

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک

بهسازی خاک‌های واگرا با استفاده از سولفات پتاسیم

نگارنده : فرهاد گیوری

استاد راهنما :

دکتر محسن کرامتی

اسفند ۱۴۰۰



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

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای فرهاد گیوری
 با شماره دانشجویی: ۹۷۱۴۲۷۴ رشته: مهندسی عمران گرایش: ژئوتکنیک
 تحت عنوان بهسازی خاک‌های واگرا با استفاده از سولفات پتاسیم
 که در تاریخ ۱۴۰۱/۰۱/۲۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید. به
 شرح ذیل اعلام می‌گردد:

الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹ ☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۷ ☒
 ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹ ☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹ ☐
 د) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐
 نوع تحقیق: نظری ☐ عملی ☒

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	آقای دکتر محسن کرامتی	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	—	—	—
۳- استاد مشاور	—	—	—
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	آقای دکتر جلیل شفاعی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	آقای دکتر رضا نادری	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر طاهره تقی‌زاده فیروزجایی	استادیار	



نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: آقای دکتر رضا نادری

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: ۱۴۰۱/۰۱/۲۷

تیسر: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیلی) می‌تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع
 مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود)

تقدیم بہ

نمی دانم کہ در طرح بزرگ خدا من چه نقشی دارم و چه سرنوشتی، ولی این قدر مطمئنم کہ بی بیج
نیست و این پژوهش را تقدیم می کنم بہ خانوادہ ام، اساتید، دانش پژوهان و جامعہ مہندسین
عمران کہ توسعہ و آبادانی کشور مہمون زحمات بی ثائبہ آنہاست.

سپاسگزاری

بر خود لازم می دانم از همه کسانی که در کسب دانش و موفقیت اینجانب مرایاری نمودند صمیمانه

تشکر و قدردانی نمایم.

از آقای دکتر محسن کرامتی استاد راهنمای عزیزم که در کمال سعه صدر و فروتنی از هیچ کمک

خاصی دریغ ننمودند و از آقای دکتر رضاناودی و آقای دکتر امیربزرافشان مقدم که بستر مناسبی را

برای دانشجویان ژئوتکنیک دانشگاه صنعتی شاهرود فراهم نمودند کمال تقدیر و تشکر را دارم.

از مدیران و کارشناسان شرکت مهندسین مشاور ژئوآزمای شمال که در زمان کرونا مساعدت

لازم را برای انجام آزمایشات انجام دادند. و در آخر از همه کسانی که مساعدت نمودند تشکر کرده و

از خداوند منان طول عمر با عزت برای همه این عزیزان آرزو مندم.

تعهدنامه

اینجانب **فرهاد گیوری** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران-ژئوتکنیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع بهسازی خاک‌های واگرا با استفاده از سولفات پتاسیم تحت راهنمایی آقای دکتر محسن کرامتی 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 است 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 رایانه ای، 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

واگرایی پدیده‌ای است که هنگامی خاک واگرا در مواجهه با آب قرار می‌گیرد، خاک چسبندگی خود را از دست داده ذرات همدیگر را دفع نموده و به راحتی شسته می‌شود. این پدیده از جمله مسائلی است که بی‌توجهی یا عدم شناخت آن می‌تواند موجب خرابی سازه‌های آبی و ابنیه ساخته شده بر روی چنین خاک‌هایی شود. هدف از تحقیق حاضر بررسی تأثیر سولفات پتاسیم بر واگرایی و مقاومت خاک‌های رسی است. برای میل به این هدف، تأثیر سولفات پتاسیم (K_2SO_4) بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و مقاومتی خاک رس واگرا بررسی شده است. نمونه‌های خاک مورد نظر از حوزه آبخیز تمرقره‌قوزی شهرستان کلالة واقع در استان گلستان تهیه شدند. پس از انجام آزمایش‌های اولیه، نمونه‌های خاک با افزودن سولفات پتاسیم در درصدهای ۰، ۰/۵۰، ۱، ۱/۵۰ و ۲ درصد وزنی خشک خاک و در نظر گرفتن رطوبت بهینه و وزن مخصوص ماکزیمم خشک آماده شدند. میزان پتانسیل واگرایی نمونه‌ها با استفاده از آزمایش‌های شیمیایی، پین‌هول و هیدرومتری دوگانه بررسی شده است، همچنین پارامترهای مقاومتی خاک با استفاده از آزمایش تک‌محوری در زمان‌های عمل‌آوری ۱، ۷ و ۲۸ روزه مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن سولفات پتاسیم به خاک باعث کاهش یا رفع پتانسیل واگرایی می‌شود، ضمن آن که افزودن این ماده افزایش مقاومت فشاری را نیز در برداشته به گونه‌ای که در نمونه با ۲ درصد سولفات پتاسیم در زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه مقاومت فشاری به ترتیب ۲۳/۲٪ و ۷۸/۹٪ نسبت به نمونه مرجع افزایش مقاومت داشته است.

کلمات کلیدی : واگرایی - خاک رس - سولفات پتاسیم - پین‌هول - هیدرومتری دوگانه - مقاومت

فشاری

فهرست مطالب

۱- فصل اول :	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- بیان مسئله و اهمیت موضوع	۳
۱-۳- ضرورت انجام تحقیق	۴
۱-۴- فرضیات تحقیق	۵
۱-۵- روش تحقیق	۶
۱-۶- ساختار پژوهش	۶
۲- فصل دوم :	۷
۲-۱- مقدمه	۸
۲-۲- خاک‌های مسئله‌دار	۸
۲-۲-۱- خاک‌های واگرا	۹
۲-۲-۲- خاک‌های متورم شونده	۱۰
۲-۲-۳- خاک‌های رمبنده	۱۱
۲-۲-۴- خاک‌های روانگرا	۱۲
۲-۲-۵- خاک‌های قابل انحلال	۱۴
۲-۲-۶- خاک‌های لس	۱۵
۲-۳- شناسایی خاک‌های واگرا	۱۷
۲-۴- شناسایی صحرایی خاک‌های واگرا	۱۷
۲-۴-۱- توپوگرافی و رنگ خاک	۱۷
۲-۴-۲- حفره حفره یا گودالی شدن	۱۸
۲-۴-۳- خلل و فرج و حفره‌های بزرگ با دیواره‌های عمودی	۱۹
۲-۴-۴- مسیر پریچ و خم کانال‌ها	۱۹
۲-۴-۵- وجود آب‌های کدر	۲۰
۲-۵- شناسایی آزمایشگاهی با انجام آزمایش‌های فیزیکی	۲۰
۲-۵-۱- آزمایش کرامب	۲۱
۲-۵-۲- آزمایش هیدرومتری مضاعف	۲۱
۲-۵-۳- آزمایش پین‌هول	۲۱
۲-۶- شناسایی آزمایشگاهی با انجام آزمایش شیمیایی	۲۲
۲-۷- خسارت خاک‌های واگرا	۲۲
۲-۷-۱- مشکل پایپینگ	۲۳

۲۴	 ۲-۷-۲- آبهستگى خاكهاى واگرا
۲۴	 ۸-۲- روشهاى بهسازى خاكهاى واگرا
۲۵	 ۱-۸-۲- استفاده از ليگنوسولفات و فيبرپلى پروپلين
۲۸	 ۲-۸-۲- استفاده از ليگنوسولفات و الكترواسموز
۳۰	 ۳-۸-۲- استفاده از نانو اكسيد آلومينيوم و آهك
۳۳	 ۴-۸-۲- استفاده از آهك
۳۵	 ۵-۸-۲- استفاده از كلريد منيزيم
۳۶	 ۶-۸-۲- استفاده از آهك و زئوليت
۳۷	 ۷-۸-۲- استفاده از سولفات آلومينيوم
۳۷	 ۸-۸-۲- استفاده از سيمان
۳۸	 ۹-۸-۲- استفاده از فيلتر
۳۸	 ۹-۲- پيشينه تحقيق
۴۳	 ۳- فصل سوم :
۴۴	 ۱-۳- مقدمه
۴۴	 ۲-۳- معرفى منطقه مطالعاتى
۴۶	 ۳-۳- مصالح مصرفى
۴۶	 ۱-۳-۳- خاك قرضه
۴۸	 ۲-۳-۳- سولفات پتاسيم
۵۰	 ۴-۳- آزمايشات آزمايشگاهى
۵۰	 ۱-۴-۳- آزمايش تعيين درصد رطوبت، وزن مخصوص خاك و چگالى ويژه خاك Gs
۵۱	 ۲-۴-۳- آزمايش تعيين حدود آتبرگ ASTM D4318
۵۴	 ۳-۴-۳- آزمايش تراكم به روش پراكتور استاندارد ASTM D698
۵۶	 ۴-۴-۳- آزمايش هيدرومترى مضاعف ASTM D4221
۶۰	 ۵-۴-۳- آزمايش شيمى خاك
۶۲	 ۶-۴-۳- آزمايش پين هول يا سوراخ زنى ASTM D4647
۶۴	 ۷-۴-۳- آزمايش مقاومت فشارى تك محورى ASTM D2166
۶۶	 ۸-۴-۳- آزمايش پتانسيل تورم خاكهاى چسبنده ASTM D4546
۶۹	 ۹-۴-۳- ميكروسكوپ الكترونى SEM
۷۰	 ۱۰-۴-۳- طيف سنجى پراش پرتوايكس EDX
۷۱	 ۱۱-۴-۳- آناليز پراش اشعه ايكس XRD
۷۲	 ۵-۳- برنامه آزمايشها
۷۲	 ۱-۵-۳- ساخت نمونهها بصورت اختلاط با سولفات پتاسيم

۷۳	۳-۵-۲- ساخت نمونه‌های ریمولد شده با سولفات پتاسیم
۷۵	۴- فصل چهارم :
۷۶	۴-۱- مقدمه
۷۶	۴-۲- روش انجام آزمایش
۷۶	۴-۳- بررسی و تحلیل نتایج آزمایش ها
۷۷	۴-۳-۱- نتایج آزمایش تعیین حدود آتربرگ
۷۹	۴-۳-۲- نتایج آزمایش تراکم
۸۱	۴-۳-۳- نتایج آزمایش هیدرومتری مضاعف
۸۴	۴-۳-۴- نتایج آزمایش شیمیایی خاک
۸۷	۴-۳-۵- نتایج آزمایش پین‌هول
۹۵	۴-۳-۶- نتایج آزمایش تک محوری
۹۸	۴-۳-۷- نتایج آزمایش تورم آزاد یا بالازدگی
۹۹	۴-۳-۸- نتایج عکسبرداری میکروسکوپ الکترونی SEM
۱۰۰	۴-۳-۹- نتایج آنالیز EDX
۱۰۱	۴-۴- نتایج مقایسه رده‌بندی واگرایی خاک با آزمایش‌های انجام شده
۱۰۳	۴-۵- بررسی اقتصادی استفاده از سولفات پتاسیم
۱۰۵	۵- فصل پنجم :
۱۰۶	۵-۱- مقدمه
۱۰۶	۵-۲- نتیجه‌گیری
۱۰۸	۵-۳- پیشنهادات
۱۰۹	منابع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ نمایی از تخریب بند خاکی حوزه آبخیز خیرخواجه به علت استفاده از خاک‌های واگرا ۵
- شکل ۱-۲ نمایی از تخریب بند خاکی حوزه آبخیز قویجق به علت استفاده از خاک‌های واگرا ۹
- شکل ۲-۲ نمونه ای از شکستگی‌های ناشی از تورم خاک در کانال‌های زهکشی گمیشان ۱۰
- شکل ۳-۲ نمایی از پدیده رمبندگی در سایت شهر فراغی شهرستان کلاله ۱۲
- شکل ۴-۲ گسترش جانبی زمین مربوط به زلزله Kocaeli ترکیه ۱۹۹۱ در اثر روانگرایی ۱۴
- شکل ۵-۲ نمایی از خاک‌های قابل انحلال در بندهای خاکی حوزه خیرخواجه گنبد ۱۵
- شکل ۶-۲ دیواره‌های ریزی لسی حاشیه جاده اصلی حوزه گلیداغ شهرستان مراوه‌تپه ۱۶
- شکل ۷-۲ نمایی از خاک‌های واگرا حوزه آبخیز تمرقره‌قوزی ۱۸
- شکل ۸-۲ دره‌های عمیق و کم عمق در رسوبات فرسایش یافته در محدوده روستای قوشه‌سومراوه‌تپه ۱۸
- شکل ۹-۲ نمایی از ایجاد خلل و فرج با دیواره‌های عمودی در مسیر رودخانه روستای خوجه‌لر مراوه تپه ۱۹
- شکل ۱۰-۲ نمایی از ایجاد فرسایش به دلیل مسیر پر پیچ و خم رودخانه روستای قویجق کلاله ۱۹
- شکل ۱۱-۲ نمایی از وجود آب‌های کدر در بند خاکی روستای قویجق کلاله ۲۰
- شکل ۱۲-۲ نمودار نتایج استفاده از لیگنوسولفات و فیبر پلی پروپیلین در کاهش پتانسیل واگرایی خاک ۲۶
- شکل ۱۳-۲ نمودار کاهش پتانسیل واگرایی در آزمایش هیدرومتری دوگانه ۲۷
- شکل ۱۴-۲ نمودار نتایج مقاومت تک محوری نمونه‌های مخلوط شده با لیگنوسولفات و فیبر پلی پروپیلین ۲۷
- شکل ۱۵-۲ نمایی از نحوه استفاده از الکترواسموز ۲۸
- شکل ۱۶-۲ نمودار نتایج پتانسیل واگرایی اختلاط خاک با لیگنوسولفات ۲۹
- شکل ۱۷-۲ نمودار کاهش پتانسیل واگرایی خاک نسبت به زمان با ولتاژهای مختلف ۲۹
- شکل ۱۸-۲ نمودار نتایج کاهش پتانسیل واگرایی در فرآیند استفاده از الکترواسموزی ۳۰
- شکل ۱۹-۲ SEM عکس از اختلاط خاک رس واگرا با ۶ درصد آهک و ۱ درصد نانو اکسید آلومینیوم ۳۱
- شکل ۲۰-۲ نمودار تغییرات درصد واگرایی بر حسب تغییرات مقدار نانو اکسید آلومینیوم ۳۲
- شکل ۲۱-۲ نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه بر روی نمونه‌های دارای ۲ درصد آهک و مقادیر مختلف نانو اکسید آلومینیوم ۳۲
- شکل ۲۲-۲ نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه بر روی نمونه‌های دارای ۴ درصد آهک و مقادیر مختلف نانو اکسید آلومینیوم ۳۳
- شکل ۲۳-۲ نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه بر روی نمونه‌های دارای ۶ درصد آهک و مقادیر مختلف نانو اکسید آلومینیوم ۳۳

شکل ۲-۲۴ نمودار تغییرات درصد واگرایی و مشخصات خاک بر حسب تغییرات مقدار آهک در نمونه خاک S2	۳۵
شکل ۲-۲۵ نتایج آزمایش پین هول با درصدهای مختلف کلریدمنیزیم	۳۶
شکل ۲-۲۶ نتایج آزمایش پین هول با ۲ درصد آهک و مقادیر مختلف ژئولیت	۳۷
شکل ۳-۱ کروکی راه دسترسی به روستای تمرقره قوزی شهرستان کلاله	۴۵
شکل ۳-۲ عکس هوایی از سد کوچک مخزنی تمرقره قوزی شهرستان کلاله	۴۵
شکل ۳-۳ خاک مصرفی در پژوهش بصورت نرم و کلوخه	۴۶
شکل ۳-۴ سولفات پتاسیم مصرفی در این پژوهش	۴۹
شکل ۳-۵ انجام آزمایش تعیین حدود آتربرگ	۵۲
شکل ۳-۶ نمودار خمیری خاک	۵۳
شکل ۳-۷ نمودار آزمایش تعیین حدود آتربرگ خاک محل	۵۳
شکل ۳-۸ انجام آزمایش تراکم	۵۴
شکل ۳-۹ منحنی تراکم خاک محل	۵۵
شکل ۳-۱۰ انجام آزمایش هیدرومتری مضاعف	۵۹
شکل ۳-۱۱ منحنی آزمایش هیدرومتری مضاعف خاک محل	۵۹
شکل ۳-۱۲ معیار شرارد جهت شناسایی خاک‌های واگرا به کمک نتایج شیمی خاک	۶۱
شکل ۳-۱۳ نمودار معیار آزمایش پین هول	۶۳
شکل ۳-۱۴ انجام آزمایش پین هول	۶۴
شکل ۳-۱۵ انجام آزمایش تک‌محوری	۶۵
شکل ۳-۱۶ منحنی آزمایش تک‌محوری خاک محل	۶۶
شکل ۳-۱۷ انجام آزمایش تورم	۶۸
شکل ۳-۱۸ عکس SEM از خاک محل	۶۹
شکل ۳-۱۹ نتایج آنالیز EDX خاک محل	۷۰
شکل ۴-۱ نمودار آزمایش تعیین حدود آتربرگ	۷۷
شکل ۴-۲ نتایج آزمایش تعیین حدود آتربرگ با درصدهای مختلف سولفات پتاسیم	۷۸
شکل ۴-۳ منحنی آزمایش‌های تراکم	۷۹
شکل ۴-۴ نتایج آزمایش تراکم با درصدهای مختلف سولفات پتاسیم	۸۰
شکل ۴-۵ نتایج آزمایش هیدرومتری مضاعف با افزودن ۲ درصد سولفات پتاسیم به خاک پایه	۸۱
شکل ۴-۶ نتایج آزمایش هیدرومتری به روش استاندارد با درصدهای مختلف سولفات پتاسیم	۸۲
شکل ۴-۷ نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه با درصدهای مختلف سولفات پتاسیم	۸۲
شکل ۴-۸ نمودار نتایج آزمایش هیدرومتری مضاعف با درصدهای مختلف سولفات پتاسیم	۸۳
شکل ۴-۹ نمودار نتایج PH ، EC و درصد واگرایی نمونه با مقادیر مختلف مواد افزودنی	۸۶

- شکل ۴-۱۰ نمودار ارزیابی میزان واگرایی براساس معیار شرارد ۸۶
- شکل ۴-۱۱ نمودار آزمایش پین هول خاک ریمولد شده محل با زمان عمل آوری ۷ روزه ۸۹
- شکل ۴-۱۲ نمودار آزمایش پین هول خاک ریمولد شده با درصدهای مختلف سولفات پتاسیم در زمان عمل آوری ۱ روزه ۹۲
- شکل ۴-۱۳ نمودار آزمایش پین هول خاک ریمولد شده با درصدهای مختلف سولفات پتاسیم در زمان عمل آوری ۷ روزه ۹۲
- شکل ۴-۱۴ قطر سوراخ و رنگ آب خروجی در پایان آزمایش پین هول با درصدهای مختلف سولفات پتاسیم ۹۳
- شکل ۴-۱۵ نمودار نرخ جریان با هدهای مختلف در آزمایش پین هول با درصدهای مختلف K_2SO_4 برای زمان عمل آوری ۷ روزه ۹۴
- شکل ۴-۱۶ نتایج آزمایش تک محوری با درصدهای مختلف سولفات پتاسیم در زمان عمل آوری ۱ روزه ۹۵
- شکل ۴-۱۷ نتایج آزمایش تک محوری با درصدهای مختلف سولفات پتاسیم در زمان عمل آوری ۷ روزه ۹۶
- شکل ۴-۱۸ نتایج آزمایش تک محوری با درصدهای مختلف سولفات پتاسیم در زمان عمل آوری ۲۸ روزه ۹۶
- شکل ۴-۱۹ نمودار نتایج آزمایش‌های تک محوری با درصدهای سولفات پتاسیم در زمان‌های عمل آوری ۱، ۷ و ۲۸ روزه ۹۷
- شکل ۴-۲۰ نتایج آزمایش‌های تورم آزاد با درصدهای سولفات پتاسیم در زمان عمل آوری ۱ روزه ۹۹
- شکل ۴-۲۱ عکس SEM از خاک مورد پژوهش با ۲ درصد سولفات پتاسیم ۱۰۰
- شکل ۴-۲۲ نمودار آنالیز EDX برای خاک اختلاط شده با ۲ درصد سولفات پتاسیم ۱۰۱
- شکل ۴-۲۳ عکس Map data برای خاک اختلاط شده با ۲ درصد سولفات پتاسیم ۱۰۱

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۲	مشخصات خاک مورد تحقیق برای اختلاط با لیگنوسولفات و فیبرپلی پروپلین	۲۵
جدول ۲-۲	نتایج آزمایش حدود آتربرگ، تراکم و هیدرومتری مضاعف بر روی خاک S2	۳۴
جدول ۳-۲	نتایج آزمایش حدود آتربرگ، تراکم و هیدرومتری مضاعف بر روی خاک S3	۳۴
جدول ۱-۳	مشخصات خاک مصرفی	۴۷
جدول ۲-۳	نتایج آنالیز شیمیایی خاک مورد مطالعه (شرکت بینالود)	۴۷
جدول ۳-۳	مشخصات سولفات پتاسیم استفاده شده در این پژوهش	۴۹
جدول ۴-۳	مقادیر درصد رطوبت و وزن مخصوص دانه‌های جامد خاک	۵۰
جدول ۵-۳	مقادیر حدروانی و حد خمیری خاک محل	۵۲
جدول ۶-۳	مقادیر درصد رطوبت بهینه و دانسیته ماکزیمم خاک محل	۵۵
جدول ۷-۳	پتانسیل واگرایی خاک در آزمایش هیدرومتری دوگانه براساس معیار شرارد	۵۷
جدول ۸-۳	پتانسیل واگرایی خاک در آزمایش هیدرومتری دوگانه براساس معیار بل و ماود	۵۷
جدول ۹-۳	نتایج آزمایش هیدرومتری مضاعف خاک محل پژوهش	۵۸
جدول ۱۰-۳	نتایج آزمایش شیمیایی خاک محل	۶۱
جدول ۱۱-۳	نتایج آزمایش پین‌هول برای خاک محل	۶۳
جدول ۱۲-۳	نتایج آنالیز شیمیایی خاک مورد پژوهش	۷۱
جدول ۱۳-۳	برنامه آزمایش خاک‌های اختلاط شده با سولفات پتاسیم	۷۲
جدول ۱۴-۳	برنامه آزمایش خاک‌های ریمولد شده با سولفات پتاسیم	۷۳
جدول ۱-۴	میزان عناصر موجود در ترکیبات شیمیایی خاک با درصدهای مختلف سولفات پتاسیم	۸۴
جدول ۲-۴	میزان تغییرات PH و EC خاک با درصدهای مختلف سولفات پتاسیم	۸۵
جدول ۳-۴	نتایج آزمایش پین‌هول خاک دست‌نخورده محل	۸۸
جدول ۴-۴	نتایج آزمایش پین‌هول خاک ریمولد شده محل با زمان عمل آوری ۷ روزه	۸۹
جدول ۵-۴	نتایج آزمایش پین‌هول با درصدهای مختلف مواد افزودنی با زمان عمل آوری ۱ روزه	۹۰
جدول ۶-۴	نتایج آزمایش پین‌هول با درصدهای مختلف مواد افزودنی با زمان عمل آوری ۷ روزه	۹۱
جدول ۷-۴	نتایج آزمایش تورم آزاد با درصدهای مختلف سولفات پتاسیم در زمان عمل آوری ۱ روزه	۹۸
جدول ۸-۴	معیار اداره آبادانی زمین ایالات متحده آمریکا برای طبقه بندی پتانسیل تورم	۹۸
جدول ۹-۴	نتایج رده‌بندی واگرایی آزمایش هیدرومتری مضاعف	۱۰۲
جدول ۱۰-۴	نتایج رده‌بندی واگرایی آزمایش شیمیایی	۱۰۲
جدول ۱۱-۴	نتایج رده‌بندی واگرایی آزمایش پین‌هول	۱۰۳

فصل اول

کلیات

کاربرد مهندسی خاک‌ها و سنگ‌ها در ساخت و سازها بر خلاف سایر مواد دارای قدمت تاریخی است. امروزه نیز خاک‌ها و سنگ‌ها از مهم‌ترین مصالح در ساخت و ساز محسوب می‌شود که ممکن است در حالت طبیعی در پی‌ها و حفاری‌ها و یا اینکه به صورت متراکم شده در سدسازی یا خاکریزها مورد استفاده قرار گیرد.

خاک‌ها عمدتاً از خرده سنگ‌ها تشکیل می‌شوند که در برخی موارد نیز به ذرات ریز رسی تجزیه می‌شوند. بنابراین می‌توان گفت که خاک‌ها از مجموعه‌ای ذرات با اندازه‌های مختلف تشکیل شده‌اند. خاک‌های ریزدانه رسی می‌تواند مانند مواد خمیری یا مانند یک قالب کره رفتار کند. اگر رس، میزان زیادی آب در خود داشته باشد به صورت خمیری شده یا مانند کره گرم شده عمل می‌کند، اما اگر رس میزان کمی رطوبت داشته باشد شکننده است و مثل کره سرد دچار ترک شده و می‌شکند.

