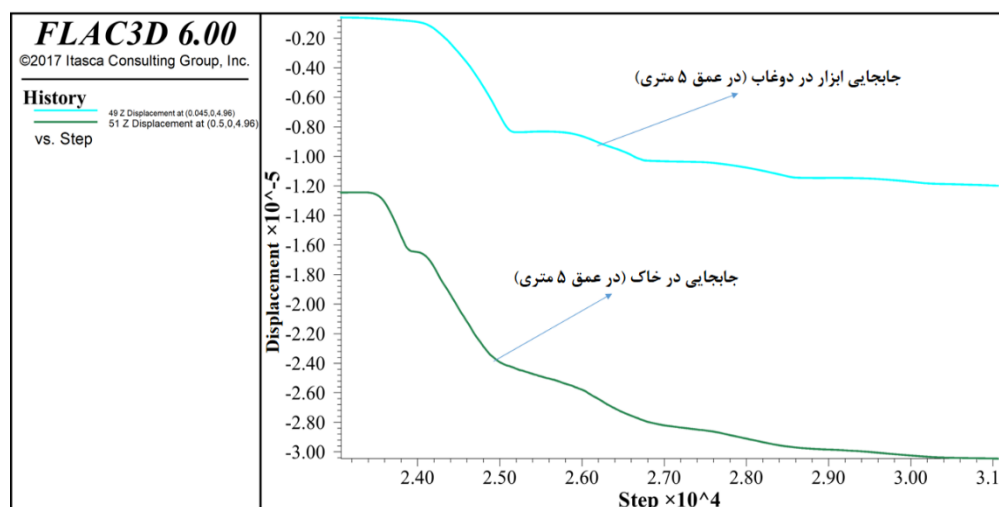
شکل ۵-۲۶: درصد خطای اندازه‌گیری برای نسبت‌های مختلف E_g / E_s برای خاک‌های مختلف

با توجه به شکل ۵-۲۶ می‌توان دریافت که نتایج اندازه‌گیری رابطه مستقیمی با مدول دوغاب دارد، بطوریکه هرچه مدول دوغاب نسبت به محیط اطراف بیشتر باشد مقدار جابجایی منتقل شده به دوغاب کمتر خواهد بود (شکل ۵-۲۷). به عبارتی درصد خطای اندازه‌گیری بیشتر می‌شود و مقدار خطا برای دوغاب با مدول کمتر از محیط اطراف گمانه، کمتر است.

بر اساس نتایج به‌دست آمده تأثیرپذیری نسبت مدول الاستیسیته دوغاب به مدول الاستیسیته محیط اطراف و دربرگیرنده ابزار (E_g / E_s) برای نسبت‌های کمتر از یک و بیشتر از آن تأثیر یکسانی برای انواع خاک‌ها ندارد. بطوریکه تأثیرپذیری این نسبت برای مقادیر بالاتر از یک بیشتر بوده و لذا با افزایش این نسبت درصد خطای اندازه‌گیری نیز بیشتر شده است. همان‌طور که از شکل پیداست، تأثیر این نسبت برای نوع خاک با خواص تعریف شده خاک نرم هنگامی که نسبت کمتر از ۱ باشد به مراتب کمتر بوده و تا جاییکه برای نسبت‌های E_g / E_s تا ۰/۰۱ حداکثر ۱۰ درصد خطای اندازه‌گیری به دست آمده است. این در حالی است که در دو نوع خاک دیگر (خاک متوسط و خاک سفت) زمانی که نسبت E_g / E_s از ۰/۱ کمتر باشد درصد خطای اندازه‌گیری افزایش یافته و در نسبت ۰/۰۱ حداکثر حدود ۲۵

درصد به دست آمده است. نکته جالب توجه، تغییر روند تأثیرپذیری نسبت E_g/E_s برای نسبت‌های بالاتر از ۱ برای نوع خاک است. چنانچه در شکل ملاحظه می‌شود، تأثیر این نسبت در نوع خاک سفت نسبت به دو نوع خاک دیگر کمتر بوده و در خاک نرم این نسبت در صورتی که بالاتر از ۵ باشد، باعث افزایش قابل توجهی در خطای اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین در صورت پذیرفتن مقدار خطای ۱۰ تا ۱۵ درصد در طرح‌های مهندسی، می‌توان از نتایج به دست آمده، با توجه به نوع خواص خاک (مدول الاستیسیته) برای انتخاب دوغاب مناسب پرکننده ابزار استفاده نمود.

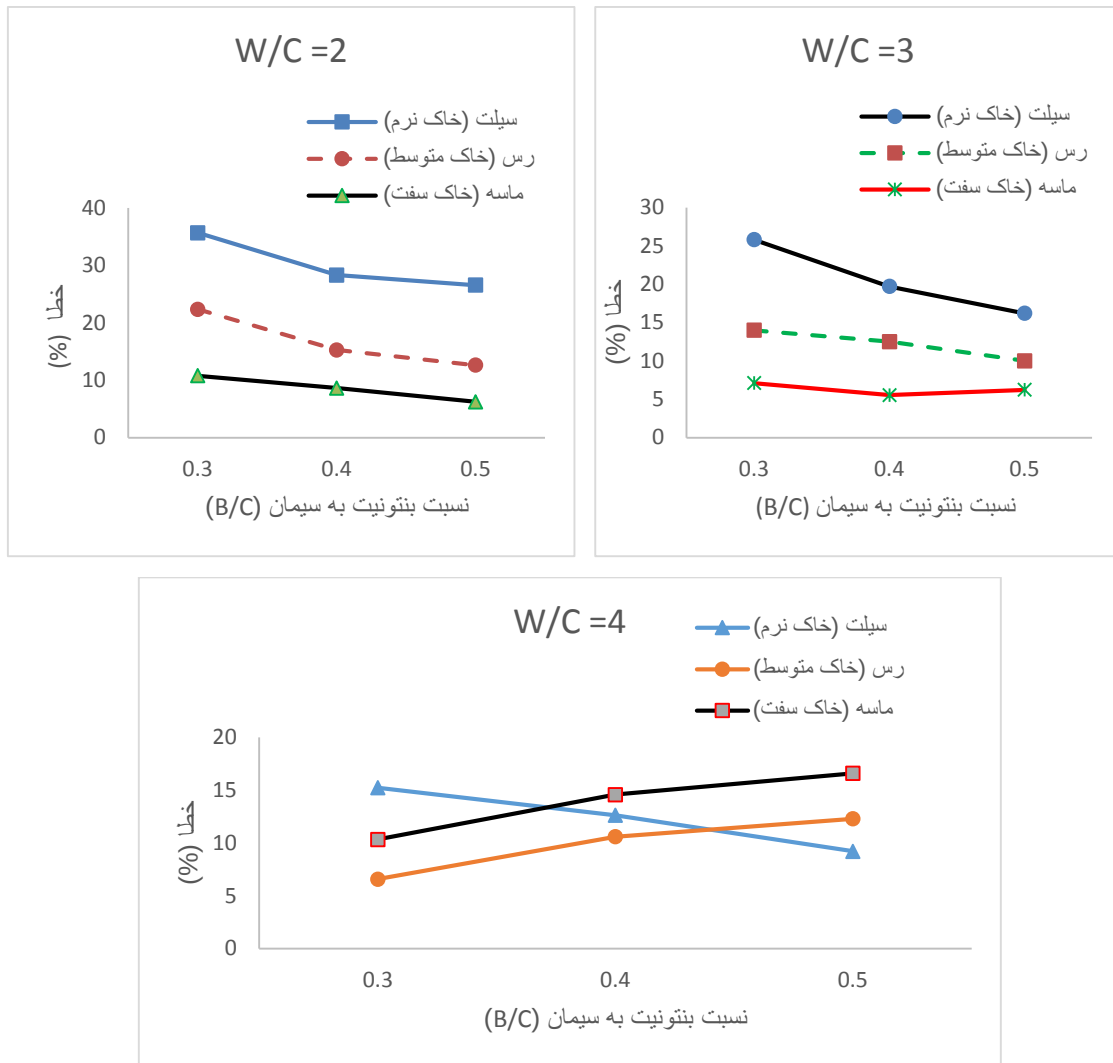
همچنین همان‌طوری که در شکل ۵-۲۶ مشاهده می‌شود، برای خاک‌هایی با مدول الاستیسیته کم در صورتی که نسبت مدول الاستیسیته دوغاب ۵۰ برابر بیشتر باشد، یا به عبارتی دیگر ۵۰ برابر سخت‌تر باشد، حدود ۵۰ درصد خطای اندازه‌گیری حاصل شده است که قابل توجه است. بنابراین انتخاب مدول الاستیسیته مناسب دوغاب پرکننده برای اندازه‌گیری دقیق جابجایی ابزار، اهمیت قابل توجهی دارد.