توصیف خاک در اصل فهرستی از کلیات خاک است و به داشتن یک طرح کلی برای توصیف ویژگی‌های ضروری خاک کمک می‌کند. خواص بسیاری از خاک‌ها با افزایش درصد رطوبت تغییر می‌کند، که این تغییر رطوبت در بسیاری از خاک‌ها باعث بوجود آمدن خسارت‌های غیرقابل جبرانی در پروژه‌های عمرانی می‌شود [۱]. خاک‌های واگرا، رمبنده، لس، خاک‌های متورم و ... از مهم‌ترین خاک‌های حساس در برابر رطوبت می‌باشند که می‌توان به آنها اشاره کرد. خاک‌های واگرا مناطق وسیعی از جهان را شامل می‌شود. خاک‌های واگرا در ایران بخش‌هایی از استان خراسان شامل منطقه سرخس و دشت مشهد، در استان تهران شامل دشت ورامین و ساوه، در استان سیستان و بلوچستان و در استان گلستان بخش‌هایی از دشت گرگان را شامل می‌شود [۲].

واگرایی پدیده‌ای است که هنگامی خاک واگرا در مواجهه با آب قرار می‌گیرد، خاک چسبندگی خود را از دست داده و ذرات همدیگر را دفع می‌کنند. پدیده واگرایی باعث می‌شود ذرات خاک با نیروی خیلی کم ناشی از حرکت آب، از یکدیگر دور شوند و باعث فرسایش سریع خاک می‌گردد. فرسایش

خاک باعث ایجاد حفره‌های خیلی بزرگی شده که این حفره‌های بزرگ باعث بوجود آمدن نشست‌های ناگهانی خاک می‌شود. این نشست‌های ناگهانی باعث خراب شدن سازه‌هایی می‌شوند که بر روی این نوع خاک‌ها ساخته شده است. خاک‌هایی که چسبندگی بالایی دارند و شامل کانی‌های مونتموریلونیت سدیم دار هستند، دارای خاصیت پتانسیل واگرایی بالایی می‌باشند [۳]. گستردگی خاک‌های واگرا و متورم شونده و رفتار پیچیده آنها در تماس با آب، خیلی بیشتر از سایر خاک‌های حساس است. در خاک‌های رس واگرا، ذرات خاک به آسانی در مقابل آب با غلظت کم نمک از هم جدا می‌شوند. این خاک‌ها عموماً مقادیر درصد جذب سدیم آنها بالا می‌باشد و معمولاً نفوذپذیری پایین، حد انقباض بالا و فرسایش پذیری سریعی دارند [۴]. واگرایی پدیده‌ای است که آب از یک نقطه کوچک شروع به جریان کردن می‌کند و به تدریج این جریان گسترش می‌یابد. نقطه شروع پدیده واگرایی شامل ترک‌های ناشی از ریشه گیاهان، نشست خاک و ترک‌های ناشی از حد انقباض بالای خاک می‌باشد [۵]. پدیده واگرایی در پروژه‌هایی نظیر آب بندان‌ها، دایک‌ها، سدهای خاکی و کانال‌های لاینیگ که معمولاً تمرکز فشار آب در داخل خاک وجود دارد از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد، پدیده واگرایی در آب‌بندان‌ها، دایک‌ها و سدهای خاکی می‌تواند باعث بروز مشکلات غیرقابل جبران فراوانی گردد.

پدیده واگرایی، یکی از رایج‌ترین پدیده‌هایی می‌باشد که در خاک‌های ریزدانه اتفاق می‌افتد. پدیده واگرایی باعث بوجود آمدن آسیب‌های زیادی به پروژه‌های عمرانی می‌شود بنابراین لازم است برای جلوگیری از شدت فرسایش خاک و کاهش پتانسیل واگرایی علیرغم امکان حل تمام مشکلات، با اعمال تمهیداتی خسارات وارده بر سازه‌های متکی بر روی خاک واگرا را به حداقل رساند [۳].

۲-۱- بیان مسئله و اهمیت موضوع

خاک‌های واگرا هنگامی که در مواجهه آب با غلظت کم نمک قرار می‌گیرند به راحتی شسته می‌شوند و استفاده از آنها بدون تمهیداتی، تا کنون باعث ایجاد خرابی و خسارات زیادی در آب

بندان‌ها، دایک‌ها و سایر سازه‌های خاکی که بر روی خاک‌های واگرا احداث شده می‌شود. خاک‌های واگرا هنگامی که در مجاورت با آب قرار می‌گیرند نیروی جاذبه بین آنها از بین رفته و ذرات به راحتی از یکدیگر جدا شده و با نیروی کم بصورت معلق درآمده و فرسایش می‌یابند. خاک‌های واگرا طوری هستند که در تماس با آب، ذرات خاک از یکدیگر جدا و پراکنده می‌شوند [۶]. در این حالت خاک استعداد فرسایش پذیری زیادی دارد بطوری که با تنش های بسیار ناچیز در جریان آب با گرا دیان هیدرولیکی خیلی کم روان می‌گردد.

واگرایی خاک ماهیتی فیزیکی و شیمیایی دارد که معمولاً به نوع کانی‌های تشکیل دهنده خاک و خصوصیات شیمیایی آب منفذی بستگی دارد. بر اساس تأثیر آب بر روی رفتار واگرایی خاک، می‌توان گفت که هر گاه خاک‌های واگرا در معرض آب قرار می‌گیرد ذرات رس از هم جدا شده و به صورت معلق در می‌آیند. بنابراین ویژگی‌های مسئله ساز واگرایی عبارتند از :

- | | |
|------------------------------|--------------------------------|
| ۱- آب شستگی خاک‌های واگرا | ۲- بالا آمدن تراز آب زیرزمینی |
| ۳- ترک خوردگی و ریزش سازه‌ها | ۴- نشست‌های غیریکنواخت و |

شناسایی کامل خاک‌های واگرا معمولاً بدون انجام آزمایشات واگرایی غیرممکن است. بنابراین متداول‌ترین آزمایش‌ها برای تشخیص خاک‌های واگرا شامل آزمایشات کرامب، پین‌هول، هیدرومتری مضاعف و آزمایشات شیمیایی خاک می‌باشند. نتایج بدست آمده از انجام آزمایشات فوق دلیلی بر غیرواگرا بودن خاک ها نمی‌باشد، لذا لزوماً نتایج چند آزمایش باید با یکدیگر مقایسه و قضاوت مهندسی صورت گیرد.

۳-۱- ضرورت انجام تحقیق

خاک‌های واگرا از جمله خاک‌های مسئله‌داری هستند که در صورت استفاده از آنها بدون در نظر گرفتن مخاطرات آن، باعث آسیب رساندن به بسیاری از پروژه‌های ژئوتکنیکی می‌شود. گسترش فراوان خاک‌های مسئله‌دار، واگرا و لس به خصوص در قسمت شرقی استان گلستان که

منجر به خسارت‌های زیادی در پروژه‌های عمرانی حوزه‌های آبخیز منطقه و سکونت گاه‌های روستاهای اطراف این مناطق کرده است [۲]. استفاده تنها از خاک‌های واگرا در اغلب پروژه‌های عمرانی مناسب نمی باشد و استفاده از آنها نیازمند اختلاط با مواد دیگر است. در پژوهش‌های انجام شده قبلی، اضافه کردن مواد افزودنی غالباً خاصیت خمیرایی خاک‌ها را کاهش داده، که خود این عامل با توجه به کمبود منابع قرضه خاک رس، برای ساخت بندهای خاکی در حوزه‌های آبخیز استان گلستان، ضرورت انجام تحقیق بیشتر بر روی خاک‌های واگرا را می‌طلبد. استفاده از مواد افزودنی که ارزان بوده، در دسترس باشد، با خاک به راحتی اختلاط شود، محیط زیست را آلوده نکند و در صورت استفاده از منابع آب برای زمین‌های کشاورزی، محصولات کشاورزان را با خطری مواجه نکند.



شکل ۱-۱ نمایی از تخریب بند خاکی حوزه آبخیز خیرخواجه به علت استفاده از خاک‌های واگرا

۴-۱- فرضیات تحقیق

در این پژوهش فرض بر این بوده است که ساخت نمونه‌ها و تراکم آنها به صورت یکنواخت و یکسان با تراکم نسبی ماکزیمم و رطوبت‌های بهینه صورت گرفته است.

۵-۱- روش تحقیق

تحقیقات به چند بخش مطالعات پایان‌نامه‌ها و مقالات، بررسی صحرایی خاک‌های واگرا، بازدید از محل تحقیق و انجام آزمایشات تقسیم می‌شود. در بخش مطالعات پایان‌نامه‌ها و مقالات بیشتر مبانی نظری تحقیق و پیشینه تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد و از تحقیقات انجام شده در زمینه خاک‌های واگرا استفاده می‌شود. در بررسی‌های صحرایی، حوزه آبخیز تمرقره‌قوزی کلاله مورد بررسی قرار می‌گیرد. و در انجام آزمایش‌ها، خاک واگرا با سولفات پتاسیم با نسبت‌های ۰/۵۰ ، ۱/۰ ، ۱/۵۰ و ۲/۰ درصد اختلاط و حدود آتربرگ، وزن مخصوص خشک ماکزیمم، رطوبت‌بهینه، آزمایش هیدرومتری، آزمایش‌های کاهش پتانسیل واگرایی خاک، تعیین پتانسیل تورم و پارامترهای مقاومتی خاک در دستور کار قرار می‌گیرد. بررسی آزمایش‌های واگرایی به دو دسته فیزیکی شامل انجام آزمایشات هیدرومتری مضاعف و پین هول و آزمایش‌های شیمیایی شامل مقادیر نسبی و غلظت کاتیون‌ها در خاک تقسیم می‌شود.

۶-۱- ساختار پژوهش

در پژوهش حاضر، فصل‌های بررسی شده به صورت خلاصه به شرح زیر می‌باشند :

فصل اول، معرفی کلیات پژوهش، ضرورت و اهداف تحقیق بیان شده است.

فصل دوم، ادبیات فنی در مورد شناسایی خاک‌های واگرا و تحقیقات انجام شده در مورد خاک‌های واگرا پرداخته شده است.

فصل سوم، معرفی منطقه مطالعاتی، مصالح مورد استفاده و نحوه انجام آزمایش‌ها بیان می‌شود.

فصل چهارم، شرح کامل آزمایش‌ها با ارائه نمودار و جداول به همراه تفسیر نتایج پرداخته شده است.

فصل پنجم، شامل نتیجه‌گیری کلی و ارائه‌ی پیشنهاد جهت ادامه تحقیق می‌باشد.

فصل دوم

مبانی نظری و پیشینه تحقیق

۲-۱- مقدمه

آب و خاک به عنوان دو منبع اصلی، همواره نیازمند بررسی بیشتر جهت فرآیند ایجاد سازه‌های آبی و خاکی می‌باشد. مسئله واگرایی علاوه بر کارهای عمرانی که توسط مهندسين انجام می‌شود برای کشاورزان از اهمیت زیادی برخوردار است، زیرا باعث شسته شدن خاک و ایجاد خلل و فرج در زمین شده و به زراعت کشاورزان آسیب جدی وارد می‌کند. همچنین رشد جمعیت، کمبود مسکن و افزایش تقاضا، حفر چاه‌های غیرمجاز و کمبود منابع آب و ... بدون درنظر گرفتن مسائل ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی مهندسی، باعث بروز مشکلات فراوانی در پروژه‌های عمرانی شده است که این امر یکی از مهمترین دلایل توجه بیشتر به خاک‌های مسئله‌دار است.

۲-۲- خاک‌های مسئله‌دار

خاک‌های مسئله‌دار خاک‌هایی را شامل می‌شود که هنگامی تحت تأثیر درصد رطوبت و بار وارده ناشی از احداث پروژه‌های مختلف شامل ساختمان‌ها، آب‌بندان‌ها، دایک‌ها و سدهای خاکی قرار می‌گیرند از خود رفتارهایی را نشان می‌دهند که باعث بروز مشکلات فراوانی در طول دوره ساخت یا بهره‌برداری می‌شوند که این موضوع در مسائل ژئوتکنیکی از اهمیت زیادی برخوردار است [۷]. در بسیاری از پروژه‌های عمرانی هنگامی که درصد رطوبت خاک افزایش پیدا می‌کند ظرفیت باربری خاک کاهش یافته و ما شاهد افزایش نشست هستیم که این تغییرات منجر به خسارت‌های عمده‌ای در پروژه‌های عمرانی می‌شود. خاک‌های مسئله‌دار عموماً در برابر آب حساس هستند که می‌توان از مهمترین آنها، خاک‌های متورم شونده، واگرا، انحلال پذیر، رمبنده و ... نام برد [۸].

از میان راه‌حل‌های موجود یکی از بهترین و به‌صرفه‌ترین گزینه‌ها، بهسازی خاک است که در ادامه به آن خواهیم پرداخت.

۲-۱- خاک‌های واگرا

واگرایی پدیده‌ای است که باعث می‌شود هنگامی خاک در معرض آب قرار گیرد، خاک چسبندگی خود را از دست داده و ذرات همدیگر را دفع کنند و ذرات خاک حتی با نیروی کم ناشی از حرکت بسیار آرام آب، از یکدیگر دور می‌شوند و خاک دچار فرسایش سریع می‌گردد. این فرسایش در داخل خاک می‌تواند سبب ایجاد حفرات بزرگ گردد و نشست‌های ناگهانی خاک را باعث شود [۸]. بنابراین تغییرات نشست ناگهانی خاک‌های واگرا باعث خسارت و آسیب دیدن سازه‌هایی می‌شود که بر روی این نوع خاک‌ها قرار گرفته‌اند.

پدیده واگرایی بعلت انحلال برخی یون‌ها و یا غلبه تنش برشی جریان آب بر مقاومت خاک‌های ریزدانه روی می‌دهد. در طی واگرایی خاک‌ها، مشکلاتی بوجود می‌آید که غیرقابل جبران می‌باشد. در خاک‌های واگرا، ذرات خاک در کنار آب چسبندگی خود را از دست می‌دهند و به آسانی شسته شده و فرسایش می‌یابند. عمده ترین مسئله در خاک‌های واگرا، آبشستگی‌های داخلی و مشکلات ناشی از آن در سازه‌های آبی است. این پدیده در بسیاری از سدهای خاکی و خاکریزها، بستر کانال‌ها و سازه‌های آبی دیگری که بر روی این خاک‌ها ساخته شده است دیده می‌شود.



شکل ۲-۱ نمایشی از تخریب بند خاکی حوزه آبخیز قویچق به علت استفاده از خاک‌های واگرا

۲-۲-۲- خاک‌های متورم شونده

خاک‌های متورم خاک‌هایی هستند که حجم آنها در صورت جذب آب افزایش پیدا می‌کنند. معمولاً علت تورم بیشتر خاک‌های رسی وجود کانی‌های متورم شونده مونت موریونیت می‌باشد [۳]. هنگامی که تورم کانی‌های رس بر اثر جذب آب و یا آبیگری باشد، باعث بوجود آمدن فشار زیادی در خاک می‌شود که به آن فشار تورمی گفته می‌شود. فشار حاصل از تورم خاک‌ها می‌تواند موجب خرابی سازه‌های سبک مثل پوشش بتنی کانال‌های لاینینگ، خرابی شالوده‌ها و غیره گردد [۳]. شالوده‌هایی که بر روی خاک‌های متورم احداث می‌شوند، به علت تورم زیاد تحت نیروهای برگشتی زیادی قرار می‌گیرند. این نیروهای برگشتی باعث ایجاد ترک، نشست‌های نامتقارن، بالآمدگی سازه‌های سبک، تخریب شالوده و دال‌ها می‌شوند. جهت شناسایی و تشخیص دقیق خاک‌های متورم شونده، انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی و صحرایی بهترین راه می‌باشند که می‌توان با یک آزمایش ساده ادنومتر بر روی نمونه، میزان تورم را بدست آورد. اما جهت شناسایی اولیه، بازدیدها و روش‌های صحرایی می‌تواند مفید واقع شوند. لازم به یادآوری است که، خاک‌های متورم دقیقاً بر خلاف خاک‌هایی هستند که قابلیت تحکیم را دارند. بطوریکه به جای کاهش حجم و درصد رطوبت و افزایش وزن مخصوص، حجم و درصد رطوبت آنها افزایش پیدا کرده و وزن مخصوص آنها کم می‌شود.



شکل ۲-۲ نمونه ای از شکستگی‌های ناشی از تورم خاک در کانال‌های زهکشی گمیشان

۲-۳- خاک‌های رمبنده

خاک‌های رمبنده، خاک‌هایی هستند که در حالت طبیعی غیر اشباع می‌باشند اما هنگام اشباع شدن، حجم آنها تغییرات زیادی پیدا می‌کنند. این تغییر حجم می‌تواند به علت بارهای اضافی باشد. برای تشریح بیشتر خاک‌های رمبنده لازم است نمودار تغییرات تخلخل در برابر سربار وارد بر خاک رسم و بوسیله شاخص رمبندگی مقدار آن سنجیده شود. خاک‌های رمبنده خاک‌های طبیعی هستند که در برابر آب و فشار دچار تغییرات زیادی در ماهیت خود می‌شوند. از شاخص‌ترین نشانه خاک‌های رمبنده می‌توان به وزن مخصوص پایین آنها همراه با تخلخل زیاد این نوع خاک‌ها نام برد. تخلخل و فضای خالی بالا در این خاک‌ها ناشی از قرار گرفتن بافت خاک شبیه لانه زنبور می‌باشد. به طوریکه ذرات خاک با تشکیل بافت‌هایی، باعث بوجود آمدن قوس‌های کوچک در خاک می‌شود. قرار گرفتن این قوس‌ها در کنار هم باعث ایجاد فضای خالی زیادی در بافت خاک می‌شود [۹]. هنگامی که خاک‌های رمبنده تحت تأثیر درصد جذب آب، اشباع می‌شوند، ساختار خاک آنها تحت کوچکترین سربار در هم ریخته و تخلخل آنها کاهش می‌یابد و این کاهش تخلخل باعث ایجاد نشست‌های ناگهانی در بافت خاک می‌شود. وقتی که ساختار خاک بر اثر جذب آب بهم می‌خورد این بهم خوردگی باعث نرم شدن خاک می‌شود که پدیده نرم‌شدگی به دلیل از بین رفتن نیروی بین مولکول‌های خاک، از بین رفتن پیوستگی بین دانه‌های جامد خاک و افزایش تنش برشی خاک نسبت به مقاومت خاک است [۱۰]. خاک‌های رمبنده هنگامی در معرض جریان آب قرار می‌گیرند دچار نشست ناگهانی زیادی می‌شوند که این تغییرات نشست، باعث ایجاد خسارات غیرقابل جبران به سازه‌هایی که روی این خاک‌ها قرار گرفته‌اند می‌شود. رمبندگی بیشتر شامل خاک‌هایی است که خاک دارای بافتی ضعیف، وزن مخصوص پایین و فضای خالی زیاد می‌باشند. از برجسته‌ترین این خاک‌ها می‌توان به لس ها و سیلت‌هایی که دارای بافت لانه زنبوری می‌باشند اشاره کرد [۱۱].



شکل ۳-۲ نمایی از پدیده رمبندگی در سایت شهر فراغی شهرستان کلاله

۴-۲-۲- خاک‌های روانگرا

روانگرایی یکی از شاخص‌ترین مسائل مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای می‌باشد. با توجه به خرابی‌های ناشی از دو زلزله نیگاتا ژاپن در سال ۱۹۶۴ و زلزله آلاسکا در سال ۱۹۶۴ مانند گسیخته شدن شالوده‌ها، گسترش جانبی زمین، خراب شدن پل‌ها، و ایجاد خسارت زیاد به ساختمان‌ها بویژه در مناطق ساحلی باعث توجه بیشتر مهندسان ژئوتکنیک به این نوع پدیده شد بطوریکه در طی حدود ۳۵ سال پس از این زلزله‌ها روانگرایی توسط محققان بررسی و مطالعه شده است.

با توجه به گذشت سال‌ها از آشنایی مهندسان ژئوتکنیک و متخصصان زلزله پیرامون پدیده روانگرایی و انجام مطالعات زیاد و تحقیقات گسترده آزمایشگاهی، وقوع روانگرایی همچنان باعث بروز خسارات غیرقابل جبران زیادی در اغلب پروژه‌ها شده است. با توجه به جنس خاک اغلب مناطق ساحلی در دنیا، بخصوص شمال و جنوب ایران که عمدتاً جنس خاک از سیلت و ماسه‌های اشباع

می‌باشند بحث روانگرایی از اهمیت بسزایی برخوردار است. با در نظر گرفتن تراکم جمعیت در مناطق ساحلی که ناشی از جاذبه‌های گردشگری، ماهیگیری و ... می‌باشد باید توجه ویژه‌تری به بحث روانگرایی و مقاوم سازی سازه‌ها در این مناطق شود.

به طور کلی هرگاه خاک‌های سیلتی و ماسه‌ای شل و اشباع در معرض ارتعاشات ناشی از زلزله زمین قرار بگیرند خاک‌ها تمایل دارند که متراکم شوند ولی در محدوده‌ای از قطر دانه‌بندی ذرات، زهکشی به کندی انجام می‌شود بطوری که تغییرات حجمی سریع خاک به دلیل عدم زهکشی مناسب باعث بالا رفتن فشار آب حفره ای می‌شود. هنگامی که فشار آب حفره‌ای افزایش پیدا می‌کند تنش مؤثر کاهش یافته و به دنبال آن مقاومت برشی خاک‌ها کاهش می‌یابد. بر اساس رابطه تنش مؤثر، ممکن است به دلیل افزایش فشار آب حفره‌ای زیاد، تنش مؤثر کم و یا حتی صفر شود که این امر باعث می‌شود خاک به کلی مقاومت خود را از دست داده و به حالت سیال یا روان درآید که اصطلاحاً به این پدیده روانگرایی گفته می‌شود.

$$\sigma' = \sigma - u$$

$$T = \sigma' \tan \phi' + c'$$

$$T = \sigma' \tan \phi', c' = 0$$

$$T = (\sigma - u) \tan \phi'$$

$$u = \sigma \rightarrow T = 0 \rightarrow \text{Liquefaction}$$

پدیده روانگرایی در ساختمان‌ها، پل‌ها، خصوصاً در سازه‌های دفن شده و دیگر پروژه‌ها و تأسیسات زیرزمینی به طرق مختلفی اثر گذار است. روانگرایی همچنین به نحوی بر روی حرکات سطح زمین و جابه جایی‌ها اثر می‌گذارد.

هنگامی که خاک‌های سیلتی و ماسه‌ای شل و اشباع تحت اثر ارتعاش‌های ناشی از زلزله قرار می‌گیرند بصورت گل سیال و روان درآمده که به این پدیده، روانگرایی گفته می‌شود. به طور واضح‌تر هنگامی که مصالح دانه‌ای به حالت مایع روان در می‌آیند پدیده واگرایی اتفاق افتاده است [۱۲].



شکل ۴-۲ گسترش جانبی زمین مربوط به زلزله Kocaeli ترکیه ۱۹۹۱ در اثر روانگرایی

۲-۲-۵- خاک‌های قابل انحلال

زمانی که خاک‌ها دارای مقادیر زیادی کانی‌های انحلال پذیر نظیر نمک و گچ هستند هنگام مواجه با آب، کانی‌های انحلال پذیر در آب حل شده و به صورت محلول درآمد و با آب خارج می‌شوند. در صورتی که مقدار مواد انحلال پذیر در خاک زیاد بوده و انحلال پذیری تداوم داشته باشد، شاهد افزایش فضای خالی، پوک شدن خاک و بوجود آمدن نشست‌های زیادی در خاک هستیم که این عوامل باعث تخریب سازه‌هایی می‌شود که بر روی این خاک‌ها قرار گرفته است [۱۳]. از طرف دیگر انحلال کانی‌هایی مثل گچ و نمک باعث می‌شود که فضاهای خالی ایجاد شده با آب جایگزین شود که این مسئله باعث کاهش دانسیته و مقاومت خاک می‌شود [۱۴]. در صورتیکه مقدار مواد انحلال پذیر تا ۳٪ باشد می‌توان گفت که مشکلی برای سازهایی که بر روی این خاک‌ها قرار گرفته است نمی‌افتد. اما با توجه به رشد جمعیت، تغییر کاربری زمین‌های کشاورزی و ساخت و سازهای غیرمجاز و ویلاسازی‌ها، لازم است که مطالعات دقیق‌تری بر روی این خاک‌ها انجام شود تا مانع از ایجاد خسارت بزرگی شود که قرار است بر روی این خاک‌ها احداث شود [۱۳].



شکل ۵-۲ نمایی از خاک‌های قابل انحلال در بندهای خاکی حوزه خیرخواجه گنبد

۶-۲-۲- خاک‌های لس

Feda خاک‌های لسی را رسوبات بادی تعریف کرد که دارای قابلیت پتانسیل رمبندگی بالایی هستند. رنگ خاک‌های لسی معمولاً زرد کم‌رنگ می‌باشد. خاک‌های لسی هنگامی که خشک هستند مثل حبه قند سفت و محکم می‌باشند که قادرند در ترانشه‌هایی با شیب ۹۰ درجه پایدار بمانند ولی در صورتیکه رطوبت آنها افزایش یابد مثل قند در آب حل شده و مقاومت آنها به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. لس‌ها از رسوبات بادرفتی تشکیل شده‌اند که از نظر کانی شناسی عموماً شامل فلدسپات‌ها، کربنات‌ها و ... تشکیل شده‌اند. خاک‌های لسی در حالت طبیعی متخلخل بوده و درجه اشباع پایینی دارند که به محض جذب رطوبت ساختار آنها کاملاً عوض می‌شود [۱۵].