شکل ۵-۲۷: نمودار جابجایی مدل‌سازی عددی کشیدگی سنج مغناطیسی در دوغاب و خاک با نسبت $E_g/E_s = ۵۰$ در خاک متوسط

همچنین درصد خطا برای مقادیر نسبت‌های بنتونیت به سیمان با خصوصياتی که در فصل چهارم در جدول ۴-۴ ارائه شده مدل‌سازی برای نسبت‌های مختلف آب به سیمان انجام شده است که در شکل ۵-۲۸ مشاهده می‌شود. با توجه به شکل نتیجه می‌شود که هرچه نسبت های آب به سیمان و بنتونیت به سیمان افزایش پیدا کند به دلیل کاهش مدول الاستیسیته و نزدیکی مقدار مدول دوغاب

به مدول خاک درصد خطای اندازه‌گیری کاهش پیدا می‌کند و برای نسبت‌های آب به سیمان ۲ و ۳ برای خاک‌های متوسط و سفت خطای کمتری در مقایسه با خاک نرم حاصل شده است در صورتی که برای نسبت آب به سیمان ۴ مقدار درصد خطا برای خاک نرم کمتر خواهد بود.

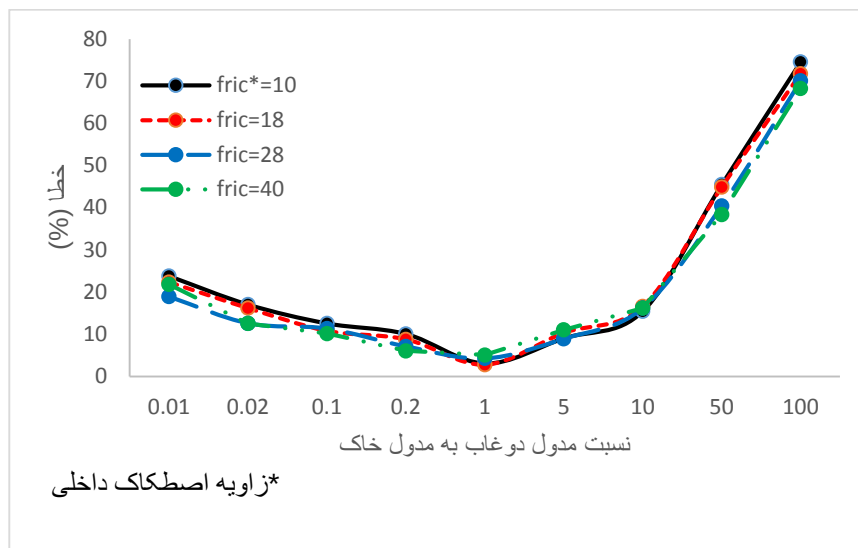


شکل ۵-۲۸: درصد خطای اندازه‌گیری برای نسبت‌های مختلف بنتونیت به سیمان (B/C) با نسبت‌های آب به سیمان ۲، ۳ و ۴

۵-۶-۲ زاویه اصطکاک داخلی سطح مشترک

یکی دیگر از پارامترهای مورد بررسی زاویه اصطکاک داخلی سطح مشترک دوغاب و خاک است. مقادیر زوایای اصطکاک داخلی سطح مشترک بین دوغاب و خاک و لوله دسترسی به‌درستی تعیین نشده است. به همین منظور از زوایای مختلف زاویه اصطکاک در مدل‌سازی سطح مشترک استفاده

شده که مقادیر ۱۰، ۱۸، ۲۸ و ۴۰ درجه به المان سطح مشترک اختصاص داده شده است. این زوایا برای نسبت‌های مختلف E_g/E_s برای خاک‌های مختلف مدل‌سازی شده که نتیجه آن در شکل ۵-۲۹ به عنوان نمونه برای خاک نوع متوسط نشان داده شده است. با توجه به شکل می‌توان مشاهده نمود که به‌طور کلی زاویه اصطکاک سطح مشترک تأثیری در درصد خطای اندازه‌گیری ندارد.



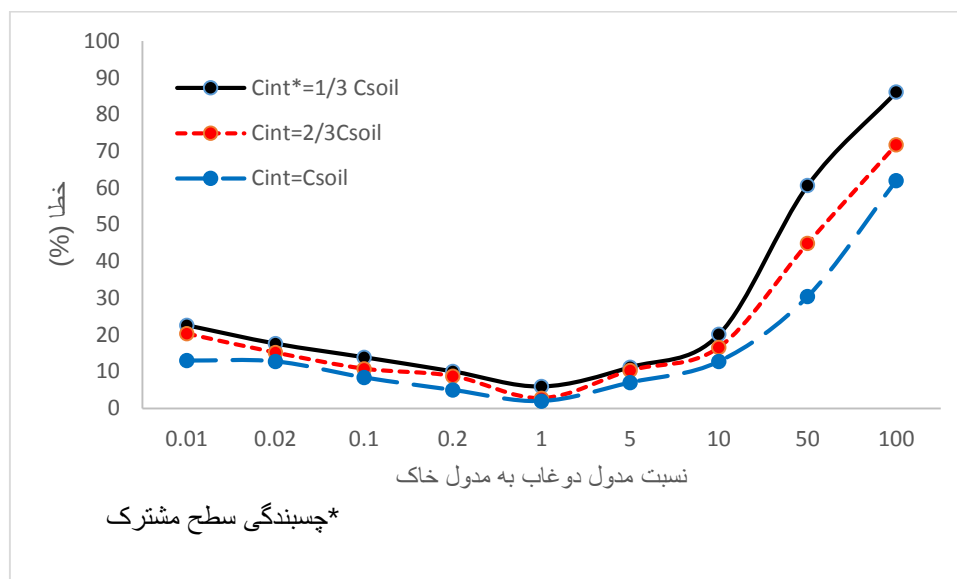
شکل ۵-۲۹: درصد خطای اندازه‌گیری با زوایای اصطکاک داخلی مختلف برای نسبت‌های مختلف E_g/E_s در خاک متوسط

۵-۶-۳ چسبندگی سطح مشترک

برای بررسی تأثیر چسبندگی سطح مشترک بر روی درصد خطای اندازه‌گیری، مقادیر چسبندگی سطح مشترک دوغاب و خاک به‌عنوان ضریبی از چسبندگی محیط اطراف گمانه در نظر گرفته شده است. این ضرایب شامل $\frac{1}{3}$ ، $\frac{2}{3}$ و ۱ برابر چسبندگی خاک انتخاب شده است.

با توجه به موارد ذکر شده، چسبندگی‌های مختلفی نسبت به محیط اطراف در نظر گرفته شده است که نتیجه آن برای نوع خاک متوسط در شکل ۵-۳۰ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود هرچه چسبندگی سطح مشترک به چسبندگی خاک اطراف نزدیک‌تر باشد مقدار درصد خطای اندازه‌گیری کمتر خواهد بود. به‌طور کلی تأثیر مقدار چسبندگی سطح مشترک خاک و دوغاب از نسبت ۱۰ به بالا محسوس‌تر است. در مقادیر چسبندگی $\frac{2}{3}$ و ۱ برابر چسبندگی خاک، مقدار درصد

خطای اندازه‌گیری تا نسبت $E_g/E_s=5$ ، تغییری در مقدار خطا مشاهده نشده است و در مقادیر بالاتر اختلاف چندانی باهم ندارند.



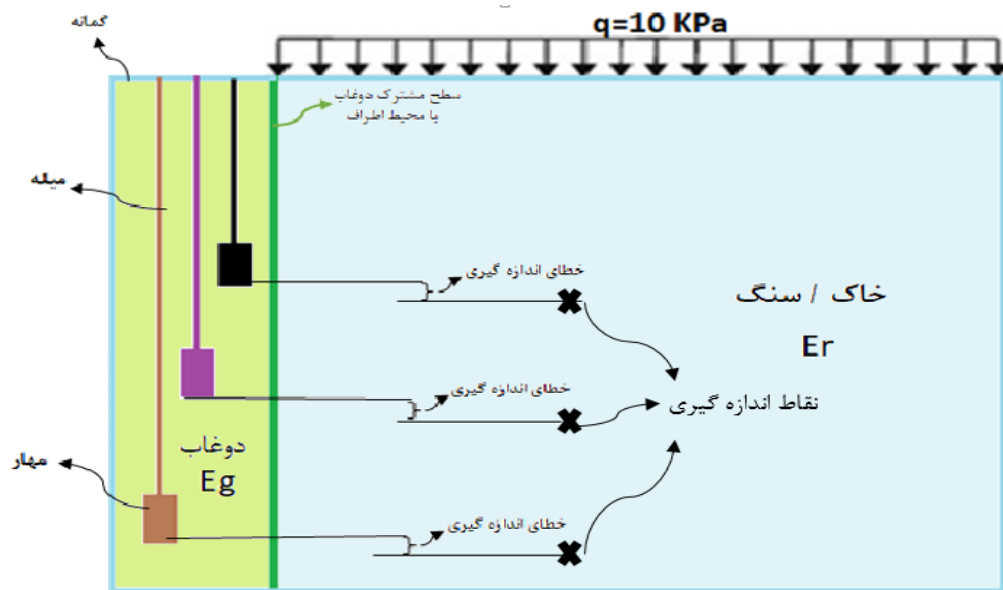
شکل ۵-۳۰: درصد خطای اندازه‌گیری با چسبندگی سطح مشترک مختلف برای نسبت‌های مختلف E_g/E_s در خاک متوسط

۵-۷ تعیین درصد خطای اندازه‌گیری در کشیدگی سنج میله‌ای

برای کشیدگی سنج میله‌ای نیز همانند کشیدگی مغناطیسی برای بررسی اندرکنش محیط و دوغاب و نقاط گیرداری از روش تعیین درصد خطای اندازه‌گیری استفاده می‌شود. در این روش درصد خطای اندازه‌گیری در کشیدگی سنج میله‌ای مطابق شکل ۵-۳۱ انجام می‌شود. مدل تحت سربار 10 kPa قرار می‌گیرد و مقدار جابجایی در انتهای هر مهار گیرداری که در عمق‌های $1/5$ ، $3/5$ و $8/5$ متری از سطح مدل قرار دارند در نظر گرفته می‌شود. همچنین مقدار جابجایی در نقاط متناظر مهارها در فاصله $0/5$ متری از جداره گمانه در محیط خاک/سنگ تعیین می‌شود. اختلاف مقدار جابجایی بین مهار گیرداری در دوغاب و نقطه اندازه‌گیری در فاصله $0/5$ متری از گمانه، مقدار خطای اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. برای تعیین درصد خطای اندازه‌گیری از رابطه (۵-۱۰) استفاده می‌شود.

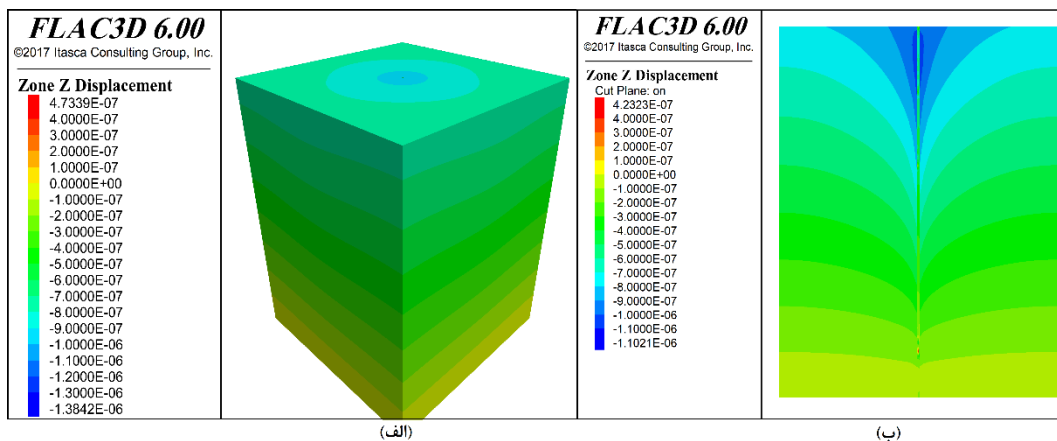
با توجه به اینکه کشیدگی سنج‌های میله‌ای در خاک و سنگ استفاده می‌شوند، در مدل‌سازی نیز از سه نوع خاک سیلت (خاک نرم)، رس (خاک متوسط) و ماسه (خاک سفت) و دو نوع توده سنگ

ضعیف و متوسط استفاده شده که خصوصیات این مواد در جدول (۵-۱) ارائه شده است.