همان طور که اشاره شد، خاک‌های لسی شامل رسوبات بادرفتی هستند که با گذشت زمان بوجود آمده‌اند. با توجه به ماهیت تشکیل خاک‌های لسی، ذرات خاک در جهت جریان باد جابجا می‌شوند که مقدار این جابجایی به اندازه ذرات و سرعت باد دارد که پس از این مرحله خاک‌های لسی روی هم انباشته شده و بوجود می‌آیند.

آب عامل اصلی در ایجاد پدیده‌های مخاطره آمیز در لس است. فرآیندهایی چون فرسایش، فرونشست دامنه‌ها، رمبندگی و واگرایی در اثر عملکرد آب در لس‌ها بوجود می‌آید.

پهنه وسیعی از شرق، شمال شرق و دامنه‌هایی از رشته کوه البرز در شهرستان کلالة، مراوه‌تپه واقع در استان گلستان را با رسوبات لسی پوشیده شده است. با تکمیل نقشه مناطق خاک‌های لسی استان گلستان، نزدیک به ۵۰۰ هزار هکتار از خاک‌های استان گلستان پوشیده شده از نهشته‌های لسی می‌باشد. حدود ۱۵ درصد از خاک‌های لسی استان گلستان که تقریباً چیزی حدود ۷۵ هزار هکتار می‌باشد را زمین‌های کشاورزی، حدود ۴۵ درصد که تقریباً نزدیک به ۲۲۵ هزار هکتار می‌باشد را مرتع و مابقی خاک‌های لسی در شهرها، جنگل‌ها، روستاها، و جاده‌ها استان تشکیل شده است [۱۶].

با مقایسه عناصر اصلی در لس‌های منطقه استان گلستان با کشورهای همسایه شمالی مشخص می‌شود که لس‌های موجود در حوضه قره‌تیکان با لس‌های موجود در حوضه آسیای میانه به ویژه کشور ازبکستان و تاجیکستان از یک منشاء می‌باشند [۱۷].



شکل ۲-۶ دیواره‌های ریزشی لسی حاشیه جاده اصلی حوزه گلیداغ شهرستان مراوه‌تپه

۲-۳- شناسایی خاک‌های واگرا

طی سالیان گذشته محققین زیادی روش‌های مستقیم و غیرمستقیمی را برای ارزیابی پتانسیل واگرایی خاک‌های ریزدانه رسی پیشنهاد نموده‌اند. شناسایی خاک‌های واگرا معمولاً بر اساس روش‌های آزمایشگاهی با انجام آزمایشات مربوطه و روش شناسایی صحرایی صورت می‌گیرد. شناسایی صحرایی خاک‌های واگرا در محل، معمولاً بر اساس مشاهده فرسایش سطحی خاک، وجود آب‌های کدر در جایی که آب راکد می‌باشد، آبستگی‌های عمیق و کوزه‌ای شکل و غیره صورت می‌گیرد. روش‌های آزمایشگاهی را می‌توان با انجام آزمایش‌های پین‌هول، هیدرومتری مضاعف، کرامب و آنالیز کاتیون‌های موجود در خاک، به دو دسته شیمیایی و فیزیکی تقسیم نمود. انجام آزمایش واگرایی به روش‌های مختلفی توصیه شده است که در فصل‌های بعدی به اختصار توضیح داده می‌شود [۳].

۲-۴- شناسایی صحرایی خاک‌های واگرا

۲-۴-۱- توپوگرافی و رنگ خاک

در مناطق با شیب نسبتاً زیاد، شناسایی خاک‌های واگرا راحت تر می‌باشد. زیرا در این مناطق، شاهد فرسایش‌های زیاد ناشی از بارندگی‌ها، و بریدگی‌های بسیار عمیق و زیادی به وضوح قابل مشاهده می‌باشد. در مناطقی که شیب ترانشه‌ها کم بوده و زمین بصورت مسطح می‌باشد، تشخیص خاک‌های واگرا به آسانی قابل تشخیص نمی‌باشد. زیرا با توجه به مسطح بودن زمین در این مناطق، هنگام بارندگی‌ها ذرات خاک رس واگرا شسته شده و لایه‌ای از لای در سطح باقی می‌ماند که از لایه‌های پایین‌تر محافظت می‌کند. یکی از مشخصات بارز خاک‌های واگرا، بریدگی‌های عمیق و فرسایش پذیری آنها می‌باشد که این پدیده‌ها معمولاً در سطح مشاهده نمی‌شوند. بنابراین مشاهده نشدن علائمی مثل بریدگی‌های عمیق، فرسایش و ... نمی‌تواند به معنای نبود خاک‌های واگرا در منطقه مطالعاتی باشد [۳].

رنگ خاک عموماً تابع ترکیبات کانی‌های تشکیل دهنده آنها و شرایط آب و هوایی و میزان بارندگی‌ها در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. بنابراین خاک‌های تیره که حاوی مواد آلی و خاک‌های نباتی بوده عموماً فاقد پتانسیل واگرایی می‌باشند.



شکل ۲-۷ نمایی از خاک‌های واگرا حوزه آبخیز تمرقره قوزی

۲-۴-۲- حفره حفره یا گودالی شدن

هنگامی که خاک سطحی بوسیله خاکبرداری، حفاری و یا فرسایش برداشته می‌شود می‌توان وجود حفره‌های ایجاد شده در خاک‌های زیر سطحی که در معرض بارندگی‌ها یا جاری شدن آب‌ها بوده را به وضوح مشاهده نمود که علامت گودالی شدن خاک‌ها در سطح زمین از نشانه‌های وجود پتانسیل واگرایی در خاک‌های منطقه می‌باشد [۱۸].



شکل ۲-۸ دره‌های عمیق و کم عمق در رسوبات فرسایش یافته در محدوده روستای قوشه‌سو مراوه‌تپه

۲-۴-۳- خلل و فرج و حفره‌های بزرگ با دیواره‌های عمودی

حفره‌های عمودی در دیواره‌ها و ایجاد کانال‌های حاصل از فرسایش و آب شکستگی در ترانشه‌ها که شبیه دیواره غارها می‌باشد از علائم وجود خاک‌های واگرا در منطقه می‌باشد [۳].



شکل ۲-۹ نمایی از ایجاد خلل و فرج با دیواره‌های عمودی در مسیر رودخانه روستای خوجه‌لر مراوه‌تپه

۲-۴-۴- مسیر پرپیچ و خم کانال‌ها

یکی از مشخصات بارز کانال‌های ناشی از آب شکستگی در خاک‌های واگرا، مسیر پر پیچ و خم آنها است معمولاً زاویه‌ی خمش مسیر این کانال‌ها حدود ۹۰ درجه می‌باشد [۳].



شکل ۲-۱۰ نمایی از ایجاد فرسایش به دلیل مسیر پر پیچ و خم رودخانه روستای قویجق کلاله

۲-۴-۵- وجود آب‌های کدر

هنگامی که آب پس از بارندگی بر گودالی یا پشت آب‌بندهای کشاورزی، روی سطح خاک‌های واگرا جمع می‌شود رنگ آب کدر می‌باشد که این کدري رنگ را می‌توان یکی از نشانه‌های خاک واگرا برشمرد [۱۶].



شکل ۲-۱۱ نمایی از وجود آب‌های کدر در بند خاکی روستای قویچق کلاله

۲-۵- شناسایی آزمایشگاهی با انجام آزمایش‌های فیزیکی

برای تشخیص خاک‌های واگرا می‌توان از آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی استفاده کرد که آزمایش‌های فیزیکی رایج برای مشخص کردن پتانسیل واگرایی عبارتند از آزمایش کرامب^۱، پین‌هول^۲ و هیدرومتری دوگانه^۳.

^۱ Crumb test

^۲ Pinhole test

^۳ Double hydrometer test

۲-۵-۱- آزمایش کرامب

این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM D6572 انجام می‌شود. ابتدا مقدار کوچکی از خاکی که حدود ۶۰ درصد حد خمیری رطوبت دارد تهیه می‌نماییم سپس آن را به آرامی درون یک مزور قرار داده و پس از حدود ۱۵ دقیقه شدت واکنش آن با آب، مورد ارزیابی قرار داده می‌شود و واگرایی آن را با توجه به میزان کدر بودن آب تشخیص می‌دهیم [۱۹].

۲-۵-۲- آزمایش هیدرومتری مضاعف

این آزمایش بر اساس استاندارد ATM D4221 انجام می‌شود. از ترکیب نتایج این آزمون با آزمایش دانه‌بندی به روش ته‌نشینی مطابق استاندارد ASTM D422 می‌توان شاخص واگرایی خاک‌های رسی را بدست آورد.

در مرحله اول آزمایش هیدرومتری با کمک ماده شیمیایی پراکنده‌ساز هگزامتافسفات سدیم و با استفاده از همزن مکانیکی انجام می‌شود و در مرحله دوم آزمایش بدون استفاده از ماده پراکنده‌ساز هگزامتافسفات سدیم و همزن مکانیکی انجام می‌شود. در هر دو آزمایش منحنی‌های دانه‌بندی ترسیم و میزان واگرایی بصورت نسبت ذرات کوچکتر از $0/005$ میلیمتر در مرحله دوم به ذرات کوچکتر از $0/005$ میلیمتر در مرحله اول تعیین می‌شود [۲۰].

۲-۵-۳- آزمایش پین‌هول

آزمایش پین‌هول ابتدا توسط شرارد و همکاران در سال ۱۹۷۶ برای ارزیابی پتانسیل واگرایی خاک‌های متراکم شده در نظر گرفته شد. این آزمایش بر اساس استاندارد ATM D4647 انجام می‌شود که ارائه دهنده روشی مناسب برای اندازه‌گیری و مشخص شدن پتانسیل واگرایی و میزان فرسایش‌پذیری خاک‌های رسی توسط ایجاد یک سوراخ کوچک در وسط نمونه می‌باشد [۲۱].

۲-۶- شناسایی آزمایشگاهی با انجام آزمایش شیمیایی

ارزیابی پتانسیل واگرایی در روش شیمیایی معمولاً بر اساس عناصر موجود در آب منفذی و مقدار کاتیون‌های خاک تعیین می‌گردد. به این ترتیب که از نمونه خاک، عصاره گل اشباع تهیه شده و مقادیر سدیم، کلسیم، منیزیم و پتاسیم بدست می‌آید و میزان املاح محلول و درصد جذب سدیم آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مهمترین معیارهایی که باید در روش ارزیابی پتانسیل واگرایی به روش شیمیایی مورد توجه قرار داد شامل نسبت جذب سدیم^۱ و میزان کل املاح محلول^۲ در خاک می‌باشند. افزایش هر یک از پارامترهای نسبت جذب سدیم و درصد سدیم^۳ نشان دهنده افزایش یون سدیم در کاتیون‌های جذب شده می‌باشد و در نتیجه با بالا رفتن این پارامترها واگرایی خاک‌ها افزایش می‌یابد [۲۲].

۲-۷- خسارت خاک‌های واگرا

در سراسر دنیا، مشکلات مربوط به خاک‌های واگرا تقریباً یکسان می‌باشد. سدها، آب بندان‌ها، کانال‌ها و بطور کل تمام سازه‌هایی که بر روی خاک‌های واگرا ساخته شده‌اند همگی به مقدار کم یا زیاد دچار فرسایش درونی و سطحی در محل احداث پروژه‌ها می‌شوند. علائم فرسایش که یکی از نشانه‌های خاک‌های واگرا می‌باشد در بیشتر کانال‌های لاینینگ، زهکش‌ها، گالی رودخانه‌ها و شیب دامنه‌ها مشاهده می‌شوند. مشکل اساسی خاک‌های واگرا حفره‌ها یا درزهایی هستند که در زیر خاک‌های واگرا شکل می‌گیرند. مجراهای واگرای ایجاد شده در سدها می‌تواند در اولین آبرگیری سد یا بعد از اولین پرشدن کامل آن روی دهد. حرکت جریان آب از بین ترک‌های ایجاد شده بواسطه پتانسیل واگرایی خاک‌ها، باعث جابجایی ذرات رس شده و زمانی که نرخ این جابجایی بیشتر می‌شود،

¹ SAR (Sodium Adsorption Ratio)

² Tds (Total dissolved solids)

³ Ps (Sodium Percentage)

سرعت نفوذ نیز بیشتر می‌شود.

خاک‌های واگرا به عنوان مصالح فونداسیون یا به عنوان مواد پرکننده در ساخت سازه‌های هیدرولیکی مناسب نیستند. استفاده از خاک‌های رسی واگرا در سازه‌های هیدرولیکی، سدهای خاکی یا دیگر سازه‌ها مانند پوشش کانال، خاکریزی جاده، می‌تواند مشکلات مهندسی ایجاد کند.

معمولاً شکل اصلی خسارت در سازه‌های خاکی بیشتر فرسایش و جابجایی ذرات خاک می‌باشد که ذرات خاک بصورت شناور در می‌آیند. و ایجاد خسارت در کانال‌های لاینینگ و آبیاری بیشتر مربوط به شسته شدن و خرد شدن سازه‌های بتنی که بر روی این خاک‌ها قرار گرفته‌اند می‌باشد. در کانال‌هایی که دارای پوشش بتنی می‌باشند به علت ایجاد فضاهای خالی ناشی از فرسایش خاک‌های واگرا، سازه‌های بتنی ترک خورده که این امر بعضاً منجر به جابجایی و لغزش می‌شود. بطور کلی ترک خوردن سازه‌های بتنی بصورت مقطعی بوده و با توجه به مقدار فرسایش میزان خرابی‌ها متفاوت می‌باشد. در شبکه آبیاری سد گتوند، بعد از برداشتن قطعات تخریب شده بتنی در محل اجرای پروژه، در بعضی از قسمت‌ها حفره‌هایی به قطر ۵۰/۰ متر در زیر پوشش بتنی ایجاد شده بود. پدیده واگرایی بر روی تاج خاکریز به علت فرسایش و آب شستگی‌ها به وضوح قابل مشاهده می‌باشد که علت اصلی آن پتانسیل واگرایی خاک‌های استفاده شده می‌باشد.

۲-۷-۱- مشکل پاپینگ

فرسایش عمدتاً در خاک‌های بدون چسبندگی یا واگرا رخ می‌دهد که مقاومت کمی در برابر نیروهای منقبض کننده آب نفوذ یافته دارند. در مورد رس واگرا، پاپینگ به دلیل فرآیند جابجایی ایجاد می‌شود که آب از بین ترک‌ها یا شکاف‌ها عبور کرده و مسیر خود را باز می‌کند. صدمه نشت در خاکریزی‌های ایجاد شده با خاک‌های واگرا بیشتر در جاهایی اتفاق می‌افتد که احتمال ایجاد ترک و شکاف وجود دارد، مانند کانال‌ها یا مجراهای طولانی آب، یا در جاهایی که اختلاف‌هایی بین قابلیت تراکم‌پذیری مواد پی و فونداسیون وجود دارد. زمانی که یک نشت در سازه خاکریزی شده با رس واگرا

ایجاد می‌شود، یکی از این دو حالت ایجاد می‌شود :

۱- اگر سرعت نشت خیلی کم باشد، رس اطراف کانال جریان دچار تورم و برآمدگی می‌شود و به تدریج نشتی را مسدود می‌کند.

۲- اگر سرعت اولیه نشت زیاد باشد، ذرات رس واگرا شده حمل می‌شوند و باعث بزرگ شدن کانال با سرعتی زیاد می‌شود که تورم دیواره‌های آن نمی‌تواند مسیر عبور جریان را مسدود نموده و همین امر منجر به ایجاد پایپینگ می‌گردد [۲۳].

۲-۷-۲- آبشستگی خاک‌های واگرا

آبشستگی بیشتر با حرکت ذرات رس‌های واگرا در پایین دست سازه‌های خاکی و یا در محل اتصال رس‌های واگرا با لایه‌های خاک ریزدانه غیرچسبنده که قابلیت نفوذپذیری بالایی دارند اتفاق می‌افتد که این امر باعث فرسایش سازه می‌شود. که با گذشت زمان مقدار فرسایش افزایش می‌یابد که ادامه دار بودن این فرآیند باعث تخریب سازه‌هایی که بر روی خاک‌های واگرا قرار گرفته اند می‌شود [۳].

۲-۸- روش‌های بهسازی خاک‌های واگرا

بهسازی خاک معمولاً در شرایطی مطرح می‌شود که خاک از نظر مسائل مهندسی ضعیف می‌باشد. عملیات بهسازی برای اصلاح خاک با توجه به شرایط تعریف پروژه و دستیابی به هدف‌های مختلف انجام می‌شود. انتخاب روش‌های بهسازی خاک به عوامل زیادی از جمله اهمیت پروژه، نوع خاک، درصد مقدار خاک‌های ریزدانه، تجهیزات و امکانات و در آخر که مهمترین آن می‌باشد به هزینه‌ای که قرار است توسط کارفرما پرداخت شود بستگی دارد.

برای بهسازی خاک، هدف‌های متفاوتی وجود دارند که می‌توان به افزایش ظرفیت باربری خاک، کاهش نشست، از بین بردن روانگرایی، کاهش پتانسیل تورم، افزایش حدود آتربرگ و ... اشاره کرد. انتخاب روش تثبیت خاک برای خاک‌ها امر بسیار سختی می‌باشد. مهندس ژئوتکنیک باید به کلیه

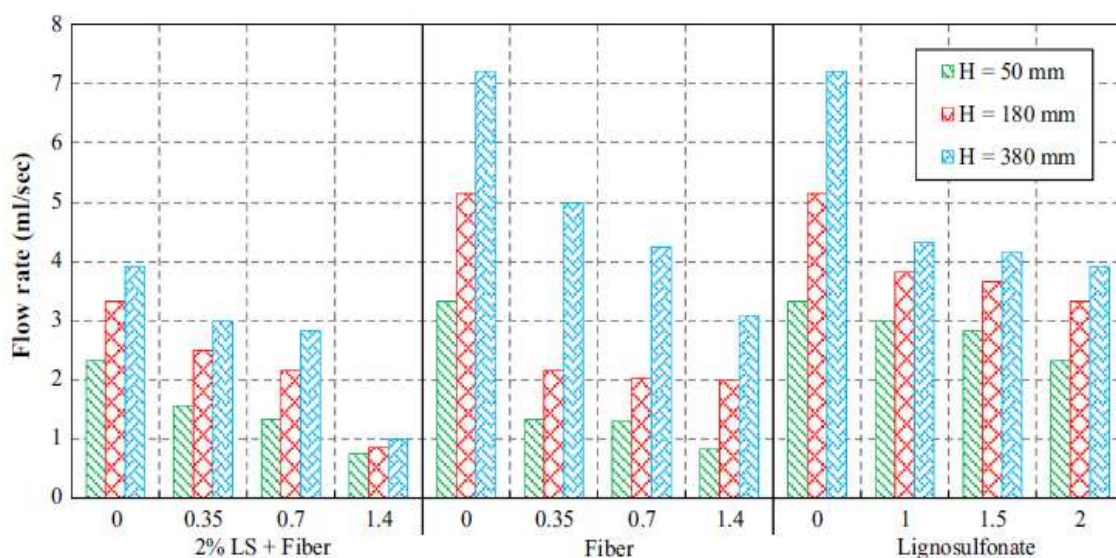
مسائل اشراف کامل داشته باشد و به کلیه امور فنی، اقتصادی، تجهیزات مسلط باشد و تجربه لازم موفق در روش پیشنهادی را داشته باشد. واگرایی عموماً وابسته به نتایج شیمیایی و فیزیکی خاک بوده و در بسیاری از مراجع، استفاده از خاک‌های واگرا در سازه‌هایی که خاک مستقیماً با آب در ارتباط می‌باشد توصیه نمی‌شود. اما در مواقعی که مجبور به استفاده از این خاک‌ها به علت در دسترس نبودن خاک مناسب و نداشتن توجیه اقتصادی هستیم باید از ترکیب اینگونه خاک‌ها با مواد افزودنی مثل سیمان، آهک و ... برای تثبیت نمونه‌ها استفاده کرد.

۲-۸-۱- استفاده از لیگنوسولفات و فیبرپلی پروپلین

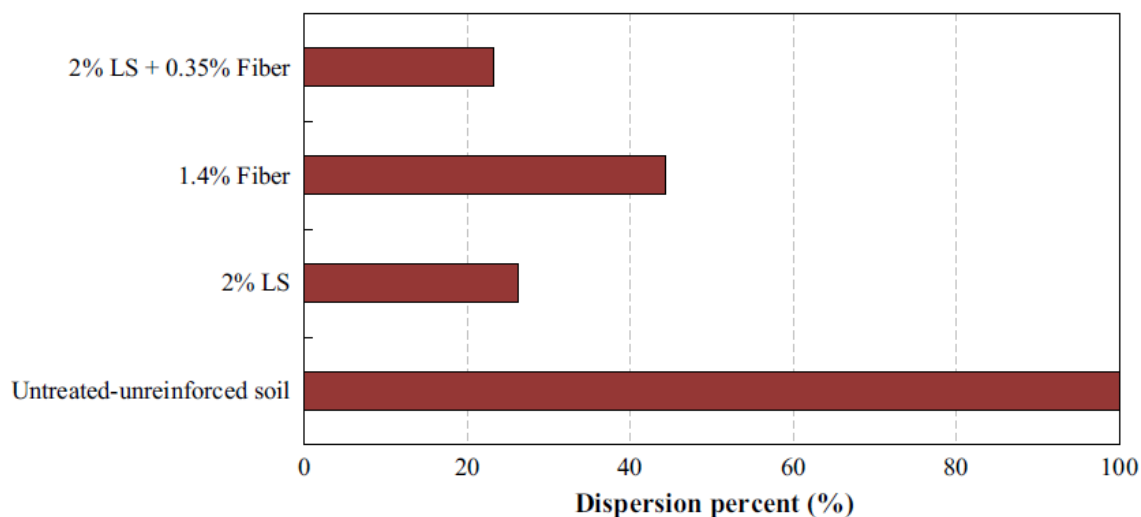
امیرحسین وکیلی و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از لیگنوسولفات به عنوان یک تثبیت کننده سازگار با محیط زیست و فیبرپلی پروپلین به عنوان تقویت کننده مواد، کمک شایانی به مقاومت خاک در برابر واگرایی نموده‌اند. در این تحقیق خاک با مشخصات جدول ۱-۲ با درصدهای مختلف لیگنوسولفات و فیبرپلی پروپلین اختلاط و با انجام آزمایش‌های پین‌هول و تک‌محوری نتایج زیر بدست آمده است [۲۴].

جدول ۱-۲ مشخصات خاک مورد تحقیق برای اختلاط با لیگنوسولفات و فیبرپلی پروپلین [۲۴]	
Soil property	Value
Clay content (%)	45
Silt content (%)	49
Sand content (%)	6
Liquid Limit (%)	34
Plastic Limit (%)	16
Plasticity Index (%)	18
Soil classification Based on unified soil classification system	CL
Maximum dry density (gr/cm ³)	1.74
Optimum moisture content (%)	19.60
Pinhole classification	D1

مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که اختلاط خاک با لیگنوسولفات و فیبر پلی پروپیلین به تنهایی تأثیر زیادی در کاهش واگرایی خاک نداشته است. زمانی که خاک با ۲ درصد لیگنوسولفات و ۰/۳۵ درصد فیبر پلی پروپیلین اختلاط شده پتانسیل واگرایی به شدت کاهش پیدا کرده است. و باعث تجمع و پیوستگی نمونه شده، بطوریکه میزان جریان آب خروجی و میزان فرسایش خاک کاهش یافته و باعث از بین رفتن پتانسیل واگرایی در آزمایش پین هول شده است. همچنین با انجام آزمایش هیدرومتری دوگانه پتانسیل واگرایی خاک از ۱۰۰ درصد به ۲۳ درصد کاهش یافته است.

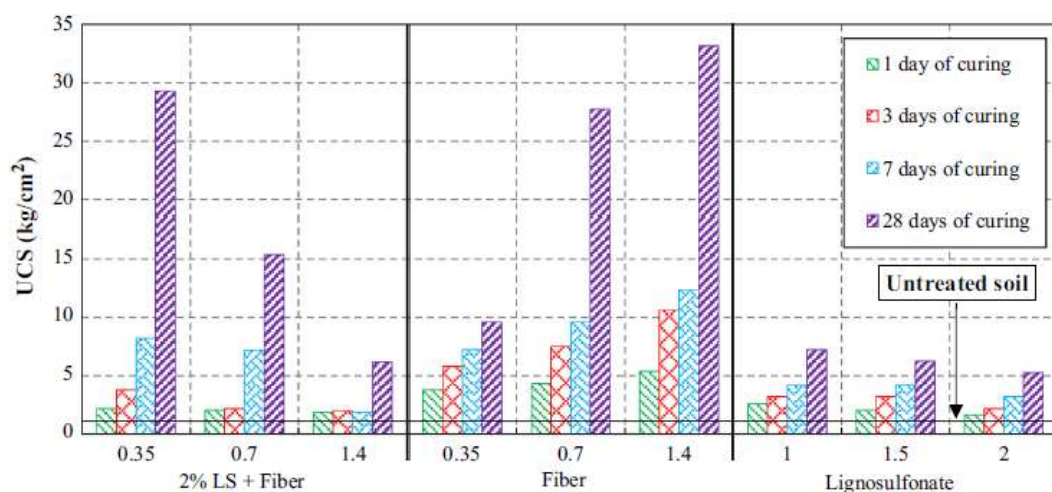


شکل ۲-۱۲ نمودار نتایج استفاده از لیگنوسولفات و فیبر پلی پروپیلین در کاهش پتانسیل واگرایی خاک [۲۴]



شکل ۲-۱۳ نمودار کاهش پتانسیل واگرایی در آزمایش هیدرومتری دوگانه [۲۴]

در تحقیق انجام شده با اضافه کردن لیگنوسولفات و فیبر پلی پروپیلین با درصدهای مختلف به بررسی مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها پرداخته شده است. با آزمایشات صورت گرفته، مشخص شد که لیگنوسولفات بر خلاف فیبر پلی پروپیلین به تنهایی تأثیر زیادی در افزایش مقاومت تک محوری نمونه‌ها ندارد اما اختلاط خاک با ۲ درصد لیگنوسولفات و ۰/۳۵ درصد فیبر پلی پروپیلین در نمونه‌های ۷ روزه باعث افزایش مقاومت ۶۳۹ درصدی و در نمونه‌های ۲۸ روزه باعث افزایش مقاومت ۲۵۴۱ درصدی شده است.