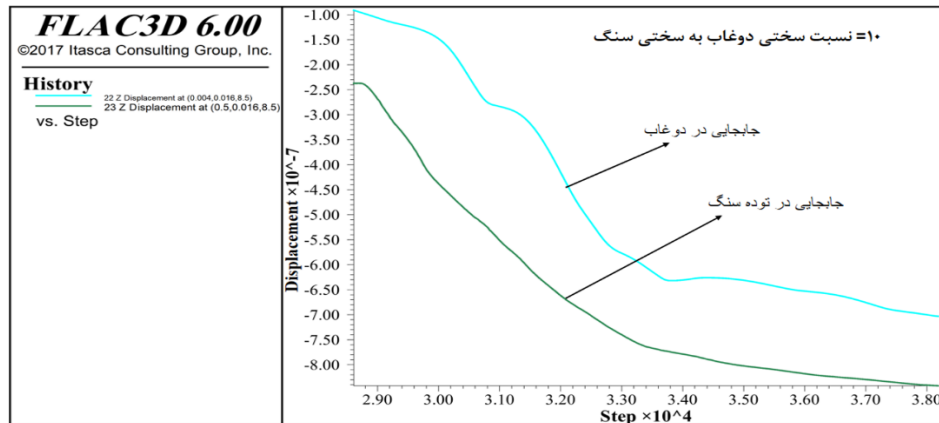


شکل ۵-۳۱: تعیین خطای اندازه گیری در کشیدگی سنج میله‌ای

به عنوان نمونه درصد خطای اندازه گیری در کشیدگی سنج میله‌ای برای توده سنگ متوسط با نسبت مدول دوغاب به مدول توده سنگ برابر ۱۰ که مرزبندی جابجایی کلی مدل در جهت قائم و نمودار جابجایی مهر در عمق ۱/۵ متری در شکل ۵-۳۳ نشان داده شده محاسبه شده است.



شکل ۵-۳۲: مرزبندی جابجایی در جهت Z - الف) مدل کامل کشیدگی سنج میله‌ای، ب) برش از وسط مدل



شکل ۵-۳۳: نمودار جابجایی مهار کشیدگی سنج میله‌ای در عمق ۱/۵ متری با نسبت $E_g/E_s = 10$ در دوغاب و توده سنگ متوسط

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{جابجایی مهار در عمق 1.5 متری در دوغاب} \\ -7.03 \times 10^{-7} \\ \text{جابجایی در فاصله 0.5 متری از جداره گمانه در عمق 1.5 متری} \\ -8.420 \times 10^{-7} \end{array} \right.$$

از رابطه (۵-۱۰) داریم:

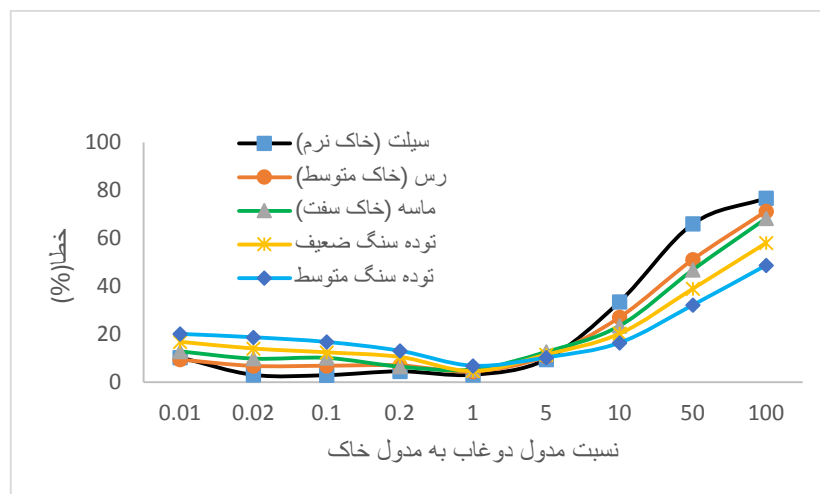
$$\text{درصد خطای اندازه گیری} = \frac{-7.03 - (-8.420)}{-8.420} \times 100 = -16.5\%$$

درصد خطای اندازه‌گیری برای سه مهار گیرداری که در عمق‌های ۱/۵، ۳/۵ و ۸/۵ متر از سطح

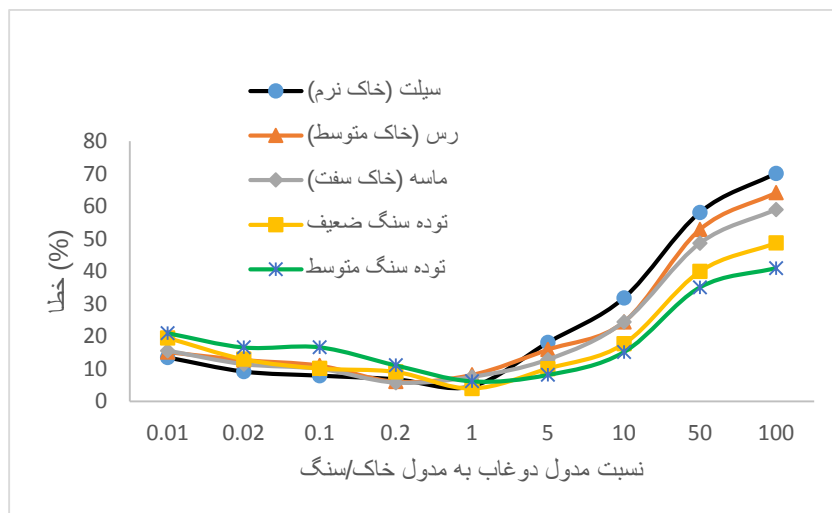
مدل قرار دارند برای سه نوع خاک (نرم، متوسط و سخت) و دو نوع توده سنگ (ضعیف و متوسط)

بررسی شده است. در شکل ۵-۳۴، شکل ۵-۳۵ و شکل ۵-۳۶ درصد خطای اندازه‌گیری برای هر ۳ مهار

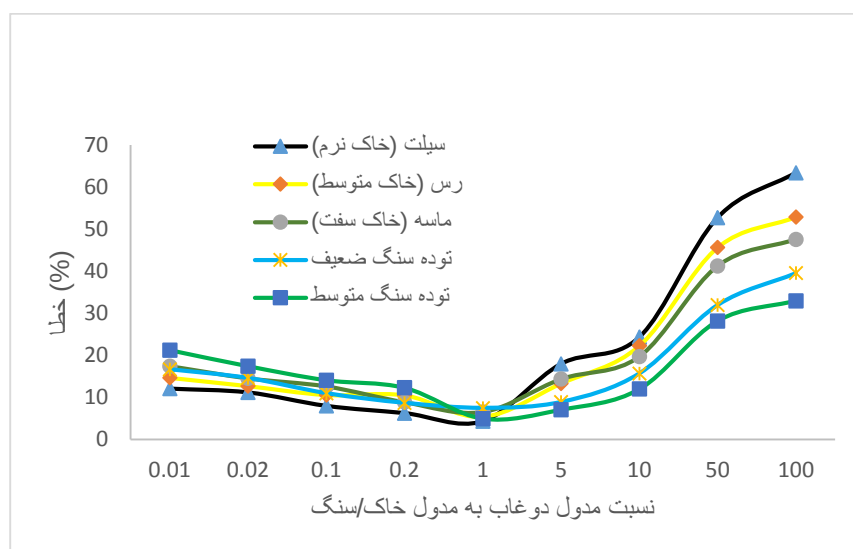
نشان داده شده است



شکل ۵-۳۴: درصد خطای اندازه‌گیری مهار در عمق ۱/۵ متری در خاک و سنگ مختلف



شکل ۵-۳۵: درصد خطای اندازه‌گیری مهار در عمق ۳/۵ متری در خاک و سنگ مختلف



شکل ۵-۳۶: درصد خطای اندازه‌گیری مهار در عمق ۸/۵ در خاک و سنگ مختلف

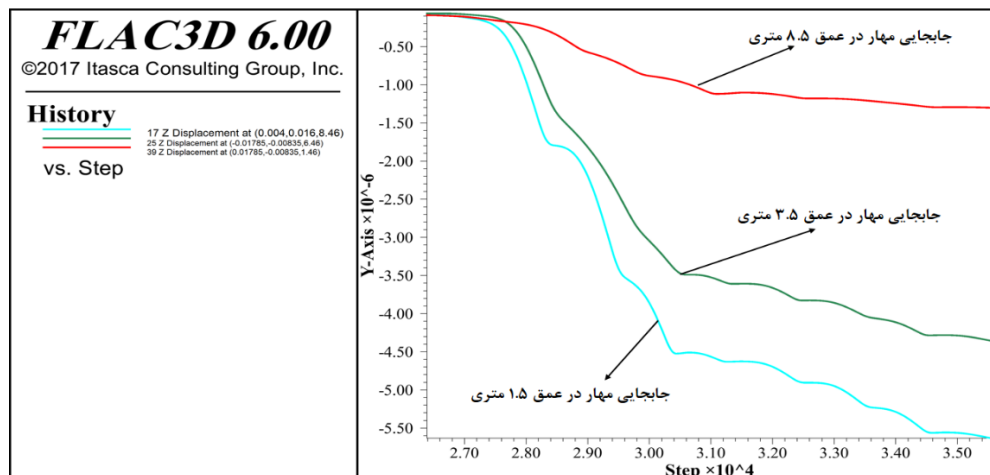
با توجه با شکل‌های فوق می‌توان مشاهده نمود که در مدل کشیدگی سنج میله‌ای نیز همانند کشیدگی سنج مغناطیسی درصد خطای اندازه‌گیری رابطه مستقیمی با نسبت مدول دو غاب به مدول محیط اطراف آن دارد. با افزایش این نسبت مدول مقدار درصد خطای اندازه‌گیری افزایش می‌یابد. درصد خطای اندازه‌گیری برای هر ۳ مهار با افزایش مدول محیط اطراف گمانه کاهش می‌یابد. همان‌طور که نشان داده شده مقدار خطا در خاک نرم برای نسبت‌های مدول بیشتر از ۱، از سایر خاک و سنگ بیشتر است. که می‌توان دلیل آن را بر ناتوانی خاک نرم در جابجایی دو غاب سخت‌تر از آن دانست و برعکس در حالتی که نسبت مدول کمتر از ۱ باشد این مقدار کمتر است. در حالتی که

نسبت مدول برابر با یک باشد یعنی مدول دوغاب با مدول محیط اطراف آن برابر است مقدار درصد خطا کمترین مقدار و دارای خطای کمتر از ۱۰ درصد است که این مقدار خطا را می‌توان به دلیل خصوصیات سطح مشترک و اختلاف چگالی بین آنها نسبت داد. در نسبت مدول ۵، این مقدار خطا در خاک بیشتر از توده سنگ است و هرچه این نسبت افزایش می‌یابد این اختلاف بیشتر می‌شود. برای نسبت مدول ۱۰۰، حداکثر مقدار خطا برای خاک نرم برای هر ۳ مهار تقریباً کمتر از ۷۵ درصد است. برای توده سنگ متوسط نیز حداکثر کمتر از ۵۰ درصد می‌باشد. در نسبت مدول ۰/۰۱ نیز برای خاک نرم کمترین مقدار خطا وجود دارد حداکثر مقدار آن کمتر از ۱۵ درصد است. برای توده سنگ متوسط نیز مقدار خطا در این نسبت بیشتر از مصالح دیگر است و حداکثر کمتر از ۲۵ درصد است. همچنین مقادیر خطای به دست آمده در هر سه مهار نشان می‌دهد که در عمق بیشتر به دلیل کاهش جابجایی و ثابت شدن شرایط محیطی این مقادیر در مهار عمق ۸/۵ متری در کل کمتر از مهارهای دیگر به دست می‌آید.

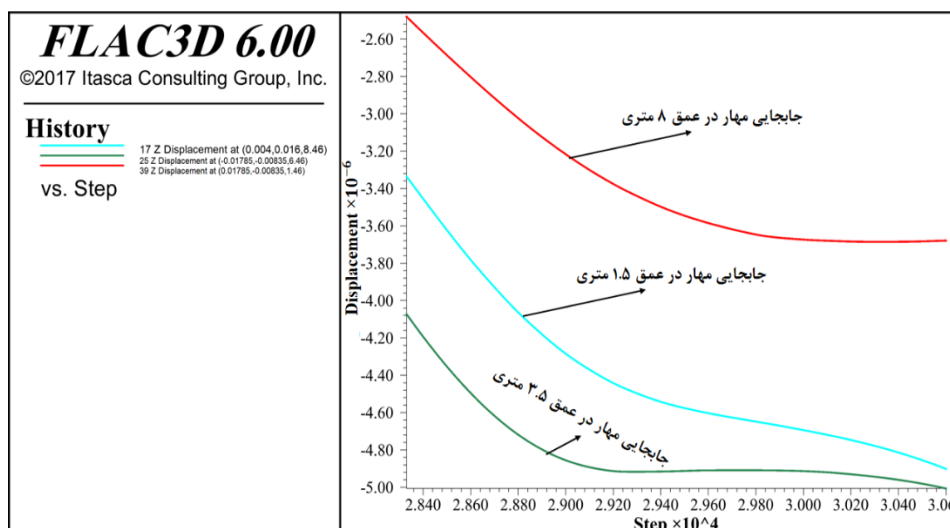
۵-۸ تحلیل حساسیت جابجایی مهار در کشیدگی سنج میله‌ای

برای تأیید درستی و صحت مکانیسم اندازه‌گیری کشیدگی سنج میله‌ای در عمق‌های مختلف تحلیل حساسیتی انجام شده است که مقدار جابجایی مهارها در یک لایه از یک جنس و همچنین لایه ضعیف مابین دو لایه سخت قرار گرفته باشد در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی حالت یک لایه، از خصوصیات سنگ متوسط در جدول (۵-۱) استفاده شده است که نمودار جابجایی هر سه مهار در شکل ۵-۳۷ نشان داده شده است.

برای مدل‌سازی چند لایه از حالت دو لایه سنگ متوسط و یک لایه سنگ ضعیف بین دو لایه در عمق بین ۲ تا ۴ متری استفاده شده است. مقادیر جابجایی مهارها در این حالت نیز در شکل ۵-۳۸ نشان داده شده است.



شکل ۵-۳۷: نمودار جابجایی سه مهار گیرداری در یک لایه سنگ متوسط



شکل ۵-۳۸: نمودار جابجایی سه مهار گیرداری در لایه ضعیف بین دو لایه سخت

با افزایش عمق و دور شدن از بارگذاری سطح، جابجایی در محیط اطراف گمانه و جابجایی متناظر آن در داخل دوغاب و جابجایی مهار کاهش می یابد. این حالت به خوبی در شکل ۵-۳۷ نشان داده شده است که جابجایی مهاری که در عمق ۸/۵ متری از سطح مدل قرار دارد کمتر از مهار در عمق ۳/۵ و ۱/۵ متری است. در شکل ۵-۳۸ به دلیل وجود لایه ضعیف در مهار ۳/۵ متری جابجایی این نقطه گیرداری از جابجایی که در عمق ۱/۵ متری رخ می دهد بیشتر بوده که نشان دهنده اندازه گیری درست نقطه گیرداری است.