شکل ۲-۱۴ نمودار نتایج مقاومت تک محوری نمونه‌های مخلوط شده با لیگنوسولفات و فیبر پلی پروپیلین [۲۴]

این تحقیق از آنجا حائز اهمیت است که ترکیب لیگنوسولفات و فیبر پلی پروپیلین علاوه بر کاهش

پتانسیل واگرایی خاک، مقاومت تک محوری نمونه‌ها را نیز افزایش داده است.

۲-۸-۲- استفاده از لیگنوسولفات و الکترواسموز

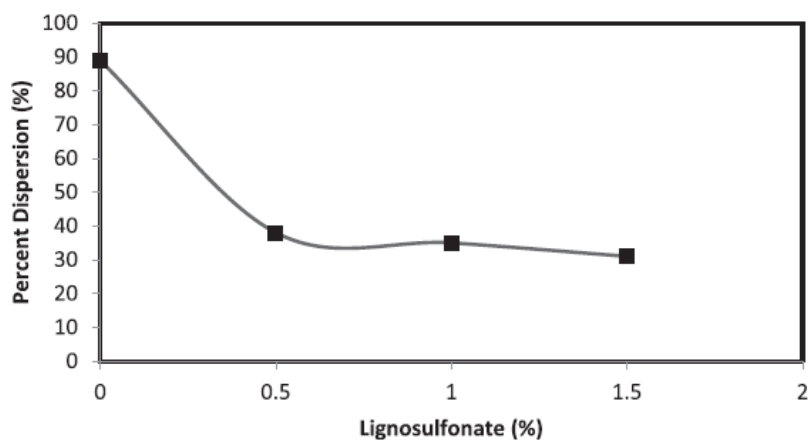
پیوندهای شکل گرفته هیدرولیکی، شیمیایی و الکتریکی در خاک، باعث به وجود آمدن انواع مختلف پدیده‌های الکتروسینتیک در خاک می‌شود. به حرکت سیالات در برابر ذرات خاک ساکن تحت اثر پتانسیل الکتریکی، الکترواسمزی گفته می‌شود. در سال‌های اخیر الکترواسمزی به عنوان یک روش برای تثبیت و بهبود مقاومت و کنترل تغییر شکل‌ها در خاک استفاده شده است. برای اولین بار کاساگرانده در کشور آلمان در سال ۱۹۴۷ از این روش برای افزایش ظرفیت باربری خاک‌ها و کنترل پتانسیل واگرایی خاک‌ها استفاده کرده است.



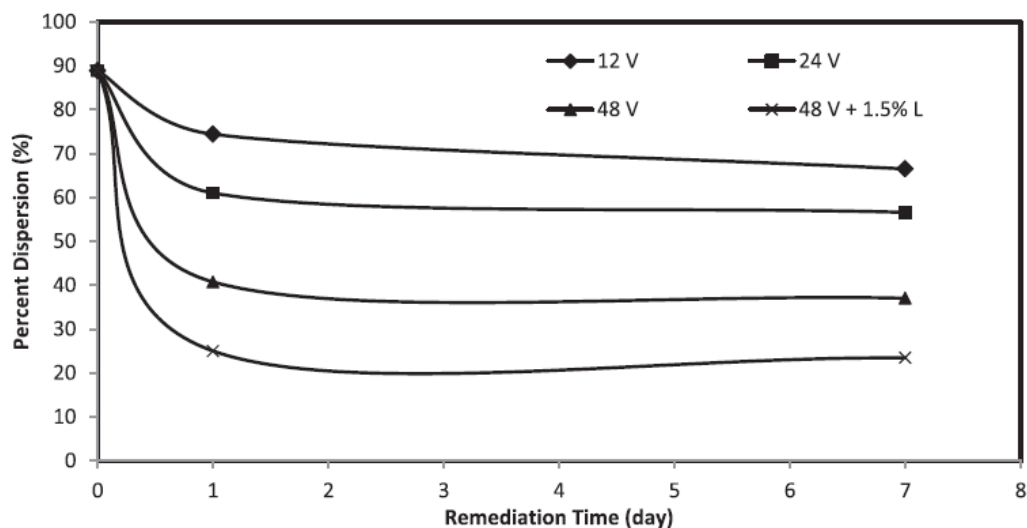
شکل ۲-۱۵ نمایی از نحوه استفاده از الکترواسموز [۲۵]

امیرحسین وکیلی و همکاران (۲۰۱۸) از کاربرد فرآیند الکترواسمزی برای تثبیت خاک‌های واگرا استفاده کرده‌اند [۲۵]. پتانسیل واگرایی خاک با در نظر گرفتن متغیرهای ولتاژ برای زمان‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. که در این تحقیق ابتدا خاک واگرا با ۰/۵۰ ، ۱/۰ و ۱/۵۰ درصد لیگنوسولفات اختلاط و آزمایشات واگرایی انجام شد و از آنجا معلوم شد که اختلاط خاک واگرا با

۱/۵۰ درصد لیگنوسولفات اثرات مثبتی در کاهش واگرایی خاک دارد.



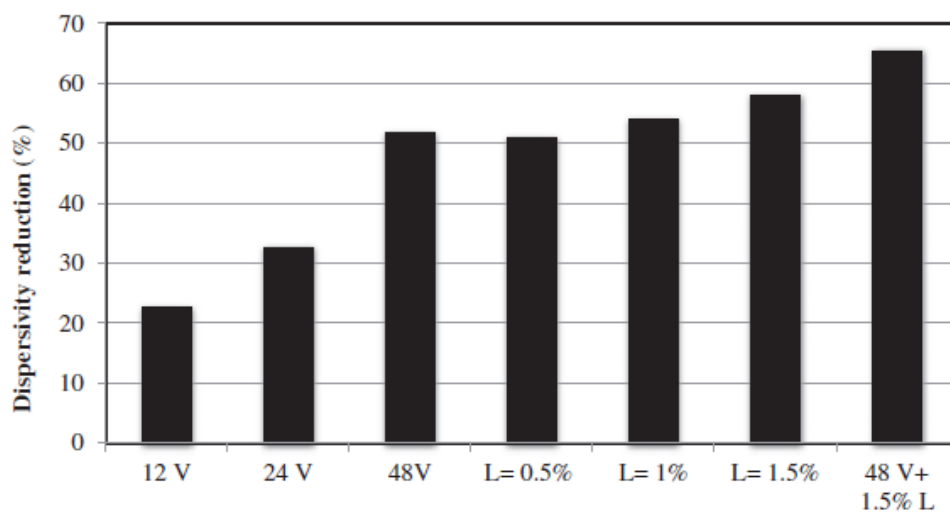
شکل ۲-۱۶ نمودار نتایج پتانسیل واگرایی اختلاط خاک با لیگنوسولفات [۲۵]



شکل ۲-۱۷ نمودار کاهش پتانسیل واگرایی خاک نسبت به زمان با ولتاژهای مختلف [۲۵]

با توجه به اینکه بهترین نتیجه کاهش واگرایی مربوط به اختلاط خاک با ۱/۵۰ درصد لیگنوسولفات بوده این نمونه تحت ولتاژهای متفاوت آزمایش و نتیجه تحقیقات نشان داد که بهترین تأثیر از اختلاط خاک واگرا با ۱/۵۰ درصد لیگنوسولفات در ولتاژ ۴۸ را دارد بطوریکه باعث کاهش ۶۵ درصدی پتانسیل واگرایی خاک شده است. نتایج مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که اصلاح خاک به روش الکترواسموز سبب کاهش پتانسیل واگرایی خاک در اطراف قطب کاتد شده و با بررسی نتایج شیمیایی ما شاهد کاهش PH در اطراف آند هستیم. لازم بذکر است که بهبود مشخصات فیزیکی و

شیمیایی و افزایش مقاومت تک محوری از دیگر نتایج استفاده از الکترواسموز در این پژوهش می باشد.

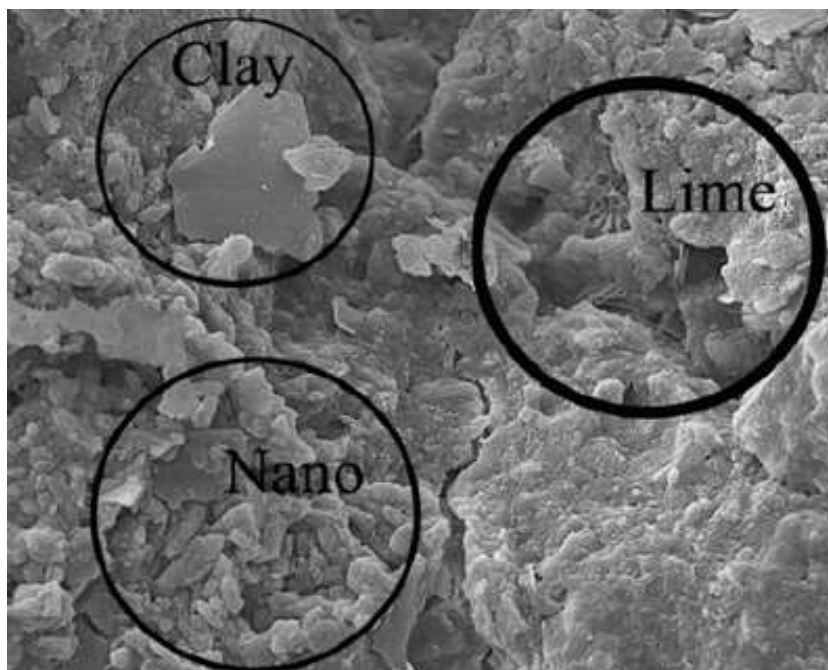


شکل ۲-۱۸ نمودار نتایج کاهش پتانسیل واگرایی در فرآیند استفاده از الکترواسموزی [۲۵]

۲-۸-۳- استفاده از نانو اکسید آلومینیوم و آهک

با توجه به پیشرفت تکنولوژی نانو و استفاده از آن در بهسازی خاک‌ها، احمدی و اکرامی (۱۳۹۸) از نانواکسید آلومینیوم جهت بهسازی خاک‌های واگرا استفاده کرده‌اند. برای این منظور ترکیبات مختلفی از ماده نانو به مقدار وزنی ۰/۰ ، ۰/۲۰ ، ۰/۴۰ ، ۰/۶۰ ، ۰/۸۰ و ۱ درصد به رس واگرا و رس واگرای مخلوط شده با ۲ ، ۴ و ۶ درصد آهک افزوده شده و تأثیر آن در واگرایی خاک‌ها از طریق آزمایش هیدرومتری دوگانه بررسی شده است [۲۶].

بررسی نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نانواکسید آلومینیوم، درصد واگرایی به شدت کاهش می‌یابد. بطوریکه برای رس واگرای مورد آزمایش، ماده نانو اکسید آلومینیوم به تنهایی تا ۶۴ درصد پتانسیل واگرایی را کاهش داده است و در نمونه‌های دارای ۲ درصد آهک، با افزودن تنها ۰/۲۰ درصد ماده نانو، خاک مورد نظر در رده خاک‌های غیرواگرا قرار گرفته است. تصاویر SEM تهیه شده از نمونه‌ها نشان می‌دهد که نانو اکسید آلومینیوم با تجمع و کلوخه‌ای شدن خاک، بطور قابل توجهی سطح ویژه را کاهش داده و از جذب آب توسط خاک کاسته است.

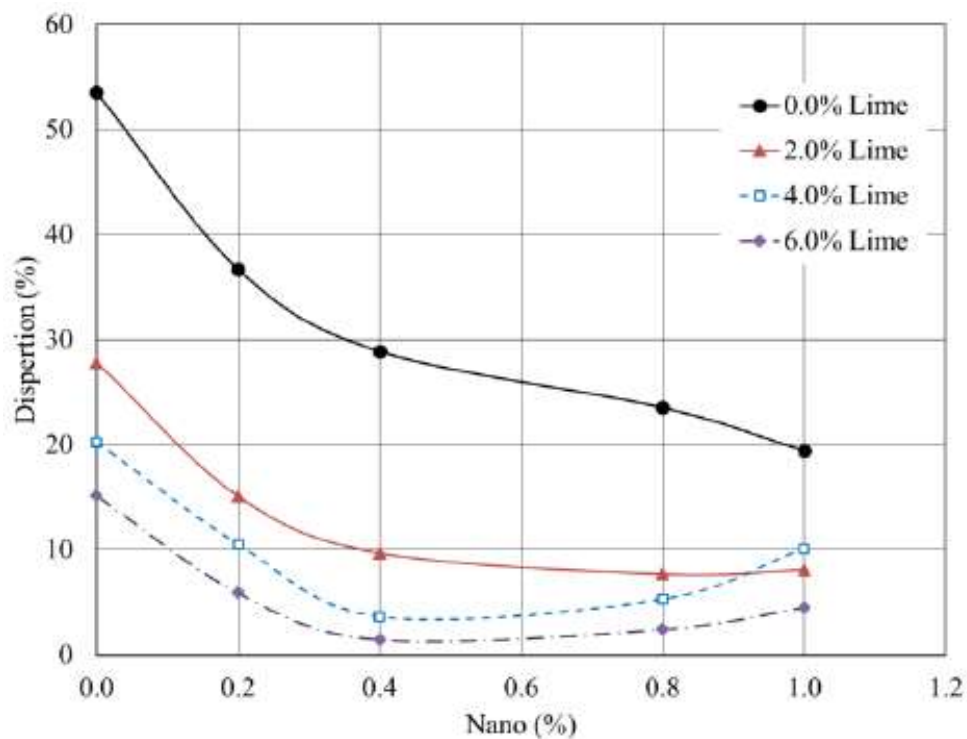


شکل ۱۹-۲ عکس SEM از اختلاط خاک رس واگرا با ۶ درصد آهک و ۱ درصد نانو اکسید آلومینیوم [۲۶]

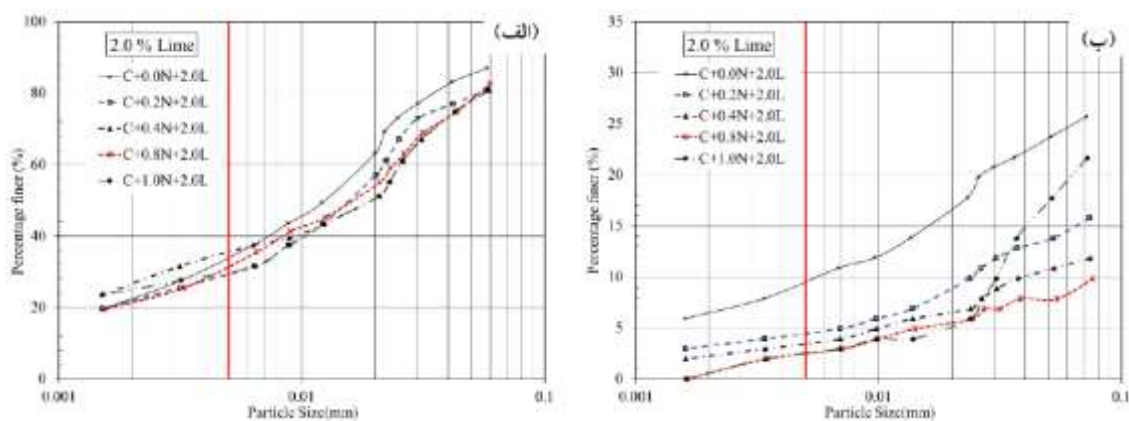
بر اساس تصاویر SEM دو تغییر جدی در نمونه رس واگرا پس از افزودن آهک و مواد نانو قابل مشاهده است.

افزودن آهک سبب واکنش شیمیایی بین دانه‌های شده و بافت‌های پیوسته‌ای بین ذرات بوجود می‌آورد. این واکنش ضمن ایجاد پیوستگی مناسب بین ذرات، باعث کاهش خواص خمیری نمونه، افزایش مقاومت خاک، سبب جایگزینی یون‌های کلسیم حاصل از هیدراتاسیون آهک و یونیزه شدن آن با سدیم موجود در خاک واگرا شده است.

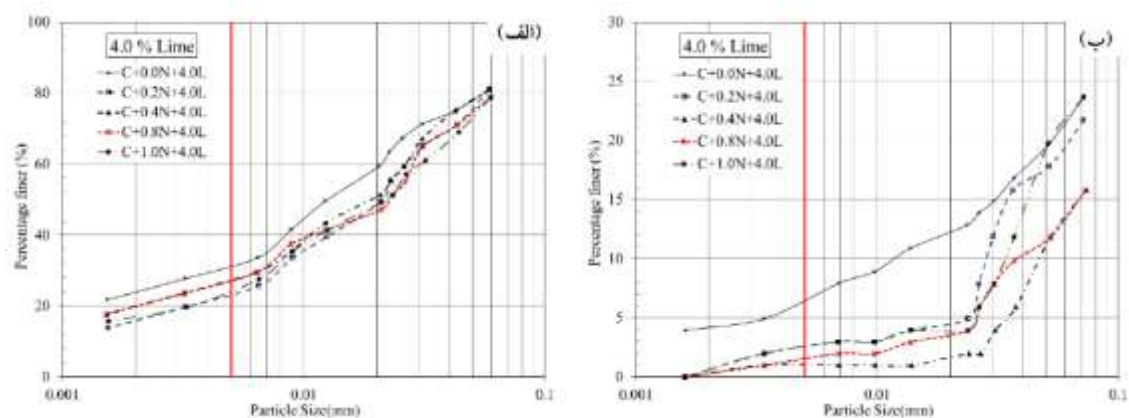
نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نانواکسید آلومینیوم، درصد واگرایی به شدت کاهش یافته است. بطوریکه در نمونه‌های آزمایش شده با ۰/۲۰ ، ۰/۴۰ ، ۰/۶۰ ، ۰/۸۰ و ۱/۰ درصد نانواکسید آلومینیوم، مقدار درصد واگرایی به ترتیب حدود ۳۱ ، ۴۶ ، ۵۶ و ۶۴ درصد کمتر شده است. تأثیر ماده نانو به ویژه در نمونه‌های حاوی آهک محسوس‌تر می‌باشد. نرخ تغییرات کاهش بوجود آمده در پتانسیل واگرایی، بویژه در نمونه‌های مخلوط با آهک، برای درصدهای پایین نانو بیشتر مشاهده شده است.



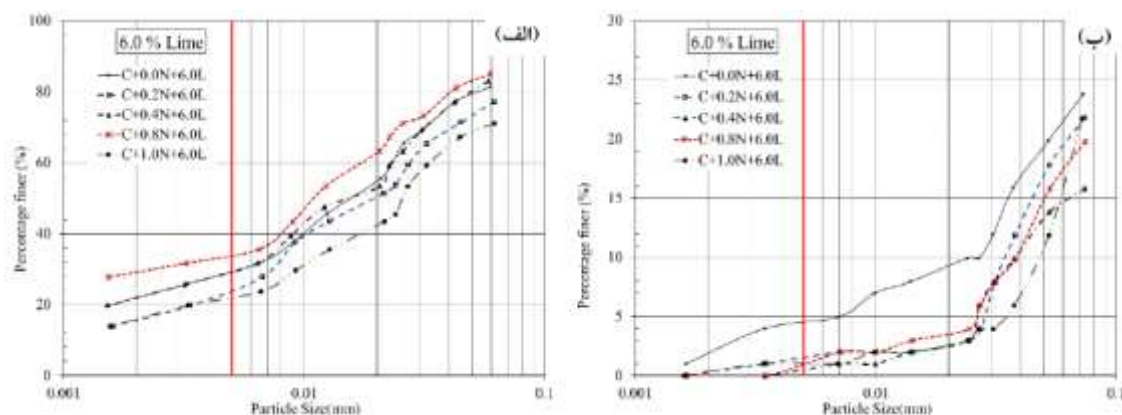
شکل ۲۰-۲ نمودار تغییرات درصد واگرایی بر حسب تغییرات مقدار نانو اکسید آلومینیوم [۲۶]



شکل ۲۱-۲ نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه بر روی نمونه‌های دارای ۲ درصد آهک و مقادیر مختلف نانو اکسید آلومینیوم [۲۶]



شکل ۲۲-۲ نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه بر روی نمونه‌های دارای ۴ درصد آهک و مقادیر مختلف نانو اکسید آلومینیوم [۲۶]



شکل ۲۳-۲ نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه بر روی نمونه‌های دارای ۶ درصد آهک و مقادیر مختلف نانو اکسید آلومینیوم [۲۶]

لازم به ذکر است که در اشکال ۲۱-۲، ۲۲-۲ و ۲۳-۲ در نمودارهای الف از ماده پراکنده‌ساز استفاده شده و در نمودارهای ب از ماده پراکنده‌ساز استفاده نشده است. با توجه به نتایج آزمایش‌های هیدرومتری دوگانه پتانسیل واگرایی نمونه‌ها با افزایش آهک، کاهش پیدا کرده است.

۲-۸-۴- استفاده از آهک

وجود خاک‌های ریزدانه می‌تواند از عوامل مؤثر در موضوع تورم خاک باشد. بطوریکه وجود پتانسیل تورم در خاک می‌تواند سبب تقویت روند خودترمیمی رس‌ها شود. اما یکی از مسائل عمده در روند خودترمیمی وجود خاک‌های واگرا می‌باشد. بدین منظور روشنگر، اعلمی و هوشیار (۱۳۹۹) در ساختگاه سد مخزنی گردیان واقع در ۵ کیلومتری شمال‌های شهر، به بررسی آزمایشگاهی پدیده واگرایی و خودترمیمی، در هسته سد گردیان پرداخته‌اند. آنها بیان نمودند هنگامی که خاک‌های رس کارایی مورد نظر را نداشته باشند می‌توان با افزودنی‌هایی مثل آهک نقش آنها را برجسته کرد. اضافه کردن آهک به خاک رس باعث تغییرات بر ضخامت لایه آبدار اطراف ذرات خاک رس و تغییرات حدود آتربرگ می‌شود. تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد که اختلاط آهک با خاک‌هایی با پلاستیسیته بالا $PI > 15$ شاهد نتایج مطلوب‌تری هستیم. کارایی آهک در ایجاد تغییرات در مشخصات خاک توسط محققین زیادی گزارش شده است. در این تحقیق با بررسی آزمایشگاهی قابلیت آهک در ایجاد

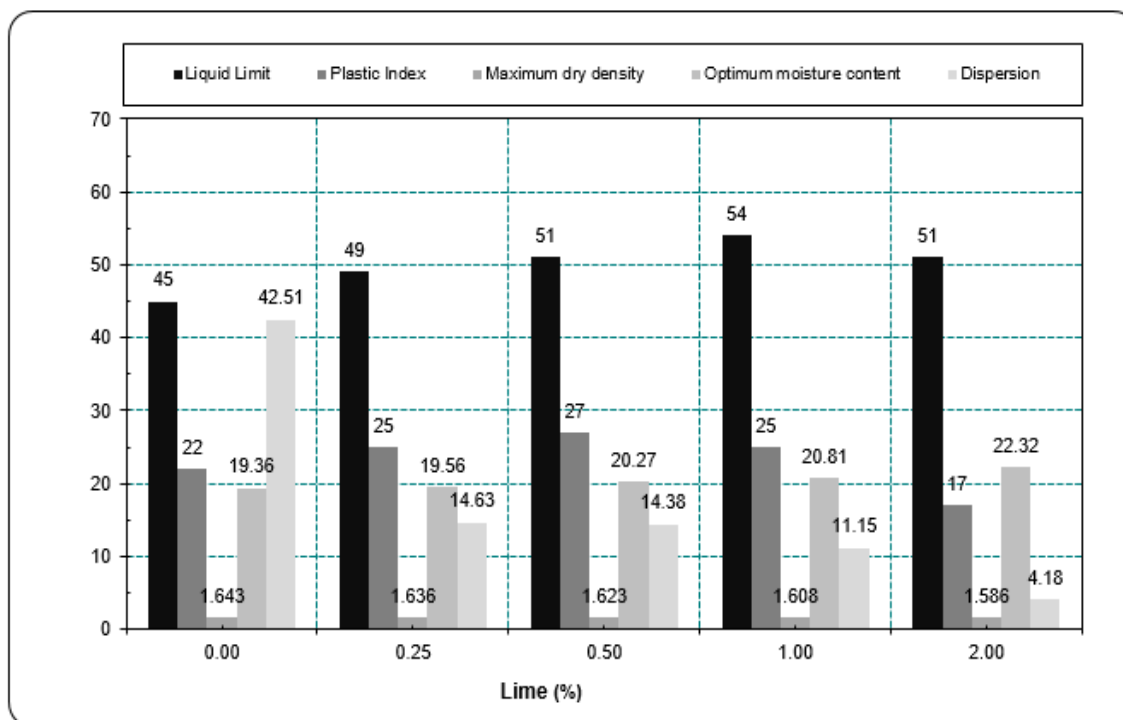
تغییرات حدود آتربگ، وزن مخصوص، رطوبت بهینه و واگرایی خاک به کمک آزمایش هیدرومتری مضاعف مورد بررسی قرار گرفته است [۲۷].