۵-۹ مقایسه خطای اندازه‌گیری کشیدگی سنج مغناطیسی و میله‌ای

با توجه به نمودارهای ارائه شده در بخش‌های قبلی و مشاهده درصد خطای اندازه‌گیری در هر دو مدل این نتایج استنباط می‌شود که در هر دو مدل، روند افزایش و کاهش درصد خطای اندازه‌گیری مشابه هم است. در مدل کشیدگی سنج میله‌ای مقادیر خطای اندازه‌گیری کمی کمتر از مدل کشیدگی سنج مغناطیسی است که شاید دلیل آن به درگیری مناسب مهار گیرداری با دوغاب پرکننده گمانه و نبود اصطکاک بین میله و غلاف باشد در صورتی که در کشیدگی مغناطیسی اصطکاک کمی بین حلقه و لوله دسترسی وجود دارد.

به طور کلی برای هر دو نوع کشیدگی سنج، طبق نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و مدلسازی عددی انجام شده در این تحقیق و سایر محققین و اطلاعات موجود در منابع معتبر می‌توان بر اساس سه نوع خاک و دو نوع توده سنگ طبق جدول ۵-۳ نسبت‌های طرح اختلاط دوغاب را پیشنهاد نمود. مقادیر پیشنهادی جدول بر اساس پذیرفتن حداکثر درصد خطای ۱۵ درصدی ارائه شده است. لازم به ذکر است مقادیر جدول به‌عنوان یک الگوی پیشنهادی مطرح شده و برای طرح اختلاط مناسب باید آزمایش انجام پذیرد.

جدول ۵-۳: مدول و نسبت طرح اختلاط پیشنهادی دوغاب پرکننده

نسبت طرح اختلاط		مدول الاستیسیته دوغاب	نوع خاک / مدول الاستیسیته
آب به سیمان (W/C)	بتونیت به سیمان (B/C)		
۳-۶	۰/۵ - ۰/۴	۰/۱ تا ۲ برابر	سیلت (خاک نرم) / ۱۰ MPa
۲-۳	۰/۴ - ۰/۳	۰/۱ تا ۵ برابر	رس (خاک متوسط) / ۴۰ MPa
۲-۳	۰/۵ - ۰/۲	۰/۱ تا ۱۰ برابر	ماسه (خاک سفت) / ۸۰ MPa
<1	۰/۳ - ۰/۲	۰/۱ تا ۸ برابر	توده سنگ ضعیف / ۰/۶ GPa
<1	۰/۳ - ۰/۲	۰/۲ تا ۱۰ برابر	توده سنگ متوسط / ۱۰ GPa

۵-۱۰ جمع‌بندی

در این فصل از پژوهش، به معرفی روش‌های عددی و هدف از انتخاب نرم‌افزار عددی پرداخته شده که در نهایت به منظور بررسی اندرکنش بین دوغاب و محیط اطراف آن از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ استفاده شده است. مدل‌سازی به صورت دو مدل کشیدگی سنج مغناطیسی و میله‌ای انجام شده که مراحل مدل‌سازی هر کدام ارائه شده است. مدل‌سازی کشیدگی سنج مغناطیسی در سه نوع خاک مختلف انجام شد که نتایج به دست آمده حاکی از حساسیت زیاد ابزار اندازه‌گیری به مدول دوغاب پرکننده بوده، به طوری که با افزایش مدول دوغاب، درصد خطای اندازه‌گیری افزایش می‌یابد و نیز حساسیت کمتر خاک سخت نسبت به خاک‌های متوسط و نرم در مدول دوغاب بیشتر است. همچنین تحلیل حساسیتی بر مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سطح مشترک انجام شده که طبق نتایج به دست آمده زاویه اصطکاک داخلی سطح مشترک تأثیر ناچیزی در مقدار خطای اندازه‌گیری دارد ولی چسبندگی سطح مشترک تأثیر بسزایی در مقدار خطای اندازه‌گیری بخصوص در نسبت‌های مدول دوغاب به مدول خاک بیشتر از ۱۰ داشته است. مدل‌سازی کشیدگی سنج میله‌ای نیز با ۳ نقطه گیرداری در عمق‌های مختلف برای سه نوع خاک و دو نوع توده سنگ انجام شده است که در این مدل نیز هرچه مصالح اطراف گمانه سخت‌تر شوند مقادیر خطای اندازه‌گیری کمتر خواهد شد. در هر دو مدل، مدول دوغاب نسبت به مدول مصالح اطراف بیشتر باشد مقدار درصد خطا افزایش می‌یابد. برعکس برای مدول‌های کمتر مقدار خطای کمتری حاصل شده است.

فصل ششم

نتیجه گیری و

پیشنهادات

۶-۱ مقدمه

هدف از این پژوهش بررسی اندرکنش دوغاب و محیط دربرگیرنده ابزارهای کشیدگی سنج در محیط خاکی و سنگی است. بدین منظور، جابجایی ناشی از بارگذاری در محیط اطراف گمانه و جابجایی منتقل شده به ابزار اندازه‌گیری در داخل دوغاب مورد ارزیابی قرار گرفت. در ابتدا مطالعات آزمایشگاهی با تعدادی درصد اختلاط بنتونیت به سیمان به منظور تعیین خواص مکانیکی دوغاب پرکننده گمانه و تعیین چسبندگی سطح مشترک انجام شد. همچنین با توجه به موارد ذکر شده نرم‌افزار ژئوتکنیکی $FLAC^{3D}$ برای تحلیل عددی اندرکنش انتخاب شده است. تعیین پارامترهای تأثیرگذار در اندرکنش خاک و دوغاب و ابزار اندازه‌گیری از جمله تأثیر نسبت مدول دوغاب به مدول محیط اطراف گمانه، تأثیر زاویه اصطکاک داخلی سطح مشترک و تأثیر چسبندگی سطح مشترک بر مقدار درصد خطای اندازه‌گیری مورد بررسی قرار گرفت.

۶-۲ نتیجه‌گیری

نتایج مطالعه آزمایشگاهی و تحلیل عددی به شرح زیر ارائه شده است:

۱. با افزایش درصد بنتونیت در نمونه دوغابی، چگالی، مقاومت، مدول دوغاب و تنش برشی سطح مشترک بین لوله نشست سنج و دوغاب کاهش می‌یابد.
۲. روغن کاری لوله نشست سنج باعث از بین رفتن اصطکاک بین ابزار مغناطیسی و لوله می‌شود و کاهش ۲۱ درصدی در مقدار تنش برشی سطح مشترک رخ می‌دهد.
۳. نسبت مدول دوغاب به محیط اطراف آن (خاک یا سنگ) یکی از فاکتورهای مهم در اندازه‌گیری با استفاده از کشیدگی سنج‌های گمانه‌ای است.
۴. مدول دوغاب برابر یا کمتر از مدول محیط اطراف، حداقل خطاها را در اندازه‌گیری ایجاد می‌کند. هرچه مدول دوغاب نسبت به محیط اطراف آن بیشتر باشد مقدار جابجایی منتقل شده به دوغاب کمتر است و در نتیجه درصد خطای اندازه‌گیری بیشتر می‌شود.
۵. توده سنگ نسبت به خاک و خاک سفت نسبت به خاک‌های نرم و متوسط به مدول دوغاب

حساسیت کمتری دارند و مقدار خطای اندازه‌گیری در آنها کمتر است. در نسبت‌های مدول دوغاب به مدول محیط اطراف کمتر از ۱۰، مقدار درصد خطا تقریباً ثابت و کمتر از ۱۵ درصد است.

۶. با توجه به نتایج مدلسازی کشیدگی سنج میله‌ای در مقایسه با کشیدگی سنج مغناطیسی درصد خطای اندازه‌گیری کمتری در مصالح مختلف دارد.

۷. با استفاده از نتایج مطالعه آزمایشگاهی و عددی و همچنین تحقیق‌های گذشته استفاده از دوغاب در بازه ۰/۲ تا ۵ برابر مدول مصالح محیط اطراف، حداقل خطای اندازه‌گیری را شامل می‌شود.

۸. چسبندگی سطح مشترک تأثیر مهمی در درصد خطای اندازه‌گیری دارد. هرچه چسبندگی سطح مشترک به مقدار چسبندگی محیط اطراف دوغاب نزدیک‌تر باشد مقدار درصد خطا کمتر است.

۹. زاویه اصطکاک سطح مشترک تأثیر ناچیزی در مقدار خطای اندازه‌گیری دارد.

۳-۶ پیشنهادها

۱. به‌منظور بررسی بیشتر بر خواص دوغاب نمونه‌هایی با درصد اختلاط‌های مختلف ساخته شود. همچنین از آزمون ۳ محوره برای تعیین چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی انجام گیرد.

۲. در آزمون برون‌رانی تأثیر فشار همه‌جانبه در نظر گرفته شود.

۳. تأثیر مقدار تنش محیط بر مقدار جابجایی و درصد خطای اندازه‌گیری بررسی شود.

۴. مدل‌سازی و تعیین درصد خطای اندازه‌گیری در خاک اشباع انجام شود.

- صالحی.م، (۱۳۸۷)، پایان نامه ارشد: "اندرکنش بین خاک و دوغاب در گمانه‌های نشست
سنجی در سدهای خاکی" دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
- غیاثیان.ح، امین طاهری.ر، (۱۳۸۸)، "مقاومت فشاری دوغاب بنتونیت-سیمان در
آزمایش‌های فشاری تک‌محوره و سه‌محوره زهکشی نشده" هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی
عمران - شیراز - ایران
- ASTM, D4403-84, (1996). **Standard practice for extensometers used in rock**, 610-619, volume: 04.08, section 4
- Al Kuisi, M., El Naqa, A., & Shaqour, F. (2005). **Improvement of Dam Foundation Using Grouting Intensity Number (GIN) Technique at Tannur Dam Site, South Jordan**. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 10.
- Avalle, D. L., Kay, J. N., McBean, P. C., & Mitchell, P. W. (1986). **Prediction and Performance of a Shallow Footing for a Multi-storey Building on Stiff Clay**. In Speciality Geomechanics Symposium: Interpretation of Field Testing for Design Parameters; Vol. 1 and 2; Preprints of Papers (p. 6). Institution of Engineers, Australia.
- Bassett, R. (2011). **A guide to field instrumentation in geotechnics: principles, installation and reading**. CRC Press.
- Bayoumi, A. (2011). **On the evaluation of settlement measurements using borehole extensometers**. Geotechnical and Geological Engineering, 29(1), 75-90.
- Bayoumi, A. A. W. M. (1999). **Numerical assessment of the effects of grout characteristics on settlement measurements in Borehole Extensometers** (Doctoral dissertation, American University in Cairo).
- Bowles, L. E. (1996). **Foundation analysis and design**. McGraw-hill.

Brinkgreve, B. R. (2005). **Selection of Soil Models and Parameters for Geotechnical Engineering Application**. Geotechnical Special Publication No. 128, 69 - 98.

Burland, J. B., Moore, J. F. A., & Smith, P. D. K. (1972). **A simple and precise borehole extensometer**. *Geotechnique*, 22(1), 174-177.

Chen, X., Zhang, J., Xiao, Y., & Li, J. (2015). **Effect of roughness on shear behavior of red clay–concrete interface in large-scale direct shear tests**. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(8), 1122-1135.

Contreras, I. A., Grosser, A. T., & Ver Strate, R. H. (2007). **The use of the fully-grouted method for piezometer installation**. In 7th FMGM 2007: Field Measurements in Geomechanics (pp. 1-20).

Das, B. M. (2017). **Shallow foundations: bearing capacity and settlement**. CRC press

DeJong, J. T., & Westgate, Z. J. (2009). **Role of initial state, material properties, and con-finement condition on local and global soil-structure interface behavior**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(11), 1646–1660.

DeJong, J. T., Randolph, M. F., & White, D. J. (2003). **Interface load transfer degradation during cyclic loading: A microscale investigation**. *Soils and Foundations*, 43(4), 81–93.

Dietz, M. S. (2000). **Developing a holistic understanding of interface friction using sand with direct shear apparatus** (Doctoral dissertation, University of Bristol).

Dove, J. E., & Frost, J. D. (1999). **Peak friction behavior of smooth geomembrane-particle interfaces**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(7), 544-555.

Duncan, J. (1994). **The Role of Advanced Constitutive Relations in Practical Application**. 12th International Conference on Soil Mechanic and Foundation Engineering, Volume 5, pp. 31-48. New Delhi, India

Dunnicliff John (1993), **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance**, John Wiley & Sons, New York

Durham, J. (1996). **The prediction of shear strength in bentonite/cement groups**

(Doctoral dissertation, © J. Durham).

El Cheikh, K., Rémond, S., Pizette, P., Vanhove, Y., & Djelal, C. (2016). **Discrete element study of granular material—Bumpy wall interface behavior**. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 457, 526–53

Evgin, E., and Fakharian, K (1996) “**Effect of stress paths on the behavior of sand-steel interfaces.**” *Can. Geotech. J.*, 33~6!, 485–493

Farzanpowder company (2017).[online].Available at: [http:// www.farzanpowder .com /](http://www.farzanpowder.com/) **presian**

Feligha, M., Hammoud, F., Belachia, M., & Nouaouria, M. S. (2016). **Experimental Investigation of Frictional Behavior Between Cohesive Soils and Solid Materials Using Direct Shear Apparatus**. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(2), 567-578.

Fioravante, V., Ghionna, V. N., Pedroni, S., & Porcino, D. (1999). **A constant normal stiffness direct shear box for soil-solid interface tests**. *Rivista Italiana di Geotecnica*, 33(3), 7-22.

Greenwood, D. A., & Raffle, J. F. (1963). **Formulation and application of grouts containing clay**. In *Symposium on Grouts and Drilling Muds*. Butterworths, London.

Gu, X., Chen, Y., & Huang, M. (2017). **Critical state shear behavior of the soil-structure interface determined by discrete element modeling**. *Particuology*.

Hoek, E. (2000). **Practical rock engineering**. Ed. Rocscience

Hu, L., & Pu, J. (2004). **Testing and modeling of soil-structure interface**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(8), 851–860.

ITASCA Consulting Group Inc, 2017. **Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions**, User Manual, Version 6.00. Minnesota: Itasca Consulting Group, Minnesota.

Jamshidi, R. (2007). **Sensitivity Analysis of Magnetic Extensometer for Measuring Vertical Movement of Earth Dams on Soft Soils**. *Soft Soil Engineering*, Chan and Law, Taylor and Francis Group, London, ISBN13 978-0-415-42280-2, pp 95-102.