جدول ۲-۲ نتایج آزمایش حدود آتربگ، تراکم و هیدرومتری مضاعف بر روی خاک S2 [۲۷]

تراکم		هیدرومتری		حدود آتربگ			نمونه
وزن مخصوص خشک	رطوبت بهینه	واگرایی	$F_2/F_1 \times 100$	PI	PL	LL	
۱/۶۴۳	۱۹/۳۶	واگرا	۴۲/۵۱	۲۲	۲۳	۴۵	S2
۱/۶۳۶	۱۹/۵۶	غیر واگرا	۱۴/۶۳	۲۵	۲۴	۴۹	S2 با ۲۵/۰ درصد آهک
۱/۶۲۳	۲۰/۲۷	غیر واگرا	۱۴/۳۸	۲۷	۲۴	۵۱	S2 با ۵/۰ درصد آهک
۱/۶۰۸	۲۰/۸۱	غیر واگرا	۱۱/۱۵	۲۵	۲۹	۵۴	S2 با ۱ درصد آهک
۱/۵۸۶	۲۲/۳۲	غیر واگرا	۴/۱۸	۱۷	۳۴	۵۱	S2 با ۲ درصد آهک

جدول ۳-۲ نتایج آزمایش حدود آتربگ، تراکم و هیدرومتری مضاعف بر روی خاک S3 [۲۷]

تراکم		هیدرومتری		حدود آتربگ			نمونه
وزن مخصوص خشک	رطوبت بهینه	واگرایی	$F_2/F_1 \times 100$	PI	PL	LL	
۱/۶۴۳	۱۹/۳۶	واگرا	۳۵/۸۰	۲۱	۲۱	۴۲	S3
۱/۶۳۶	۱۹/۵۶	غیر واگرا	۱۵/۴۴	۲۲	۲۳	۴۵	S3 با ۲۵/۰ درصد آهک
۱/۶۲۳	۲۰/۲۷	غیر واگرا	۱۱/۹۹	۲۴	۲۴	۴۸	S3 با ۵/۰ درصد آهک
۱/۶۰۸	۲۰/۸۱	غیر واگرا	۸/۲۴	۲۳	۲۸	۵۱	S3 با ۱ درصد آهک
۱/۵۸۶	۲۲/۳۲	غیر واگرا	۸/۴۰	۱۵	۳۴	۴۹	S3 با ۲ درصد آهک



شکل ۲-۲۴ نمودار تغییرات درصد واگرایی و مشخصات خاک بر حسب تغییرات مقدار آهک در نمونه خاک S2 [۲۷]

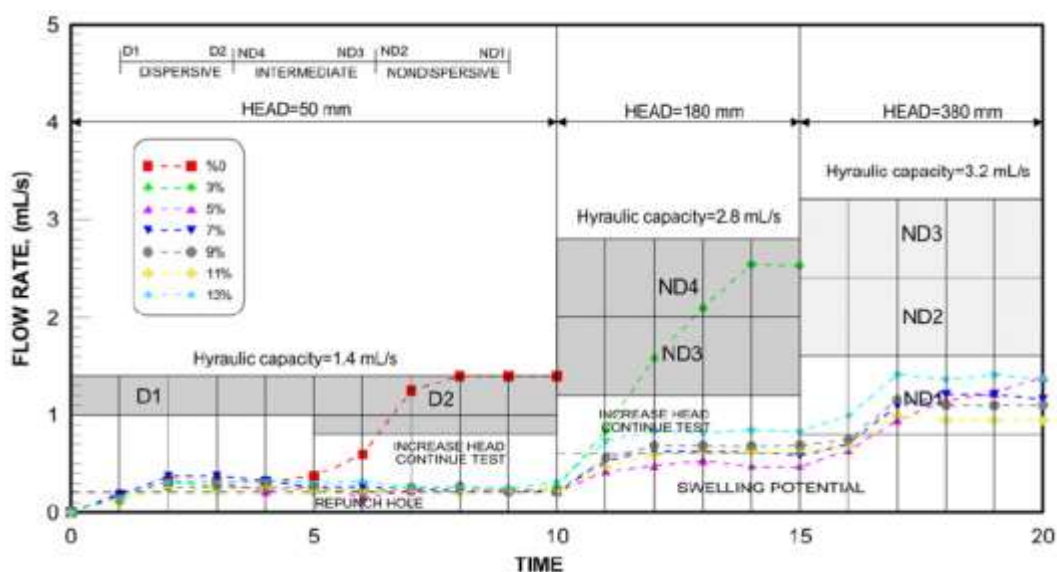
با توجه به آزمایش‌های انجام شده و نتایج آن، افزایش آهک باعث از بین رفتن پتانسیل واگرایی خاک شده است. در اختلاط خاک با آهک تا حدود ۱ درصد، شاخص‌های حدود آتربرگ افزایش پیدا کرده اما رطوبت بهینه خاک با افزودن آهک افزایش و وزن مخصوص نمونه‌ها کاهش پیدا کرده است.

۲-۸-۵- استفاده از کلرید منیزیم

تحقیقات نشان می‌دهد که کلرید منیزیم^۱ در جاده‌ها و معابر به عنوان ضدیخ کاربرد گسترده‌ای دارد. و در جاده‌های خاکی برای جلوگیری از گرد و غبار مورد استفاده قرار می‌گیرد. تورکوز و همکاران (۲۰۱۴) از کلرید منیزیم به عنوان ماده افزودنی جهت کاهش پتانسیل واگرایی خاک استفاده کرده‌اند. که نتیجه آزمایش‌ها نشان می‌دهد نقش مؤثری در بهبود خاک‌های سست و کاهش پتانسیل واگرایی خاک‌ها داشته است. بطوریکه با افزایش کلرید منیزیم به بیش از ۳ درصد، خاک غیرواگرا شده است

¹ MgCl₂

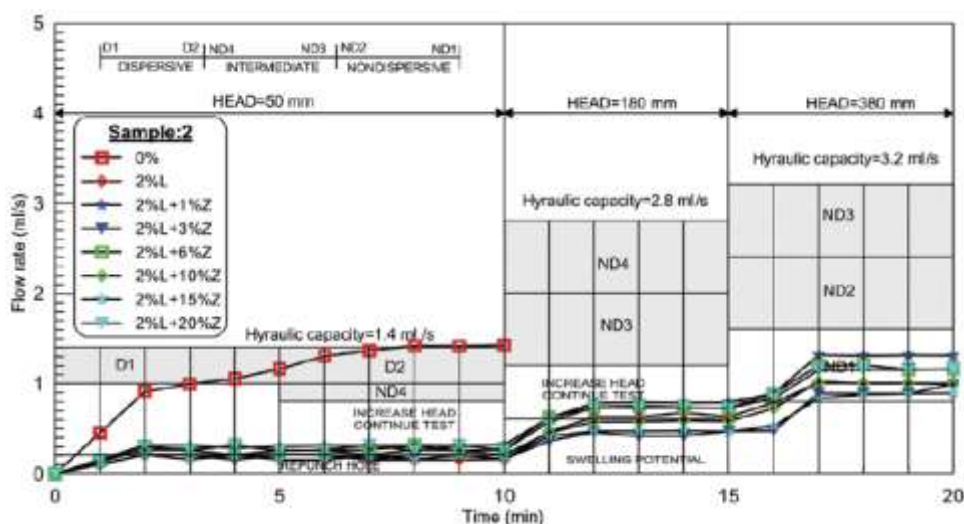
[۲۸]



شکل ۲-۲۵ نتایج آزمایش پین هول با درصدهای مختلف کلریدمنیزیم [۲۸]

۲-۸-۶- استفاده از آهک و ژئولیت

ساواس (۲۰۱۶) برای کاهش پتانسیل واگرایی از آهک و ژئولیت استفاده کرده است که برای این منظور از مقدار ثابت آهک به میزان ۲٪ وزن خشک خاک و ژئولیت طبیعی با درصدهای ۰، ۱، ۳، ۶، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد استفاده کردند. نتایج نشان داده است که استفاده از ۲٪ آهک و ۳٪ ژئولیت طبیعی مؤثرترین حالت استفاده از این مواد جهت کاهش تورم و پتانسیل واگرایی خاکها بوده است [۲۹].



شکل ۲-۲۶ نتایج آزمایش پین هول با ۲ درصد آهک و مقادیر مختلف زئولیت [۲۹]

۲-۸-۷- استفاده از سولفات آلومینیوم

اوحدی و همکاران (۲۰۰۶) بر اساس نتایج تحقیقات به عمل آمده، نشان دادند که با اضافه کردن ۰/۵۰ تا ۲ درصد سولفات آلومینیوم به خاک، می‌توان واگرایی خاک را کاهش داده و یا واگرایی را از بین برد. افزودن سولفات آلومینیوم به خاک علاوه بر افزایش مقاومت در برابر فرسایش و آبستگي، پتانسیل تورم پذیری خاک، کاهش یافته و مقاومت برشی خاک‌ها افزایش پیدا می‌کند [۳۰]. قابلیت حل شدن سولفات آلومینیوم در آب به نسبت آهک بیشتر می‌باشد به همین دلیل اختلاط سولفات آلومینیوم با خاک بسیار کم هزینه‌تر از اختلاط خاک با آهک می‌باشد. اما مشکل اساسی سولفات آلومینیوم، هزینه بالای تهیه آن و ایجاد خاصیت اسیدیته بیشتر در محیط به نسبت آهک می‌باشد که می‌تواند برای رشد گیاهان مضر بوده و باعث بروز مشکلات زیست محیطی نماید.

۲-۸-۸- استفاده از سیمان

بیشتر تحقیقات انجام شده در سال‌های اخیر بر روی خاک‌های واگرا، پایه‌ای سیمانی دارد که با اضافه کردن سیمان به خاک و جایگزینی یون‌های کلسیم موجود در سیمان، واگرایی خاک‌ها کاهش و تثبیت پیدا کرده است. وجود سیمان در آب خاصیت فرسایش پذیری خاک را به شدت کاهش داده

بطوری که قادر به تحمل سرعت جریان آب تا ۲ متر بر ثانیه بوده و مقاومت تک‌محوری خاک‌ها با افزودن سیمان، افزایش می‌یابد. وان و همکاران (۲۰۰۴) نشان دادند که وجود سیمان در خاک باعث افزایش حدروانی و حدخمیری خاک‌ها شده اما دامنه‌خمیری کاهش پیدا می‌کند. مخلوط‌های بدست آمده از اختلاط خاک و سیمان قادر به تحمل جریان آب، با سرعت‌هایی تا ۲ متر در ثانیه می‌باشند [۳۱].

مشخصات فنی خاک‌های تثبیت شده با سیمان متفاوت می‌باشد که میزان این مقادیر بستگی به نوع و مقدار سیمان، جنس خاک، دانسیته خاک تثبیت شده و زمان عمل آوری اختلاط خاک و سیمان دارد. لازم بذکر است که اختلاط خاک با سیمان، باعث ترد و شکننده شدن نمونه‌ها می‌شود.

۲-۸-۹- استفاده از فیلتر

بر اساس تحقیقات انجام شده بل و همکاران (۲۰۰۰)، استفاده از فیلتر با قطرهای مناسب در اطراف خاک‌های واگرا می‌تواند منجر به کاهش فرسایش و آبشستگی در خاک‌ها شود. کار اصلی فیلترها در صورت طراحی درست، جلوگیری از جابجایی و خروج ذرات رس واگرا از محیط می‌باشد که تدریجاً باعث تثبیت خاک‌های واگرا می‌شود. برای آنکه استفاده از فیلتر بتواند به خوبی در برابر پدیده واگرایی مقاومت نماید باید مصالح استفاده شده در فیلتر غیر چسبنده بوده، در غیر این صورت فیلتر قادر به محافظت از خاک‌های واگرا نمی‌باشد [۳۲]. مشکل عمده در روش استفاده از فیلتر، مربوط به تهیه فیلتر مناسب، اجرای صحیح آن و هزینه بالای اجرای آن می‌باشد.

۲-۹- پیشینه تحقیق

با خراب شدن تعدادی از سدهای خاکی در اثر فرسایش و آبشستگی، لزوم توجه به علت خرابی سدها که وجود استفاده از خاک‌های واگرا در ساخت آنها بوده، بیشتر از پیش احساس می‌شد بطوریکه برای اولین بار حدود ۵۰ سال پیش مورد توجه کشاورزان قرار گرفت [۳۳].

مسئله بررسی خاک‌های واگرا از مدت‌ها قبل برای دانشمندان و کشاورزانی که دیدگاه کشاورزی داشتند مطرح بوده است [۳۴].

زمین‌های زراعی کشاورزانی که قشر بالایی آنها از جنس خاک‌های واگرا بوده در اثر بارش باران، قشر رویه شسته و فرسایش یافته است که این اتفاق باعث بوجود آمدن حفره‌های بزرگ در زمین‌های کشاورزان شده، و خسارت‌های زیادی به بخش‌های زراعی کشاورزان وارد کرده است.

نفوذ آب باران از محل بقایای پوسیده ریشه گیاهان، چاله‌های ایجاد شده توسط حیوانات و همچنین نفوذ آب از راه ترک‌های موجود در زمین، منجر به ایجاد گودال‌ها و تونل‌های بزرگ در سطح زمین شده که این خود ناشی از پتانسیل واگرایی خاک‌ها می‌باشد.

برای اولین بار میدلتون در سال ۱۹۲۰، فرسایش خاک را به علت پدیده واگرایی در خاک‌های ریزدانه معرفی نمود بطوری که بالا بودن املاح سدیم باعث بروز پدیده واگرایی در خاک‌ها می‌شود که این پدیده خسارات فراوانی را به دنبال داشته است.

ولک در سال‌های ۱۹۳۵ تا ۱۹۳۸، علت اصلی خرابی سدهای کوچک و بندهای طراحی شده در سازمان حفاظت خاک آمریکا را به علت استفاده از خاک‌های واگرا در ساخت این سازه‌ها معرفی نمود بطوریکه این سدها پس از اولین آبگیری تخریب شده‌اند [۳۵].

پژوهش‌هایی که عمدتاً در استرالیا در سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰ بر روی علل تخریب سدهای خاکی انجام شده بود باعث شناخت بهتر رس‌های واگرا گردید که به آسانی و سهولت شسته می‌شدند [۳۶].

تجربه‌های مهندسان و محققان استرالیایی به طور عمده مربوط به تخریب سدهای خاکی بود که نتیجه تحقیقات بصورت کلی بوده و بسیار مورد توجه دانشمندان دیگر قرار گرفت. وود و ایکسان در سال ۱۹۶۵، علت اصلی تخریب سدهای خاکی را پدیده رگاب معرفی نمودند. این دانشمندان با انجام آزمایش‌های مختلف معتقد بودند که خاک‌های واگرا، دارای مقادیر نسبت جذب سدیم و میزان املاح آب زیادی بوده که همین امر باعث جریان آب در درز و شکاف سدها و خرابی آنها شده است [۳۷].

اینگل و ایکسان در سال ۱۹۶۹ نتایج مطالعات و تحقیقات خود در زمینه شیمیایی آب و خاک و همچنین تأثیر آن در پدیده واگرایی را عرضه نمودند و به تأثیر درزها و ترک‌ها در آبشستگی‌های داخلی نمونه پرداختند. و با توجه به این نتایج، حدود سدیم تبادلی میزان واگرایی خاک‌های ریزدانه رسی را مشخص نمودند [۳۵].

آرولاناندن در سال ۱۹۷۵، با طراحی دستگاهی جهت بررسی پدیده واگرایی و آبشستگی‌های سطحی ناشی از خاک‌های رس کمک شایانی به بررسی پدیده واگرایی خاک نمود. آرولاناندن با کمک دستگاهی که ساخته بود و نام آن را استوانه چرخان نامید، توانست مقدار تنش‌های برشی لازم برای جدا شدن ذرات خاک از سطح نمونه را بر اثر جریان آب اندازه‌گیری نماید. آرولاناندن نشان داد که می‌توان با کاهش میزان املاح در آب منفذی موجود در خلل و فرج خاک و یا با افزایش نسبت جذب سدیم، آبشستگی خاک را کاهش داد. نتایج تحقیقات و آزمایش‌های انجام شده توسط آرولاناندن باعث شد که تحقیقات قبلی دانشمندان مورد تأیید قرار گیرد و به کمک دستگاه استوانه چرخان، بررسی مقدار آبشستگی‌های سطحی بهتر از گذشته انجام گردد [۳۷].

شرارد در سال ۱۹۷۶، دستگاه پین هول را اختراع کرد که به کمک این دستگاه مستقیماً فرسایش‌پذیری خاک‌ها انجام می‌شد. اسم آزمایش مذکور، پین هول یا دستگاه سوراخ زنی نام گرفت که بعد از اختراع این دستگاه تا به حال، بررسی اکثر خاک‌های واگرا به کمک این دستگاه انجام می‌شود. در حال حاضر، آزمایش پین هول جزء معتبرترین و در عین حال متداول‌ترین آزمایش‌های مورد استفاده در طراحی و ساخت سازه‌های خاکی که مقادیر واگرایی را بررسی می‌کند به شمار می‌رود [۳۶].

پس از ابداع و اختراع دستگاه پین هول، اکثر پژوهشگران و دانشمندان به بررسی نتایج حاصل از انجام این آزمون پرداختند که به کمک آن بتوانند راحت‌تر خاک‌های واگرا را مورد ارزیابی و شناسایی قرار داده و با اختلاط نمونه‌ها با افزودنی‌های مختلف مانع از شسته شدن خاک‌های واگرا شوند.

دانشمندان مختلف، مطالعات زیادی در مورد تأثیر مواد افزودنی بر روی خاک‌های واگرا و تأثیر آنها بر روی پارامترهای ژئوتکنیکی انجام داده‌اند. که مطالعات انجام شده نشان از تأثیر مواد افزودنی بر روی خاک‌های واگرا داشته است. ولی مسلماً میزان تأثیر و درصد افزودنی با توجه به خاک هر منطقه متفاوت می‌باشد.

انتخاب ماده افزودنی برای کنترل واگرایی خاک در هر پروژه تابع عوامل زیادی مثل میزان هزینه، تهیه و دسترسی آسان به مواد افزودنی و میزان تأثیر مواد افزودنی بر محیط زیست می‌باشد. دنیس و همکاران (۲۰۰۹)، برای بررسی واگرایی خاک‌ها در هند، از مخلوط سیمان و آهک استفاده کردند و به تأثیر این مواد بر روی پارامترهای ژئوتکنیکی خاک از جمله مقاومت فشاری محدود نشده و حدود آتربرگ پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داده است که استفاده از ۳ تا ۵ درصد مخلوط آهک و سیمان، واگرایی خاک را از بین برده است [۳۸].

رحیمی و فکوری (۱۳۷۲)، مشخصات فنی خاک‌های تثبیت شده با سیمان و قیر امولسیون را برای اولین بار مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از ۵ تا ۱۰ درصد وزنی سیمان باعث تثبیت خاک‌های واگرا می‌شود. بطوریکه تثبیت خاک با سیمان به مراتب بهتر از نمونه‌های ساخته شده با قیر امولسیون بوده و فرسایش پذیری نمونه‌های تثبیت شده با سیمان در برابر جریان آب به مراتب کمتر از نمونه‌های اختلاط شده با قیر امولسیون می‌باشد [۳۹].

امیری و ابراهیمی (۱۳۸۹)، به بررسی تأثیر فناوری نانو با نگرش کاربرد نانورس‌ها در پروژه‌های ژئوتکنیک زیست محیطی پرداختند. در این تحقیق از نانورس کلوزیت و رس کائولینیت استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که نانورس‌ها با توجه به سطح مخصوص بزرگتری که دارند قابلیت جذب و نگهداری آلاینده‌های بیشتری نسبت به رس کائولینیت دارند [۴۰].

بهنیا و شواخی (۱۳۸۹)، مطالعات کاملی در خصوص نانورس‌ها در مهندسی عمران انجام دادند. بطوریکه نتایج تحقیق حاکی از اصلاح خواص خاک‌ها با افزودن نانورس می‌باشد [۴۱].

قاسمی و حسنلوراد (۱۳۹۲) به بررسی واگرایی خاک‌های رس با استفاده از گازوئیل پرداخته‌اند. خاک رس با درصدهای مختلف گازوئیل مخلوط شده و میزان واگرایی نمونه‌ها با انجام آزمایش پین‌هول مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که افزایش گازوئیل تا حدودی باعث بهبود پتانسیل واگرایی نمونه‌ها شده بطوریکه خاک‌های شدیداً واگرا به خاک‌هایی با واگرایی متوسط تبدیل شده است [۴۲].

اوحدی و همکاران (۱۳۹۳)، مطالعاتی در مورد بهسازی خاک‌های واگرا منطقه بوئین‌زهره استان قزوین با نگرش تغییر ساختار در مورد حل شدن قله‌های کانی‌های رسی، با تشکیل ترکیبات نو پرداخته‌اند [۶].

لازم بذکر است، علی رقم تحقیقات زیادی که در زمینه بهسازی خاک‌های واگرا انجام شده، تا به حال تأثیر سولفات پتاسیم بر روی خاک‌های واگرا مورد بررسی قرار نگرفته، و امیدوارم که نتیجه این تحقیق به علت ارزان و در دسترس بودن، اختلاط راحت با خاک، نداشتن مشکلات زیست محیطی و ... مورد استفاده قرار گیرد.

فصل سوم

مواد و روش انجام تحقیق

۳-۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسائل ژئوتکنیکی بویژه در سدهای خاکی، آب‌بندان‌ها، دایک‌های خاکی و کانال‌های لاینینگ، شناخت خاک‌های واگرا و عدم استفاده از آنها در پروژه‌ها می‌باشد. با توجه به قابلیت فرسایش، شسته شدن و ماهیت خاک‌های واگرا، تعیین مقدار واگرایی خاک در پروژه‌های عمرانی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است.

در پژوهش حاضر، بهسازی خاک‌های واگرا با استفاده از سولفات پتاسیم در دستور کار قرار گرفته است. و به منظور شناسایی مصالح و مواد بکار رفته در این تحقیق و تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها، آزمایش‌های شناسایی متعددی برای کنترل واگرایی بر روی نمونه‌ها انجام شده است.

در این فصل بیشتر به جزئیاتی نظیر مواد، روش‌ها و انجام آزمایش‌های گوناگون علاوه بر آزمایش‌های شناسایی شامل درصد رطوبت، دانه‌بندی و هیدرومتری، تعیین حدود آتربرج، چگالی دانه‌های جامد خاک و وزن مخصوص نمونه‌ها پرداخته و نتایج خاک محل ارائه شده است. جزئیات آزمایش‌ها، شامل تهیه مواد و مصالح، آماده کردن نمونه‌ها و همچنین روش‌های انجام آزمون و استانداردهای بکار رفته بصورت مجزا بیان می‌شود.

۳-۲- معرفی منطقه مطالعاتی

در این پژوهش نمونه‌برداری از محل قرضه سد کوچک مخزنی روستای تمرقره‌قوزی به مختصات جغرافیایی 40S 0366392 4151168 واقع در شهرستان کلالة استان گلستان انجام شده است. فاصله محل نمونه‌برداری تا گرگان حدوداً ۱۵۰ کیلومتر می‌باشد. روستای تمرقره‌قوزی مرکز دهستان تمران از بخش مرکزی شهرستان کلالة می‌باشد که ابتدا از سه روستای جداگانه تحت نام‌های تمرخوجه‌محمد، قره‌قوزی‌علیا و قره‌قوزی‌سفلی تشکیل گردیده بود که بنا به درخواست اهالی روستا، طی مصوبه هیات محترم وزیران به یک روستای واحد تحت عنوان تمرقره‌قوزی موافقت گردید.

علت انتخاب این منطقه، استعداد بالای واگرایی خاک و احداث بندهای خاکی زیاد در روستای تمرقوزی و حوزه آبخیز قویجق کلاله می‌باشد. با توجه به محدودیت فراوان دستگاه دولتی شامل شرکت آب منطقه‌ای، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری و ... جهت تهیه خاک مناسب و مباحث فنی در نظر گرفته شده، جای خالی تحقیق در این منطقه در شرایطی که هزینه‌ها را کاهش دهد و مشکلات زیست محیطی را حل کند احساس می‌شود.



شکل ۳-۱ کروکی راه دسترسی به روستای تمرقه‌قوزی شهرستان کلاله



شکل ۳-۲ عکس هوایی از سد کوچک مخزنی تمرقه‌قوزی شهرستان کلاله

۳-۳- مصالح مصرفی

در پژوهش حاضر به منظور بهسازی واگرایی خاک منطقه تمرقره قوزی، از قرضه سد مخزنی نمونه تهیه و با سولفات پتاسیم در درصدهای مختلف اختلاط و تحت آزمایش‌های گوناگون قرار گرفته است. که در این بخش به معرفی مصالح مصرفی و تجهیزات آزمایشگاهی پرداخته شده است.

۳-۳-۱- خاک قرضه

خاک استفاده شده در این تحقیق که در شکل ۳-۳ نشان داده شده است، از نوع خاک ریزدانه رسی می‌باشد که بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد خاک یونیفاید^۱ در گروه خاک رس با خاصیت خمیری بالا (CH) قرار می‌گیرد [۴۳]. در پژوهش حاضر آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های دستخورده و دستنخورده در دو حالت طبیعی و متراکم شده به روش استاندارد T99 انجام شده است.



شکل ۳-۳ خاک مصرفی در پژوهش بصورت نرم و کلوخه

¹ USCS (Unified Soil Classification System)

جدول ۱-۳ مشخصات خاک مصرفی

مشخصات	مقدار	واحد	روش آزمون
نامگذاری خاک	CH	-	ASTM D2427
درصد رطوبت	۱۶/۸۴	%	ASTM D2216
وزن مخصوص خشک	۱/۴۰	gr/cm ³	ASTM D1556
چگالی ویژه خاک	۲/۶۵	-	ASTM D854
حد روانی	۵۰/۹۴	%	ASTM D4318
حد خمیری	۲۷/۹۰	%	ASTM D4318
شاخص خمیری	۲۳/۰۵	%	ASTM D4318
رطوبت بهینه	۲۴/۹۹	%	ASTM D698
وزن مخصوص خشک ماکزیمم	۱/۵۵	gr/cm ³	ASTM D698
نتایج پین هول	D1	-	ASTM D4647
درصد واگرایی	۱۰۰	%	ASTM D4221
مقاومت تک محوری	۰/۸۹۷	kg/cm ²	ASTM D2166

جدول ۲-۳ نتایج آنالیز شیمیایی خاک مورد مطالعه (شرکت بینالود)

Formula	Content (%)	Formula	Content (%)
SiO ₂	49.89	MgO	2.79
Al ₂ O ₃	11.19	TiO ₂	0.546
Fe ₂ O ₃	4.62	MnO	0.079
CaO	12.94	P ₂ O ₅	0.126
Na ₂ O	1.13	LOI	14.35
K ₂ O	2.19	SO ₃	0.01

۳-۲-۳- سولفات پتاسیم

سولفات پتاسیم^۱ حاوی دو عنصر ضروری پتاسیم و گوگرد می‌باشد که در شکل‌های مختلف پودری و گرانوله در صنایع مختلفی مانند کشاورزی به عنوان کود مورد استفاده قرار می‌گیرند. از این ترکیب به دلیل حلالیت بالایی که دارد می‌توان در زمان قبل از کاشت محصولات زراعی و یا همراه با کود اوره به صورت سرک استفاده نمود. از این کود در کشت‌های غلات و سیب زمینی استفاده بیشتری می‌شود.

سولفات پتاسیم با فرمول شیمیایی K_2SO_4 ، عموماً بصورت پودر و یا کریستال‌های سفید موجود می‌باشد. این ماده غالباً شور مزه و تلخ می‌باشد. در دمای ۱۶۸۹ درجه سانتیگراد می‌جوشد و در دمای ۱۰۶۹ درجه سانتیگراد ذوب می‌شود. در آب به راحتی قابل حل است اما در اتانول قابل حل نیست. و PH آن نیز بین ۵/۵۰ تا ۸/۵۰ می‌باشد.

سولفات پتاسیم در صنایع دارویی، شیمیایی، کشاورزی و غذایی کاربرد بسیاری دارد. بطوریکه در صنایع غذایی به عنوان طعم دهنده و معطر کننده و همچنین به عنوان جایگزین نمک طعام مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین سولفات پتاسیم در تولید مواد شیمیایی و افزودنی‌ها نیز نقش به سزایی دارد.

تولید این ماده به شیوه‌های مختلفی انجام می‌شود. واکنش کلرید پتاسیم با سنگ معدن لانگنیت، واکنش کلرید پتاسیم با اسید سولفوریک یا گوگرد دی اکسید، آب و اکسیژن و همچنین بازیافت از زباله‌های شکر از جمله روش‌های مورد استفاده برای تولید این ترکیب شیمیایی هستند. صنعت کشاورزی، بزرگترین مشتری این محصول است به گونه‌ای که در سال ۱۹۸۵ در آمریکا ۶۳٪ از پتاسیم سولفات تولیدی در این کشور، توسط کشاورزان خریداری شده است.

¹ K_2SO_4 (Potassium Sulphate)

کشاورزان بیشتر از سولفات پتاسیم به عنوان کود، جهت بهبود رشد و کیفیت محصولاتشان استفاده می‌نمایند. در ایران نیز ترکیب کود شیمیایی این محصول مصرف بسیار زیادی در بین کشاورزان دارد.



شکل ۳-۴ سولفات پتاسیم مصرفی در این پژوهش

جدول ۳-۳ مشخصات سولفات پتاسیم استفاده شده در این پژوهش

خصوصیات	
K_2SO_4	فرمول مولکولی
174.26 g/mol	جرم مولی
White solid	شکل ظاهری
odorless	بوی
2.65	چگالی
1069 c°	دمای ذوب
1689 c°	دمای جوش
1.495	ضریب شکست

۳-۴- آزمایشات آزمایشگاهی

با توجه به خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی خاک که می‌تواند تأثیر مهمی با اضافه کردن افزودنی‌ها بر روی رفتار واگرایی خاک داشته باشد، لازم است تعیین خواص هر یک از نمونه‌های خاک با افزودن سولفات پتاسیم به آنها با کمک آزمایش‌های دقیق و استانداردهای معتبر از جمله ASTM انجام گردد. در این فصل کلیه خواص خاک با انجام آزمایش‌هایی نظیر درصد رطوبت، دانه‌بندی، چگالی ویژه، پارامترهای مقاومتی و ... به تنهایی و با افزودن سولفات پتاسیم به خاک مورد بررسی قرار می‌گیرد و کنترل واگرایی خاک با انجام آزمایش‌های هیدرومتری مضاعف، پین‌هول و روش شیمیایی خاک مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در مورد روش انجام آزمایش‌ها و ساخت نمونه‌ها توضیحات مختصری داده شده است.

۳-۴-۱- آزمایش تعیین درصد رطوبت، وزن مخصوص خاک و چگالی ویژه خاک Gs

در این مطالعه برای تعیین درصد رطوبت طبیعی خاک و وزن مخصوص دانه‌های جامد خاک به ترتیب مطابق استانداردهای ASTM D2216 و ASTM D854 بر روی سه نمونه آزمایش صورت گرفته و مقادیر آن اندازه‌گیری شده و میانگین آنها به عنوان مقادیر به دست آمده به عنوان درصد رطوبت [۴۴]، چگالی دانه‌های خاک [۴۵] و وزن مخصوص خاک [۴۶] تعیین شده است.

جدول ۳-۴ مقادیر درصد رطوبت و وزن مخصوص دانه‌های جامد خاک

آزمایش	درصد رطوبت	چگالی ویژه خاک	وزن مخصوص خاک (gr/cm^3)
۱	۱۶/۴۲	۲/۶۵	۱/۴۱
۲	۱۷/۲۷	۲/۶۶	۱/۴۰
۳	۱۶/۸۳	۲/۶۴	۱/۴۰
میانگین	۱۶/۸۴	۲/۶۵	۱/۴۰

۳-۴-۲- آزمایش تعیین حدود آتربرگ ASTM D4318

آزمایش تعیین حدود آتربرگ بر اساس استاندارد ASTM D4318 انجام می‌شود و هدف از انجام آن تعیین مقادیر حدروانی، حدخمیری و شاخص خمیری خاک‌ها می‌باشد [۴۷]. خاک‌های ریزدانه با توجه به مقدار آب جذب شده حالت‌های مختلفی به خود می‌گیرند. افزایش آب در خاک‌های ریزدانه باعث می‌شود دانه‌های خاک با آب جذب شده پوشیده شوند. افزایش آب در خاک‌های ریزدانه باعث افزایش ضخامت لایه دور دانه‌ها شده و لغزش دانه‌ها روی یکدیگر راحت تر انجام می‌شود. بنابراین رفتار خاک عموماً به مقدار آب جذب آنها بستگی دارد. آزمایش آتربرگ به دو روش تر و خشک انجام می‌شود و در هر دو روش تر و خشک می‌توان از روش تک نقطه‌ای یا سه نقطه‌ای استفاده کرد. اما با توجه به آزمایشات انجام شده توسط محققین روش چند نقطه‌ای خیلی دقیق‌تر از روش تک نقطه‌ای می‌باشد. روش سه نقطه‌ای که ما در این تحقیق از آن استفاده کرده‌ایم خیلی دقیق‌تر از روش تک نقطه‌ای می‌باشد. روش تک نقطه‌ای نیاز به اپراتور مجرب دارد برای همین انجام این آزمون به اپراتورهای غیرمجرب توصیه نمی‌شود.

برای همه خاک‌های مورد بررسی می‌توان از روابط تجربی مختلف و مشخصی که توسط محققین بدست آمده خصوصیات خاک و پارامترهای مختلف را بدست آورد. بنابراین تعیین حدود آتربرگ کمک بسیاری برای بدست آوردن ویژگی‌های دیگر خاک می‌نماید. حد روانی، اندازه مقاومت برشی خاک با درصدهای مشخصی از رطوبت خاک را به ما می‌دهد. با کاهش ذرات خاک، حدروانی کاهش می‌یابد اما با توجه به رفتار پلاستیک خاک با کاهش اندازه ذرات، حد خمیری افزایش می‌یابد.

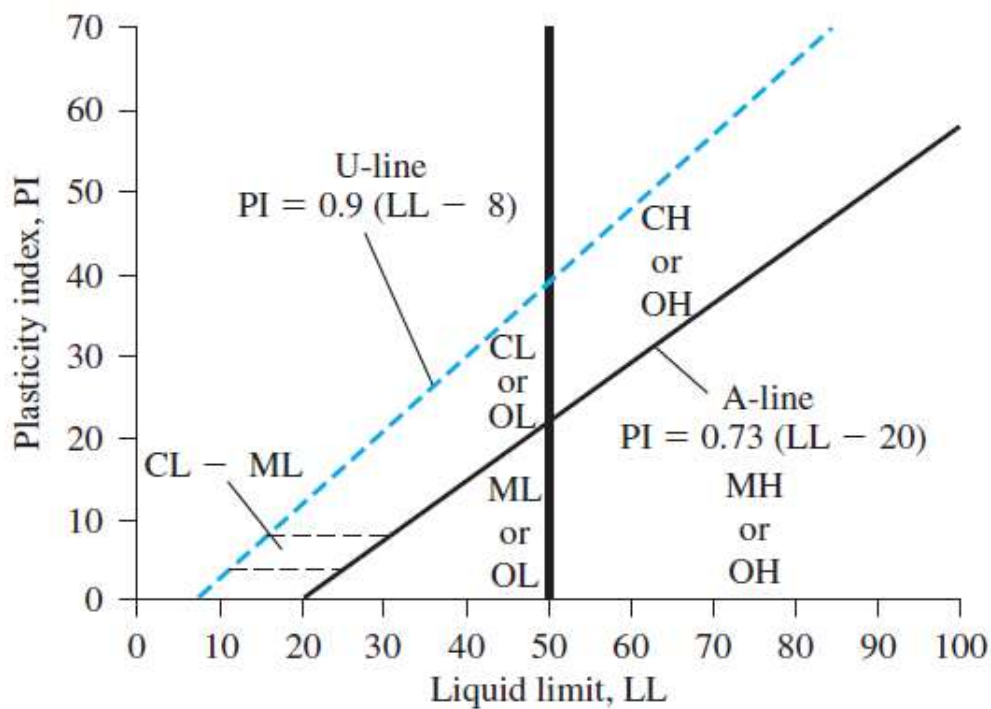
ابتدا نمونه خاک را در هوای آزاد خشک کرده و به مقدار حدود ۱۵۰ گرم آن را از الک نمره ۴۰ عبور می‌دهیم. نمونه را در ظرف تبخیر قرار داده و به آن مقداری آب اضافه می‌نماییم و نمونه را به خوبی مخلوط کرده بطوری که به صورت یک خمیر یکنواخت درآید. قسمتی از نمونه خاک آماده شده را در جام کاساگرانده قرار داده و در حالی که جام روی پایه ثابت است با کاردک سطح خاک داخل

جام را صاف می‌کنیم، بطوریکه عمق خاک در گودترین نقطه ۱ سانتیمتر باشد. با استفاده از ابزار شیارکش، شیاری روی خاک داخل جام در امتداد محور تقارن بوجود می‌آوریم. دسته دستگاه کاساگرانده را طوری می‌چرخانیم که در هر ثانیه ۲ ضربه وارد نماید تا شیار ایجاد شده در جام در طولی به اندازه ۱۳ میلیمتر بسته شود. این کار را طی مراحل مختلف با اضافه کردن آب به نمونه در ضربات ۱۵ تا ۲۰، ۲۰ تا ۳۰ و ۳۰ تا ۳۵ ادامه می‌دهیم.

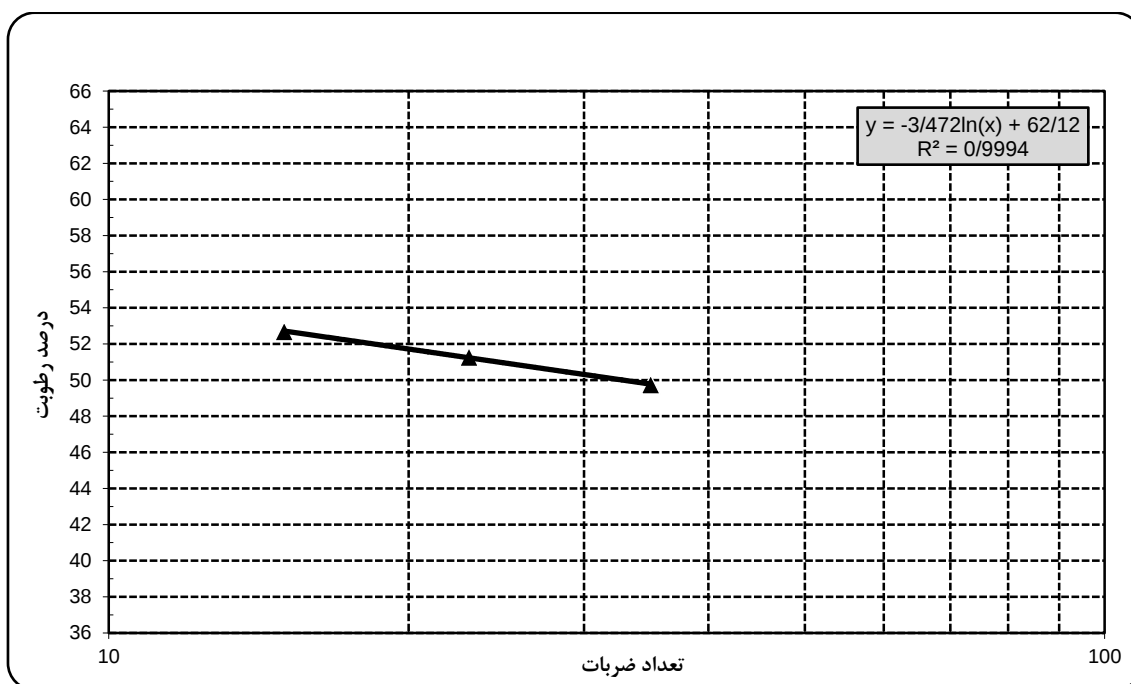


شکل ۳-۵ انجام آزمایش تعیین حدود آتربگ

حد خمیری (PL)		حد روانی (LL)			مشخصات آزمایش
		۳۵	۲۳	۱۵	تعداد ضربات
۲۸/۶۲	۲۸/۳۹	۲۸/۷۵	۲۹/۱۰	۲۹/۳۴	وزن ظرف
۳۱/۱۲	۳۱/۱۶	۳۴/۸۶	۳۵/۶۲	۳۶/۷۰	وزن ظرف + وزن خاک تر
۳۰/۵۸	۳۰/۵۵	۳۲/۸۳	۳۳/۴۱	۳۴/۱۶	وزن ظرف + وزن خاک خشک
۲۷/۵۵	۲۸/۲۴	۴۹/۷۵	۵۱/۲۸	۵۲/۷۰	درصد رطوبت



شکل ۳-۶ نمودار خمیری خاک [۴۷]



شاخص خمیری $PI = 23.05\%$ حد خمیری $PL = 27.90\%$ حد روانی $LL = 50.94\%$

شکل ۳-۷ نمودار آزمایش تعیین حدود آتربرگ (حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری) خاک محل

۳-۴-۳- آزمایش تراکم به روش پراکتور استاندارد ASTM D698

یکی از مهم‌ترین اهداف آزمایش تراکم، کاهش میزان تخلخل و بدست آوردن درصد تراکم خاک‌های کوبیده شده می‌باشد [۴۸]. اضافه کردن آب تا حد مشخصی باعث می‌شود که این عمل راحت‌تر انجام شود. با بدست آوردن درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک ماکزیمم، می‌توان در میزان انرژی کوبش برای رسیدن به درصد تراکم مورد نیاز از لحاظ زمان و هزینه صرفه جویی نمود. آزمایش تراکم در قالب‌هایی به قطر ۴ و ۶ اینچ بر اساس ضربات چکش ۲/۵۰ کیلوگرمی از ارتفاع ۳۰/۵۰ سانتیمتر انجام می‌شود. آزمایش تراکم به روش‌های A , B , C , D انجام می‌شود که ما در این تحقیق با توجه به خصوصیات خاک از روش A استفاده کرده‌ایم [۴۸].

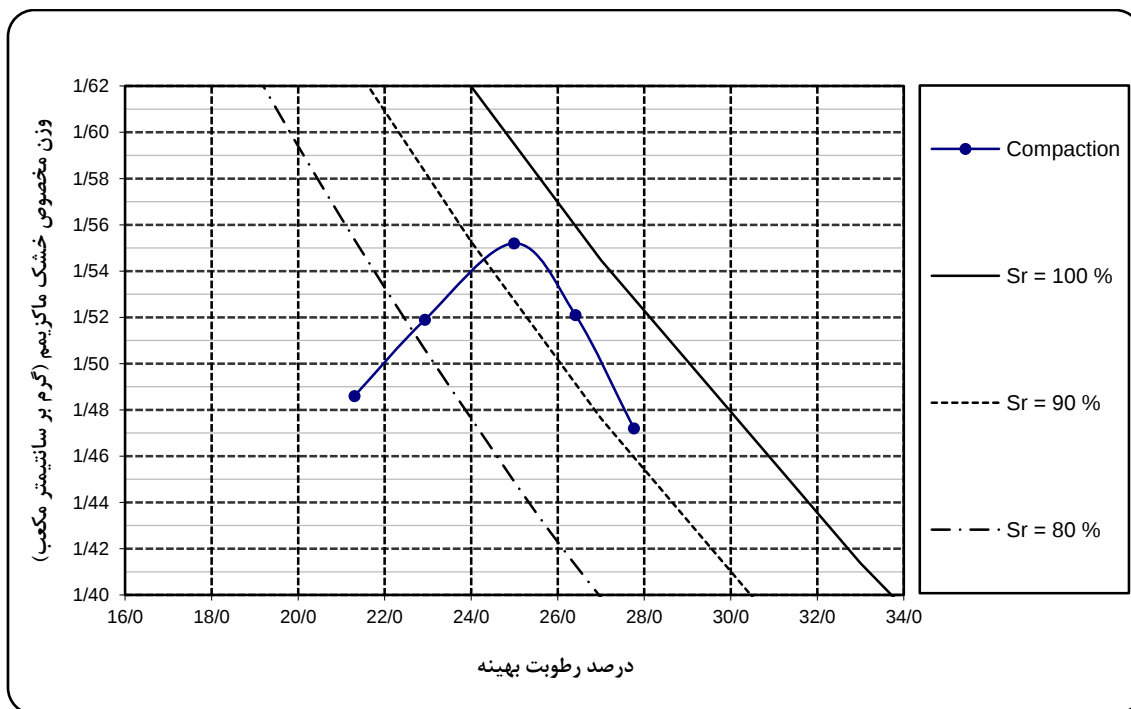
در این آزمایش نمونه خاک با درصد رطوبت مشخص در ۳ لایه در قالبی با ابعاد استاندارد با چکش ۲/۵۰ کیلوگرمی و تعداد ۲۵ ضربه در هر لایه کوبیده می‌شود و سپس وزن مخصوص خشک خاک و درصد رطوبت اندازه گیری می‌شود. با تکرار این عمل و افزودن آب در هر مرحله می‌توان با رسم نمودار نتایج ترسیم شده را مشاهده و از روی آن وزن مخصوص خشک ماکزیمم و درصد رطوبت بهینه را بدست آورد.



شکل ۳-۸ انجام آزمایش تراکم

جدول ۳-۶ مقادیر درصد رطوبت بهینه و دانسیته ماکزیمم خاک محل

مشخصات آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵
وزن قالب + وزن نمونه تر (gr)	۵۳۹۲	۵۴۵۳	۵۵۲۱	۵۵۰۵	۵۴۶۵
حجم قالب (cm ³)	۹۳۸/۶۰	۹۳۸/۶۰	۹۳۸/۶۰	۹۳۸/۶۰	۹۳۸/۶۰
وزن قالب (gr)	۳۷۰۰	۳۷۰۰	۳۷۰۰	۳۷۰۰	۳۷۰۰
وزن نمونه تر (gr)	۱۶۹۲	۱۷۵۳	۱۸۲۱	۱۸۰۵	۱۷۶۵
وزن مخصوص تر نمونه (gr/cm ³)	۱/۸۰۳	۱/۸۶۸	۱/۹۴۰	۱/۹۲۳	۱/۸۸۰
وزن ظرف (gr)	۴۳/۶۴	۴۵/۹۴	۴۸/۱۷	۴۵/۸۸	۵۱/۸۰
وزن ظرف + وزن نمونه تر (gr)	۲۹۰/۰۵	۲۷۵/۲۵	۳۱۸/۵۰	۲۶۰/۱۵	۳۰۶/۷۰
وزن ظرف + وزن نمونه خشک (gr)	۲۴۷/۷۹	۲۳۳/۶۶	۲۶۵/۲۷	۲۱۵/۳۸	۲۵۱/۳۱
درصد رطوبت (%)	۲۱/۳۰	۲۲/۹۳	۲۴/۹۹	۲۶/۴۱	۲۷/۷۶
وزن مخصوص خشک (gr/cm ³)	۱/۴۸۶	۱/۵۱۹	۱/۵۵۲	۱/۵۲۱	۱/۴۷۱



وزن مخصوص خشک ماکزیمم $\gamma_d = 1.552 \text{ gr/cm}^3$

درصد رطوبت بهینه $\omega_{opt} = 24.99 \%$

شکل ۳-۹ منحنی تراکم (درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک ماکزیمم) خاک محل

۳-۴-۴- آزمایش هیدرومتری مضاعف ASTM D4221

از ترکیب نتایج آزمایش هیدرومتری مضاعف با آزمایش دانه‌بندی به روش ته‌نشینی مطابق با استاندارد ASTM D422 بر روی نمونه‌های مشابه از یک خاک، می‌توان شاخص واگرایی خاک‌های ریزدانه رسی را تعیین نمود [۲۰].

روش انجام آزمایش هیدرومتری مضاعف دقیقاً مشابه آزمایش دانه‌بندی به روش ته‌نشینی یا همان آزمایش هیدرومتری با استاندارد ASTM D422 است، با این تفاوت که در استاندارد انجام آزمایش هیدرومتری مضاعف برای تعیین مقادیر درصد ذرات کوچکتر از ۵ میکرون در مخلوط آب و خاک از محلول پراکنده‌ساز هگزامتافسفات سدیم و همزن مکانیکی استفاده نمی‌شود. از تقسیم ذرات کوچکتر از ۵ میکرون در آزمایش هیدرومتری مضاعف بر ذرات کوچکتر از ۵ میکرون در آزمایش هیدرومتری استاندارد، می‌توان شاخصی واگرایی خاک را بدست آورد.

در مرحله اول، آزمایش هیدرومتری معمولی به روش استاندارد ASTM D422 بر روی نمونه خاک خشک انجام می‌شود که در آن از ماده پراکنده ساز هگزامتافسفات سدیم و نیز همزن برقی برای جداسازی دانه ها استفاده شده است. در مرحله دوم، آزمایش هیدرومتری مضاعف به روش استاندارد ASTM D4221 بر روی نمونه خاک خشک انجام می‌شود. لازم بذکر است این مرحله از آزمایش بدون ماده پراکنده ساز هگزا متافسفات سدیم و نیز بدون همزن مکانیکی انجام می‌شود.