Jensen, R. P., Edil, T. B., Bosscher, P. J., Plesha, M. E., & Kahla, N. B. (2001). **Effect**

of particle shape on interface behavior of DEM-simulated granular materials. International Journal of Geomechanics, 1(1), 1–19.

Lavrov, A., & Torsæter, M. (2016). **Physics and Mechanics of Primary Well Cementing.** Springer.

Littlejohn, G. S. (1982, February). **Design of cement based grouts. In Grouting in geotechnical engineering** (pp. 35-48). ASCE.

Liu H, Bu Y, Guo S (2013). **Improvement of aluminium powder application measure based on influence of gas hole on strength properties of oil well cement.** Constr Build Mater 47:480–488

Marsland, A. (1973). **Discussion, Principles of Measurement.** Field Instrumentation in Geotechnical Engineering, British Geotechnical Society, Halsted Press, a Division of John Wiley, 531-532.

Marsland, A., & Quarterman, R. (1974). **Further development of multipoint magnetic extensometers for use in highly compressible ground.** Geotechnique, 24(3), 429-433.

Mikkelsen, P. E. (2002). **Cement-bentonite grout backfill for borehole instruments.** Geotechnical News, 20(4), 38-42.

Nakayama, H. (2007). **Modelling interfaces between sand and structural elements** (Doctoral dissertation, University of Bristol).

Opedal N, Todorovic J, Torsaeter M, Vralstad T, Mushtaq W (2014). **Experimental study on the cement-formation bonding.** In: SPE paper presented at the SPE international symposium and exhibition on formation damage control held in Lafayette, Louisiana, USA, 26–28 Feb 2014

Peng, S. Y., Ng, C. W. W., & Zheng, G. (2014). **The dilatant behaviour of sand–pileinterface subjected to loading and stress relief.** Acta Geotechnica, 9(3), 425–437.

Potyondy, J. G. (1961). **Skin friction between various soils and construction materials.** Geotechnique, 11(4), 339-353.

Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1980). **Pile foundation analysis and design** (No. Monograph).

Rollins, K. M., & Cole, R. T. (2006, September). **Cyclic Lateral Load Behaviour of a Pile Cap and Backfill**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 1143-1153.

Shahroud cement company (2017). [Online] Available at: <http://shahroudcement.com> [Accessed 20 Dec. 2017].

Slopeindicator company (2017). [Online] Available at: <http://www.slopeindicator.com> [Accessed 20 Dec. 2017].

Soil Instruments Ltd, (2017). [Online] Available at: <http://soil instrument.com> [Accessed 20 Dec. 2017].

Sonebi, M., Hughes, D., Harley, R., & Lynch, K. (2012). **Characterisation of the performance of sustainable groucontaining bentonite for geotechnical applications**. In *The international conference on Sustainable Built Environment for Now and the Future*, Hanoi, Vietnam (pp. 1-10).

Stutz, H. H. (2016). **Hypoplastic Models for Soil-Structure Interfaces-Modelling and Implementation** (Doctoral dissertation, Dissertation, Kiel, Christian-Albrechts-Universität, 2016).

Subramanian, N. (2016). **Design of steel structures-Appendix C: properties of soils**, Oxford University Press, Pbk, 916 p, ISBN: 9780199460915,

Tejchman, J., & Wu, W. (1995). **Experimental and numerical study of sand–steel interfaces**. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 19(8), 513–536

Tsubakihara, Y., & Kishida, H. (1993). **Frictional behaviour between normally consolidated clay and steel by two direct shear type apparatuses**. *Soils and Foundations*, 33(2), 1-13.

Uesugi, M., & Kishida, H. (1986b). **Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel**. *Soils and Foundations*, 26(4), 139–149.

Uesugi, M., Kishida, H., & Tsubakihara, Y. (1988). **Behavior of sand particles in sand-steel friction**. *Soils and Foundations*, 28(1), 107–118.

Vanza, M. G., Modi, P. I., & ME, P. C. (2013). **Parametric study of grout mix design using admixture**. *International Journal of Engineering Research and Applications*

Wang, J., Dove, J. E., & Gutierrez, M. S. (2007). **Determining particulate–solid interphase strength using shear-induced anisotropy**. Granular Matter, 9(3–4), 231–240.

Will, D., (1997), **Cement-Bentonite Grouts Compatible with Compliant TDR Cables**, M.S Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Northwestern University, Evanston, IL, USA.

Wulf, S. (2014). **Geotechnical Monitoring in Conventional Tunnelling** - Handbook. Graz University of Technology.

Yasufuku, N., Ochiai, H., & Kaku, T. (2003). **Internal friction of sand along steel surface up to an interfacial critical state**. Journal of applied mechanics, 6, 563-571.

Yoshimi, Y., and Kishida, T (1981). **A ring torsion apparatus for evaluation friction between soil and metal surface**. Geotech. Test. J., 4~4!, 145–152.

Zhang, G., & Zhang, J. (2009). **State of the art: mechanical behavior of soil–structure interface**. Progress in Natural Science, 19(10), 1187-1196.

presented for the suitable range of the filling grout stiffness.

Keywords: Magnetic/rod extensometer, Bentonite-Cement Mixture, Laboratory Test, Numerical Modeling

Abstract

Nowadays, monitoring instrument is of particular importance in controlling the stability and safety of structures, since the selection, type and placement of instruments in a structure can identify the phenomena and destructive factors such as cracks and displacement in the structure and pore pressure and reduce stress and etc. One of the monitoring instruments used to measure surface and depth displacements is magnetic/rod extensometer. These kind of instruments are placed inside the borehole that are drilled in the soil and rock, and the space inside the borehole is filled with bentonite-cement grout. In some cases, expectable measurements with the results of instrumentation data are different, and in most cases, this difference and error can be attributed to the lack of suitable connection of the attachment point and the type and properties of the grout to the surrounding environments. For this purpose, a series of laboratory tests with grout mix design were used to determine the mechanical properties and the interaction between the grout and ABS tubes. Moreover, to investigate the effect of control parameters on displacement measurements, a numerical study was performed using FLAC^{3D} software with modeling the borehole extensometers. In this regard, the effect of the ratio of grout-soil elastic modulus, soil/grout interface parameters (friction angle and cohesion) has been investigated. The results of laboratory and numerical studies show that the higher the percentage of mixing of water to cement and bentonite to cement, the compressive strength, the stiffness of the sample and the shear stress of the interface will be reduced. The error percentage of the measurement of instrumentation has a direct correlation with the stiffness of the borehole filling grout, which decreases with the ratio of the surrounding soil stiffness to the stiffness of the grout. The higher is the stiffness of the grout than the surrounding environment stiffness, the lower is the amount of displacement transferred to the instrument and results in a higher error percentage. Also, for grout-soil/grout-rock elastic modulus ratios of more than 10% for three different soil types (soft, medium and stiff) and two types of weak and medium rock masses, the error is significant and the error percentage in the soft soil type including instrument is more than the others. Additionally, the effect of friction angle and interface cohesion on the measurement error was investigated. The results indicate a negligible effect on the friction angle and tangible effect of interface cohesion in the error percentage of measurement; so the more the interface cohesion is closer to the cohesion of the environment around the grout, the lower the error percentage is. Finally, according to the obtained results, a suggested pattern is



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering

MSc Thesis in Rock Mechanics

**Investigation of the interaction between grout and
surrounding environment of extensometers into soil and rock**

By:

Afshin Gholinia

Supervisor:

Dr. Majid Nikkhah

Dr. Reza Naderi

January 2018