در رابطه زیر برای بدست آوردن درصد واگرایی مطابق آزمایش هیدرومتری مضاعف، مقدار A برابر است با درصد وزنی ذرات به قطر کمتر از ۵ میکرون در آزمایش هیدرومتری با آب مقطر و با استفاده از ماده پراکنده ساز و همزن مکانیکی و مقدار B برابر با درصد وزنی ذرات به قطر کمتر از ۵ میکرون در آزمایش هیدرومتری با آب مقطر و بدون استفاده از ماده پراکنده ساز و همزن مکانیکی می‌باشد.

$$\text{Dispersion Percentage} = \frac{B}{A} \times 100 \quad \text{رابطه (۱-۳)}$$

آزمایش هیدرومتری دوگانه قابلیت شناسایی همه رس‌های واگرا را ندارد، طراحی به استناد نتایج این آزمایش می‌تواند محافظه کارانه نباشد. با توجه به این موضوع عموماً آزمایش هیدرومتری دوگانه همراه با آزمایش‌های دیگر باید انجام شود.

منحنی توزیع اندازه دانه‌ها، یک منحنی نیمه لگاریتمی می‌باشد که قسمت افقی نمودار لگاریتمی بوده و قطر ذرات را شامل می‌شود و منحنی قائم درصد عبوری را نشان می‌دهد.

رس‌های واگرا در حضور آب با غلظت کم نمک پراکنده می‌شوند. بر خلاف این خاک‌ها، رس‌های مجتمع در همین شرایط به صورت لخته‌ای باقی می‌مانند. اطلاعات موجود نشان می‌دهد که نتایج این آزمایش دارای سطح اطمینان تقریبی ۸۵ درصد در پیش بینی واگرایی خاک‌ها است.

با توجه به وجود ذرات بزرگتر از ۷۵ میکرون، در ابتدا، آزمایش دانه‌بندی به روش الک مطابق استاندارد ASTM D421 بر روی نمونه انجام شده و درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ برابر ۹۳/۶۴ درصد بدست آمده است.

جدول ۳-۷ پتانسیل واگرایی خاک در آزمایش هیدرومتری دوگانه براساس معیار شرارد [۴۹]

Dispersion Percentage	Soil Dispersion Potential
≤ 15	Non Dispersive
15 - 35	Intermediate
≥ 35	Dispersive

جدول ۳-۸ پتانسیل واگرایی خاک در آزمایش هیدرومتری دوگانه براساس معیار بل و ماود [۵۰]

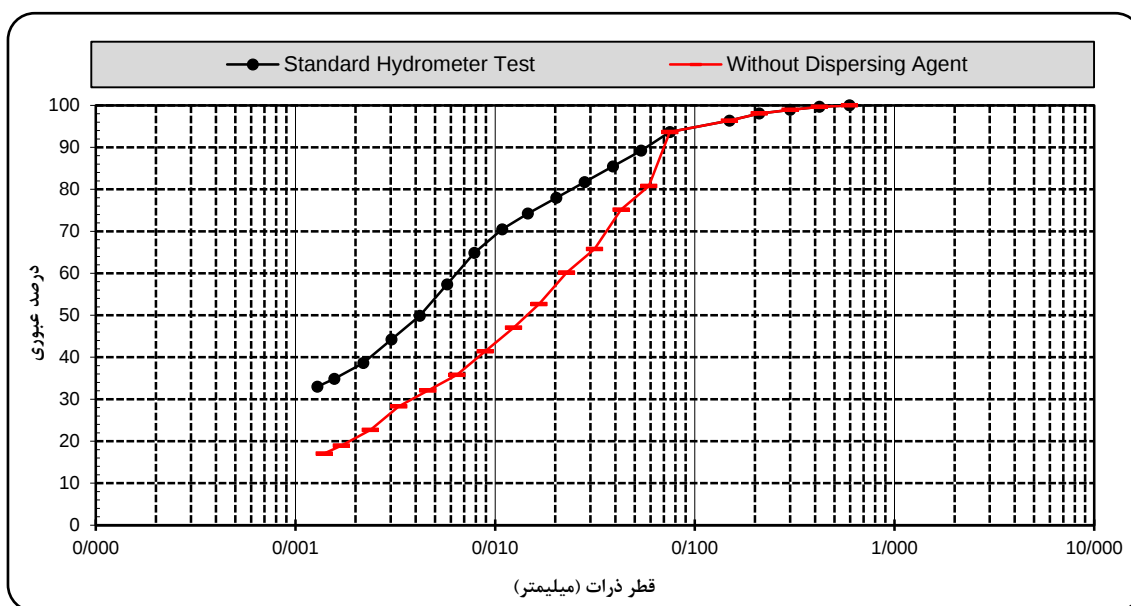
Dispersion Percentage	Soil Dispersion Potential
≤ 15	Non Dispersive
15 - 30	Slightly Dispersive
30 - 50	Moderately Dispersive
≥ 50	Highly Dispersive

جدول ۳-۹ نتایج آزمایش هیدرومتری مضاعف خاک محل پژوهش

نتایج آزمایش هیدرومتری مضاعف		نتایج آزمایش هیدرومتری	
چگالی : ۲/۶۵ تصحیح صفر : ۵/۵۰ تصحیح هلالی : ۰/۵۰ دمای آزمایش : ۲۰ درجه		چگالی : ۲/۶۵ تصحیح صفر : ۱/۰ تصحیح هلالی : ۰/۵۰ دمای آزمایش : ۲۰ درجه	
قرائت هیدرومتر	زمان قرائت (دقیقه)	قرائت هیدرومتر	زمان قرائت (دقیقه)
۴۴	۰/۵۰	۵۳	۰/۵۰
۴۱	۱	۵۱	۱
۳۶	۲	۴۹	۲
۳۳	۴	۴۷	۴
۲۹	۸	۴۵	۸
۲۶	۱۵	۴۳	۱۵
۲۳	۳۰	۴۰	۳۰
۲۰	۶۰	۳۶	۶۰
۱۸	۱۲۰	۳۲	۱۲۰
۱۶	۲۴۰	۲۹	۲۴۰
۱۳	۴۸۰	۲۶	۴۸۰
۱۱	۹۶۰	۲۴	۹۶۰
۱۰	۱۴۴۰	۲۳	۱۴۴۰



شکل ۳-۱۰ انجام آزمایش هیدرومتری مضاعف



درصد واگرایی ۶۱/۱۴

$$F_{(0.005)1} \approx 53.76 \%$$

$$F_{(0.005)2} \approx 32.87 \%$$

شکل ۳-۱۱ منحنی آزمایش هیدرومتری مضاعف خاک محل

۳-۴-۵- آزمایش شیمی خاک

آزمایش شیمیایی خاک شامل سه مرحله نمونه برداری، آماده سازی و تهیه عصاره اشباع می باشد. انجام آزمایش و دستیابی به نتایج آزمایشگاهی و نهایتاً توصیه برای افزودن عناصر و مواد مورد نیاز عموماً در آزمایش شیمیایی خاک انجام و در آزمایشگاه خاک شناسی پارامترهای زیر مورد سنجش قرار می گیرند. که در این پروژه آزمایشات شیمی خاک توسط شرکت خاک آزمای گرگان به مدیریت آقای مهندس نادری انجام شده است.

میزان مواد مغذی مورد نیاز گیاهان شامل اشکال مختلف نیتروژن موجود در آب و خاک.

کاتیون ها مانند سدیم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و نسبت آنها.

میزان مواد آلی (درصد کربن) موجود در خاک، همچنین درصد رطوبت موجود در خاک.

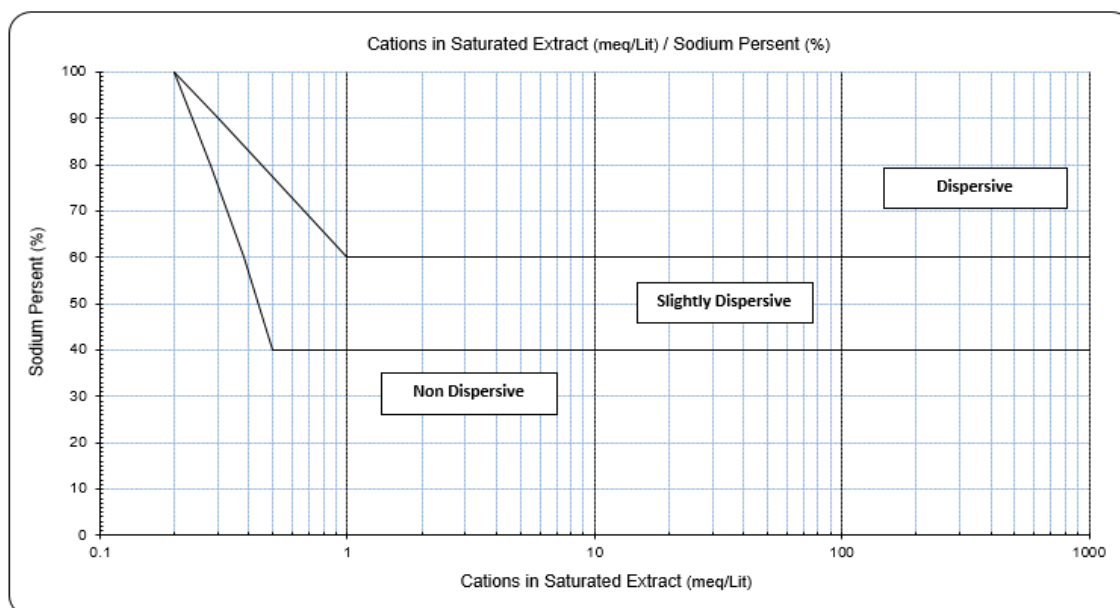
اندازه گیری اسیدیته (PH) و هدایت الکتریکی (EC) خاک.

اندازه گیری میزان عناصر فلزی مورد نیاز گیاهان مانند مس، روی و همچنین فلزات سنگین.

سموم کشاورزی یا هیدروکربن های موجود در خاک.

در حوزه مهندسی عمران تمرکز آزمایش خاک بر سنجش کیفیت مکانیکی خاک است، به همین دلیل آزمایش های شیمیایی خاک محدود به PH، سختی کل آب، هدایت الکتریکی، کاتیون ها و آنیون ها، مقدار کل املاح محلول، مقدار گچ در خاک، مقدار آهک در خاک و مواد آلی موجود در خاک می شود. در پروژه های عمرانی لازم است به پارامترهای شیمیایی خاک توجه فراوانی شود چراکه برای تحلیل رفتارهای خاک محل احداث پروژه، امری حیاتی به حساب می آید.

در روش شیمیایی، کنترل پتانسیل واگرایی خاک ها بر اساس عناصر موجود در آب منفذی و خاک تعیین می شود، به این صورت که از نمونه مورد نظر عصاره گل اشباع تهیه می شود و میزان کل املاح محلول و مقادیر کاتیون های خاک شامل سدیم، کلسیم، منیزیم و پتاسیم و درصد سدیم آن اندازه گیری می شود و میزان واگرایی را بر اساس معیار شرارد محاسبه می گردد.



شکل ۳-۱۲ معیار شرارد جهت شناسایی خاک‌های واگرا به کمک نتایج شیمی خاک [۴۹]

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad \text{رابطه (۳-۲)}$$

$$Ps = \frac{Na}{Tds} \times 100 \quad \text{رابطه (۳-۳)}$$

$$Tds = Na + Ca + Mg + K \quad \text{رابطه (۳-۴)}$$

در روابط فوق، SAR شامل نسبت جذب سدیم^۱، Ps درصد سدیم^۲ و Tds میزان کل املاح محلول^۳ در خاک می باشد.

جدول ۳-۱۰ نتایج آزمایش شیمیایی خاک محل

PH	EC ms/cm	SP	Na	Ca	Mg	K
7.8	8.50	67.50	83.40 meq/l	31.80 meq/l	29.40 meq/l	0.35 meq/l
7.8	8.50	67.50	1294 ppm	430 ppm	241 ppm	9.24 ppm

¹ SAR (Sodium Adsorption Ratio)

² Ps (Sodium Percentage)

³ Tds (Total dissolved solids)

۳-۴-۶- آزمایش پین هول یا سوراخ زنی ASTM D4647

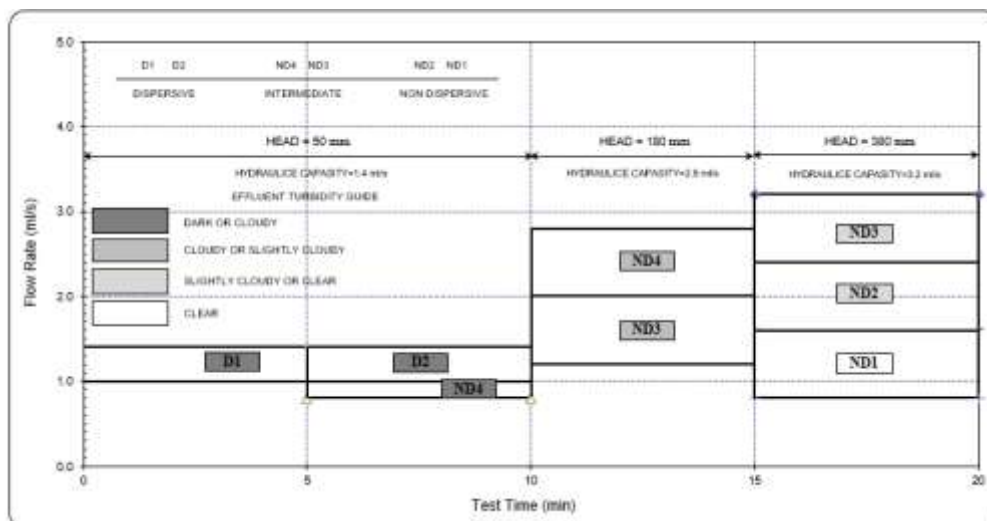
شرارد در سال ۱۹۷۶، دستگاه پین هول را اختراع کرد که به کمک این دستگاه بتواند مستقیماً فرسایش پذیری خاک‌ها را اندازه گیری نماید. این آزمایش ارایه‌دهنده روشی مستقیم و کیفی برای اندازه‌گیری پتانسیل واگرایی و فرسایش‌پذیری کلوئیدی خاک‌های رسی، توسط عبور آب از سوراخ کوچک ایجاد شده در میان نمونه است [۲۱].

رده‌بندی واگرایی خاک‌ها در این آزمایش به روش‌های A , B و C انجام می‌شود. در روش A و C خاک‌ها به شش رده واگرا^۱ (D1 و D2) واگرای کم تا متوسط^۲ (ND4 و ND3) و غیرواگرا^۳ (ND1) و ND2 تقسیم می‌شوند. در روش B خاک‌ها به سه رده واگرا (D)، کمی واگرا (SD) و غیرواگرا (ND) تقسیم می‌شوند. ارزیابی پتانسیل واگرایی به روش‌های A و C مستلزم بررسی قطر نهایی سوراخ، شفافیت آب خروجی، و نرخ جریان می‌باشد. ولی در روش B واگرایی تنها بر اساس قطر نهایی سوراخ و شفافیت آب خروجی ارزیابی می‌شود. در این تحقیق برای ارزیابی پتانسیل واگرایی نمونه‌ها از روش‌های A و C استفاده شده است.

¹ D1 , D2 : Dispersive clays that rapidly under 50 mm head

² ND3 , ND4 : Dispersive clay that erode slowly under 50 mm , 180 mm or 380 mm head

³ ND1 , ND2 : Nondispersive clay with very slight to no colloidal erosion under 380 mm head



شکل ۳-۱۳ نمودار معیار آزمایش پین هول [۲۱]

جدول ۳-۱۱ نتایج آزمایش پین هول برای خاک محل

Head	50 mm		Final hole > 2 mm		
Time min	1	2	3	4	5
Flow ml	65	131	192	251	314
Dif . Flow ml	65	66	61	59	63
Dif . Time sec	60	60	60	60	60
Flow Rate ml/sec	1.08	1.10	1.02	1.00	1.05
Turbidity from side	VD	VD	VD	VD	VD
Turbidity from top	D	D	D	D	D

VD : Very Dark	MD : Moderately Dark	MD : Moderately Dark
D : Dark	BV : Barely Visible	CC : Completely Clear



شکل ۳-۱۴ انجام آزمایش پین هول

۳-۴-۷- آزمایش مقاومت فشاری تک محوری ASTM D2166

هدف از انجام آزمایش تک محوری تعیین مقاومت برشی خاک‌های ریزدانه چسبنده می‌باشد [۵۱].

آزمایش تک محوری سریع ترین و راحت ترین روش برای بدست آوردن مقاومت برشی خاک می‌باشد. این آزمایش شبیه آزمایش سه محوری UU با فشار همه جانبه صفر می‌باشد. پارامترهای مقاومت برشی در خاک‌های چسبنده از پیچیدگی بیشتری نسبت به خاک‌های دانه‌ای برخوردار است. مقاومت برشی در خاک‌های ریزدانه از دو نوع مقاومت چسبندگی و مقاومت اصطکاکی نشات می‌گیرد. مقاومت اصطکاکی تابع نیروهای وزنی است که بیشتر در خاک‌های دانه‌ای به چشم می‌خورد و مقاومت چسبندگی تابع نیروهای سطحی می‌باشد.

البته رفتار دقیق نیروهای سطحی که باعث چسبندگی می‌شود هنوز ناشناخته است. باید توجه

داشت که مقدار چسبندگی خاک یک پارامتر متغیر بوده و تابعی از نحوه بار منتقل شده توسط سازه خاک می‌باشد. در صورتیکه هیچ گونه بار جانبی به خاک وارد نشود می‌توان چسبندگی را به عنوان مقاومت برشی خاک مطرح کرد.

به منظور انجام آزمون تک محوری، نمونه را در جای مخصوص خود در دستگاه آزمایش قرار داده به طوری که نمونه استوانه‌ای نزدیک مرکز بارگذاری در صفحه بارگذاری باشد. باید دقت داشت که راستای نمونه بر صفحه دستگاه عمود باشد، در غیر اینصورت منحنی تنش-کرنش خیلی زود به حالت افقی خود نزدیک می‌شوند. فشار وارده بر نمونه باید تا جایی اعمال شود که ترک‌ها در نمونه مشاهده شود یا آنکه منحنی تنش-کرنش به مقدار ماکزیمم خود برسد. در واقع قرائت نمونه تا جایی ادامه پیدا می‌کند که یکی از سه حالت زیر اتفاق بیفتد :

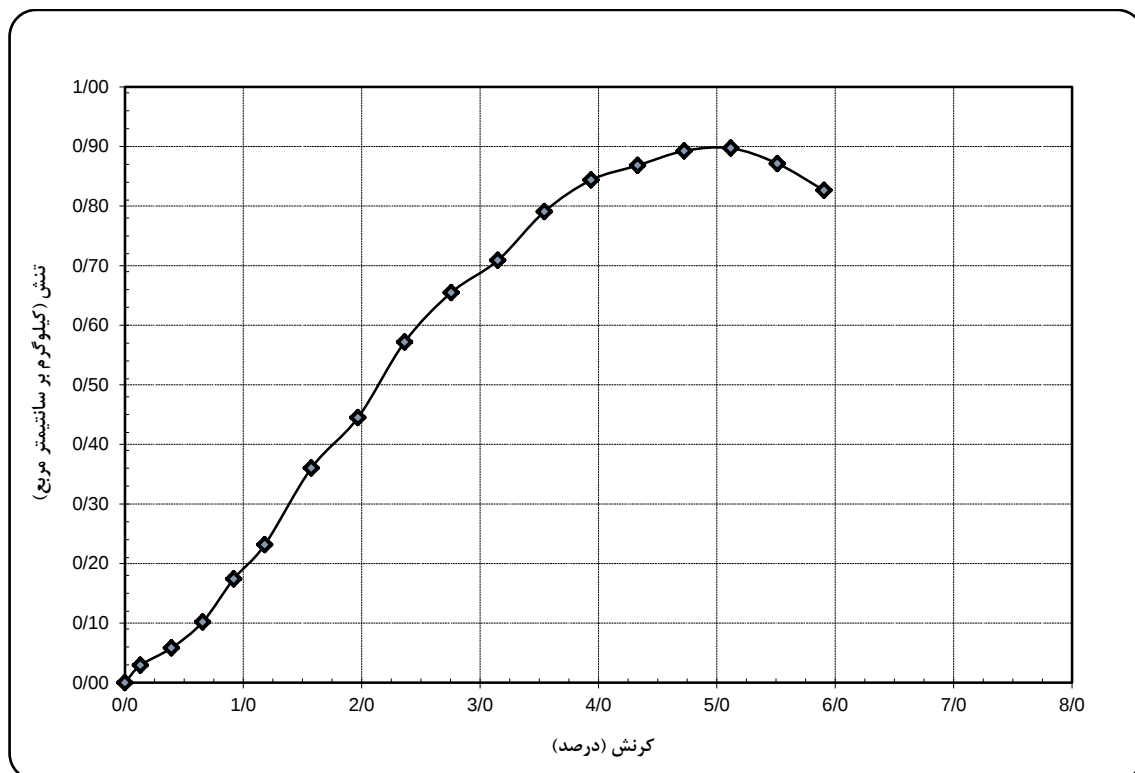
الف) بار در نمونه کاهش یابد.

ب) بار برای چهار قرائت یکسان شود.

ج) تغییر مکان تا ۱۵ درصد ادامه پیدا کرده باشد.



شکل ۳-۱۵ انجام آزمایش تک محوری



مقاومت فشاری تک محوری $q_u = 0.897 \text{ kg/cm}^2$

کرنش $\varepsilon = 5.12 \%$

شکل ۳-۱۶ منحنی آزمایش تک محوری خاک محل

۳-۴-۸- آزمایش پتانسیل تورم خاک‌های چسبنده ASTM D4546

هدف از انجام این استاندارد تعیین میزان تورم رس، با آزمایش ساده ادئومتر بر روی نمونه می‌باشد. دو روش معمول برای بررسی تورم خاک شامل آزمایش تورم آزاد^۱ و آزمایش فشار تورم^۲ می‌باشند. در آزمایش تورم آزاد، نمونه درون سل دستگاه تحکیم (ادئومتر) تحت سربار کوچکی در حدود ۶/۹ کیلونیوتن بر مترمربع قرار داده می‌شود و میزان تورم آزاد نمونه اندازه گیری می‌شود. در آزمایش فشار تورم، نمونه در حلقه تحکیم قرار داده شده و بر آن فشاری مساوی فشار مؤثر سربار به علاوه فشار

¹ Unrestrained Swell

² Swelling Pressure

تقریبی شالوده اعمال می‌شود. سپس آب به نمونه اضافه می‌شود. به محض آغاز تورم نمونه، فشار با نمونه‌های تدریجی طوری بر نمونه اعمال می‌شود که از تورم آن جلوگیری نماید. این عمل تا حصول فشار تورم کامل ادامه می‌یابد [۱۹].

بالازدگی^۱ : افزایش ارتفاع Δh ستونی از خاک برجا به ارتفاع h پس از جذب آب

نشست^۲ : کاهش ارتفاع Δh ستونی از خاک برجا به ارتفاع h

در اندازه‌گیری تورم خاک سه روش پیشنهاد شده است که همگی بصورت محصور شده در دستگاه تحکیم بصورت قائم بارگذاری و انجام می‌شود که عبارتند از :

روش A : در این روش نمونه خاک تحت بار اولیه حداقل 1 kpa ناشی از وزن صفحه بارگذاری و سنگ متخلخل قرار گرفته و سپس غرقاب می‌شود تا متورم شود. پس از پایان تورم اولیه، نمونه بارگذاری می‌شود تا به نسبت منافذ یا ارتفاع اولیه برگردد.

روش B : در این روش پیش از غرقاب کردن نمونه در دستگاه تحکیم، فشاری بیشتر از فشار اولیه به نمونه وارد می‌شود. این فشار معمولاً برابر سربار نمونه در محل یا بار سازه یا هر دو انتخاب می‌شود. بر حسب کاربرد نتایج آزمایش می‌توان از مقادیر دیگری نیز استفاده کرد. پس از اعمال فشار، نمونه غرقاب شده و تورم اندازه‌گیری می‌شود.

روش C : در این روش پس از غرقاب کردن نمونه، با تنظیم فشار قائم وارد بر آن ارتفاع نمونه ثابت نگه داشته می‌شود. سپس آزمایش تحکیم مطابق استاندارد ASTM D2435 انجام و پتانسیل بالازدگی با استفاده از داده‌های باربرداری تخمین زده می‌شود.

¹ Heaving

² Settlement

در این تحقیق برای بررسی پتانسیل تورم آزاد نمونه‌ها از روش A استفاده شده است.

$$S_{w(\text{free})} = \frac{\Delta h}{h} \times 100 = \frac{e_{se} - e_0}{1 + e_0} \times 100 = \left[\frac{\gamma_{d0}}{\gamma_{se}} - 1 \right] \times 100 \quad \text{رابطه (۵-۳)}$$

h : ارتفاع اولیه نمونه

Δh : تغییر در ارتفاع نمونه

e_{se} : نسبت منافذ پس از تثبیت تورم تحت فشار اولیه

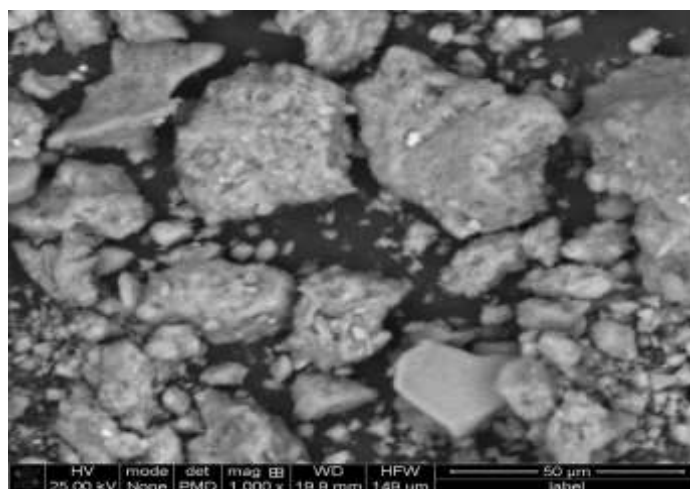
e_0 : نسبت منافذ اولیه



شکل ۳-۱۷ انجام آزمایش تورم

۳-۴-۹- میکروسکوپ الکترونی SEM

استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM یکی از بهترین روش‌های آنالیزی می‌باشد که امروزه در حوزه‌های مختلف کاربرد فراوانی دارد. با استفاده از این میکروسکوپ، امکان آنالیز شیمیایی ترکیب خاک‌ها، سطح و ریزساختار داخلی خاک را می‌توان در ابعاد خیلی کوچک میکرونی و یا نانومتری مورد بررسی قرار داد. بررسی‌ها با این میکروسکوپ به دو گروه میکروسکوپی و اسپکتروسکوپی تقسیم می‌شود. مورد اول برای بررسی فازها، ذرات، مورفولوژی و غیره است و حالت دوم برای بررسی‌های شیمیایی لایه‌های بیرونی همچون سطح به کار برده می‌شود. اساس کار میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی مبتنی بر روبش سطح نمونه توسط یک پرتو الکترونی می‌باشد. میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی عموماً در خلا کار می‌کنند. پس از ایجاد خلا با انجام عملیات روبش توسط پرتو الکترونی بر روی سطح نمونه، از سطح نمونه تصویری بر روی صفحه نمایشگر مشاهده می‌گردد. با تغییر ابزار ثبت پرتو می‌توان تصاویری با اطلاعات مختلف از سطح نمونه به دست آورد. در این تحقیق به منظور بررسی تغییرات ریزساختاری خاک مورد مطالعه، خاک محل و خاک اختلاط شده با ۲ درصد سولفات پتاسیم جهت عکسبرداری الکترونی انتخاب شدند و عکسبرداری توسط شرکت کانساران بینالود انجام شده است.



شکل ۳-۱۸ عکس SEM از خاک محل

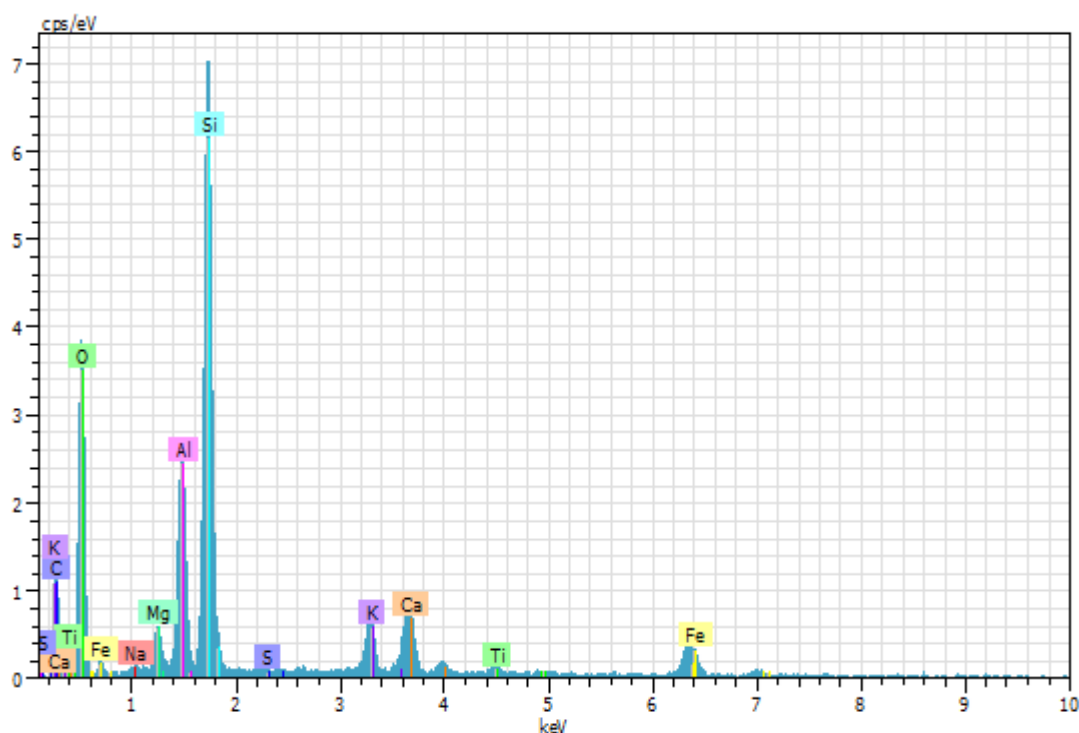
۳-۴-۱۰- طیف سنجی پراش پرتو ایکس EDX

یکی دیگر از روش‌های شناسایی که با میکروسکوپ الکترونی انجام می‌شود طیف سنجی تفکیک انرژی EDX یا EDS نام دارد. از اطلاعات بدست آمده از این روش برای بررسی ترکیبات شیمیایی استفاده می‌شود.

این روش بر مطالعه برهمکنش بین یک منبع برانگیختگی پرتو ایکس و یک نمونه متکی است. در سیستم EDX نمونه جامد به وسیله پرتو الکترونی بمباران می‌شود. در هنگام این بمباران، اتم‌های موجود در هر عنصر، از خود پرتو X با مقدار انرژی منحصر به خود تولید می‌کنند.

با اندازه گیری مقدار انرژی پرتو X آزاد شده در حین بمباران الکترونی یک نمونه، می‌توان نوع عنصر موجود در آن را مشخص نمود که نتایج آن به صورت یک طیف EDX نشان داده می‌شود.

در این تحقیق به منظور بررسی آنالیز EDX، خاک محل و خاک اختلاط شده با ۲ درصد سولفات پتاسیم جهت آنالیز انتخاب و توسط شرکت کانساران بینالود انجام شده است.



شکل ۳-۱۹ نتایج آنالیز EDX خاک محل

۳-۴-۱۱- آنالیز پراش اشعه ایکس XRD

پراش اشعه X یک روش غیرمخرب با چند کاربرد است. این روش یک تکنیک سریع آنالیزی است که برای تشخیص نوع مواد و همچنین فاز و خصوصیات کریستالی آن به کار می‌رود و اطلاعات جامعی درباره ترکیبات شیمیایی و ساختار کریستالین مواد طبیعی و صنعتی ارائه می‌دهد. هر کریستال، طرح اشعه X منحصر به فرد خود را دارد که به عنوان اثر انگشت برای تعیین هویت آن استفاده می‌شود. گسترده‌ترین استفاده XRD در شناسایی ترکیبات کریستالی بر اساس طرح پراش آنها است. در این پژوهش بر روی خاک محل، جهت شناسایی فازهای کریستالی آنالیز XRD توسط شرکت کانساران بینالود انجام شده است.

جدول ۳-۱۲ نتایج آنالیز شیمیایی خاک مورد پژوهش

فرمول	مقدار (درصد)
SiO ₂	۴۹/۸۹
Al ₂ O ₃	۱۱/۱۹
Fe ₂ O ₃	۴/۶۲
CaO	۱۲/۹۴
Na ₂ O	۱/۱۳
K ₂ O	۲/۱۹
MgO	۲/۷۹
TiO ₂	۰/۵۴۶
MnO	۰/۰۷۹
P ₂ O ₅	۰/۱۲۶
LOI	۱۴/۳۵
SO ₃	۰/۰۱۰

۳-۵- برنامه آزمایش‌ها

ساخت نمونه‌ها در این پژوهش به دو صورت انجام گرفته است. که توضیحات هر بخش در ادامه آمده است.

۳-۵-۱- ساخت نمونه‌ها بصورت اختلاط با سولفات پتاسیم

برای انجام آزمایش‌های هیدرومتری مضاعف، وزن مخصوص دانه‌های جامد، شیمی و تعیین حدود آتربرگ، خاک را با درصدهای ۰، ۰/۵۰، ۱، ۱/۵۰ و ۲ درصد سولفات پتاسیم نسبت به وزن خاک خشک اختلاط کرده و آزمایش‌ها بدون مدت زمان عمل‌آوری انجام شده است.

جدول ۳-۱۳ برنامه آزمایش خاک‌های اختلاط شده با سولفات پتاسیم

ردیف	آزمایش	درصد سولفات پتاسیم	زمان عمل‌آوری
۱	تعیین حدود آتربرگ	۰/۰	بدون زمان عمل‌آوری
		۰/۵۰	
		۱/۰	
		۱/۵۰	
		۲/۰	
۲	هیدرومتری مضاعف	۰/۰	بدون زمان عمل‌آوری
		۰/۵۰	
		۱/۰	
		۱/۵۰	
		۲/۰	
۳	چگالی	۰/۰	بدون زمان عمل‌آوری
		۰/۵۰	
		۱/۰	
		۱/۵۰	
		۲/۰	
۴	شیمی	۰/۰	بدون زمان عمل‌آوری
		۰/۵۰	
		۱/۰	
		۱/۵۰	
		۲/۰	

۳-۵-۲- ساخت نمونه‌های ریمولد شده با سولفات پتاسیم

در این پژوهش برای انجام آزمایش‌های تراکم، پین‌هول، تک‌محوری و تورم، سولفات پتاسیم با درصدهای ۰، ۰/۵۰، ۱، ۱/۵۰ و ۲ به نسبت وزن خاک خشک، با روش پراکتور استاندارد T99-A ریمولد^۱ شده و در زمان‌های عمل‌آوری مختلف آزمون شده است.

جدول ۳-۱۴ برنامه آزمایش خاک‌های ریمولد شده با سولفات پتاسیم

ردیف	آزمایش	درصد سولفات پتاسیم	زمان عمل‌آوری
۱	تراکم	۰/۰	بدون زمان عمل‌آوری
		۰/۵۰	
		۱/۰	
		۱/۵۰	
		۲/۰	
۲	پین‌هول	۰/۰	۱ و ۷ روزه
		۰/۵۰	
		۱/۰	
		۱/۵۰	
		۲/۰	
۳	تک‌محوری	۰/۰	۱، ۷ و ۲۸ روزه
		۰/۵۰	
		۱/۰	
		۱/۵۰	
		۲/۰	
۴	تورم یا بالازدگی	۰/۰	۱ روزه
		۰/۵۰	
		۱/۰	
		۱/۵۰	
		۲/۰	

¹ Remolded

فصل چهارم

بررسی نتایج و تفسیر آنها

۴-۱- مقدمه

در این فصل تحلیل و تفسیر داده‌ها، نتایج حاصل از انجام آزمون‌ها بر روی نمونه خاک بدون افزودنی و بررسی تأثیر سولفات پتاسیم بر روی خاک واگرا با درصدهای مختلف و زمان‌های عمل آوری مختلف ارائه شده است. در تحقیق حاضر واگرایی خاک با درصدهای متفاوت مواد افزودنی به روش‌های مختلف بررسی و پارامترهای مقاومتی خاک‌های اختلاطی با زمان‌های عمل آوری متفاوت کنترل گردیده است و طی انجام تحقیق بهترین درصد مواد افزودنی برای از بین بردن واگرایی خاک پیشنهاد شده است.

۴-۲- روش انجام آزمایش

یکی از مهم‌ترین مسائل در فرآیند بهسازی و تثبیت نمونه‌ها، روش انجام آزمایش، نوع ماده افزودنی و مقدار آن می‌باشد، که با توجه به خصوصیات خاک هر منطقه متفاوت می‌باشد. در این پژوهش، با در نظر گرفتن شرایط منطقه، پروژه‌های اجرا شده در آن و راهنمایی اساتید بزرگوار، آزمایشات پین هول، تک‌محوری و تعیین پتانسیل تورم خاک، بر روی نمونه‌های ریمولد شده به روش پراکتور استاندارد ASTM D698 در سه لایه و هر لایه ۲۵ ضربه با درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر نمونه‌گیری و انجام شده و آزمایش‌های دیگر مطابق استانداردهای مربوطه ارائه شده است.

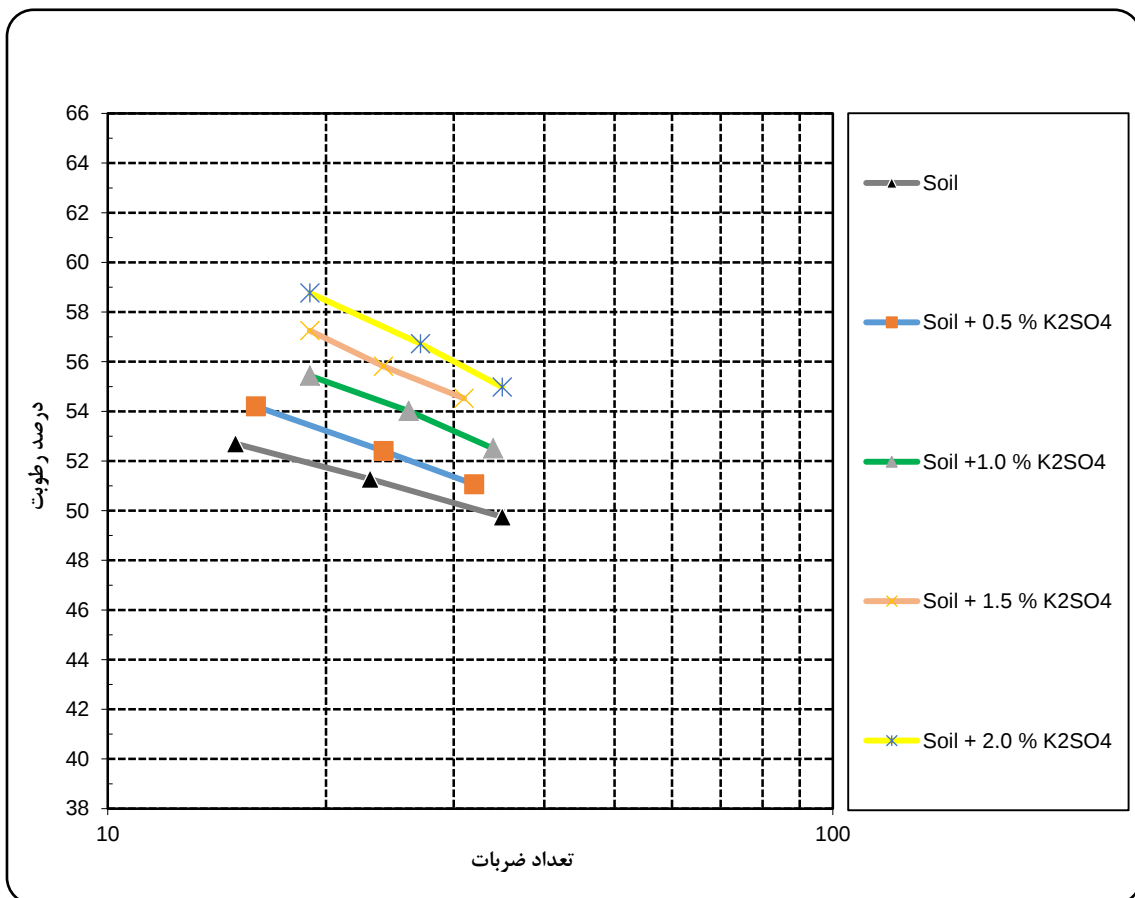
۴-۳- بررسی و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

در ابتدا واگرایی خاک محدوده مطالعه با آرمایش‌های هیدرومتری مضاعف، شیمی خاک و پین‌هول مورد ارزیابی قرار گرفته است که در هر سه روش، خاک مورد نظر واگرا بوده است. سپس سولفات پتاسیم با درصدهای ۰/۵۰ ، ۱ ، ۱/۵۰ و ۲ به خاک واگرا اضافه شده و واگرایی آنها کنترل، و نتایج آن در این فصل ارائه و بررسی شده است.

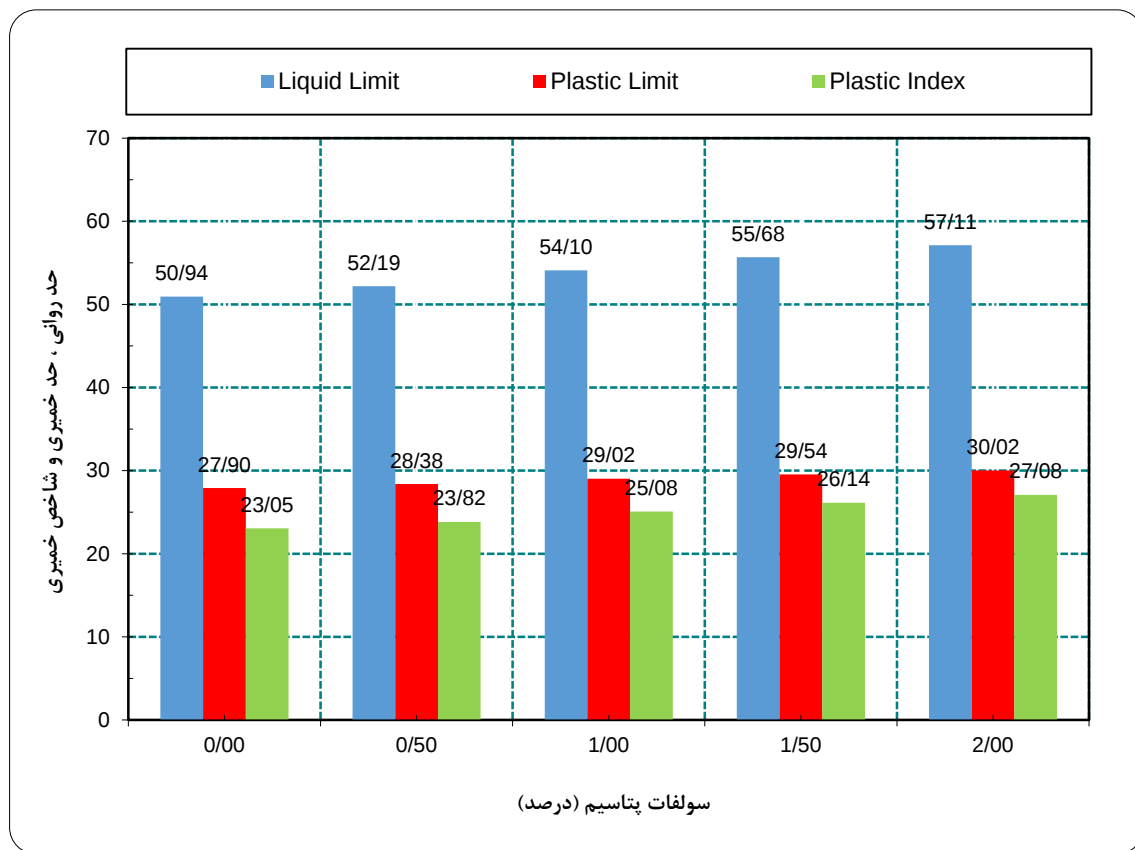
۴-۳-۱- نتایج آزمایش تعیین حدود آتربرگ

ابتدا حدود آتربرگ خاک محل مطابق استاندارد ASTM D4318 تعیین شده و سپس سولفات پتاسیم با نسبت‌های ۰/۰ ، ۰/۵۰ ، ۱ ، ۱/۵۰ و ۲ درصد به خاک اضافه شده و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفته است.

هنگامی که سیمان و آهک به عنوان ماده افزودنی جهت کاهش پتانسیل واگرایی به خاک اضافه می‌شوند در درصد‌های متفاوت، واگرایی خاک را از بین می‌برند اما اضافه کردن سیمان و آهک به خاک حدروانی و حدخمیری را افزایش داده و باعث کاهش نشانه خمیری خاک شده است. اما با اضافه شدن سولفات پتاسیم به خاک، حد روانی (LL) افزایش یافته و حد خمیری (PL) افزایش خیلی کمی داشته که در انتها شاخص خمیری (PI) افزایش پیدا کرده و نتایج آن به تفسیر ارائه شده است.



شکل ۱-۰ نمودار آزمایش تعیین حدود آتربرگ



شکل ۲-۰ نتایج آزمایش حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری با درصدهای مختلف سولفات پتاسیم

۴-۳-۱-۱- تأثیر سولفات پتاسیم بر روی نتایج آزمایش آتربرگ

با افزایش سولفات پتاسیم به خاک، حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری به ترتیب افزایش یافته است.

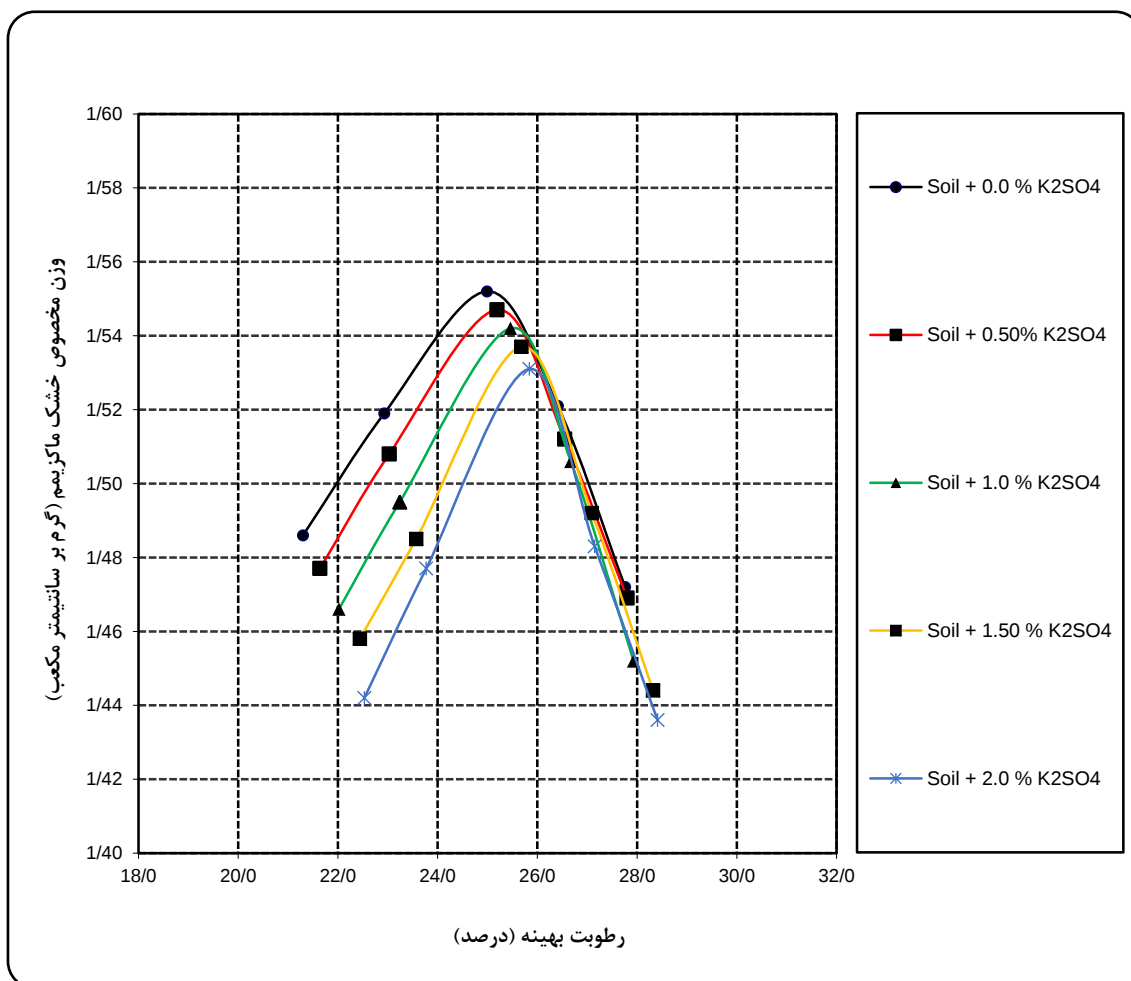
مقدار حد روانی خاک ۵۰/۹۴ درصد بوده که با اضافه کردن ۲ درصد سولفات پتاسیم به خاک، مقدار آن به عدد ۵۷/۱۱ درصد رسیده که نشان از رشد حدود ۱۲ درصدی حد روانی دارد و حد خمیری خاک از ۲۷/۹۰ درصد به ۳۰/۰۲ درصد رسیده که رشد ۸ درصدی داشته است. رشد حد خمیری نسبت به حد روانی کمتر می‌باشد. و در نهایت شاخص خمیری با افزایش ۲ درصد سولفات پتاسیم، مقدار ۱۷ درصد رشد داشته، که بیشترین رشد را به خود اختصاص داده است. بنابراین با توجه به افزایش شاخص خمیری، می‌توان گفت در پروژه‌هایی که محدودیت منابع مالی داریم، هزینه‌های حمل خاک قرضه تا حدودی کاهش می‌یابد.

۴-۳-۲- نتایج آزمایش تراکم

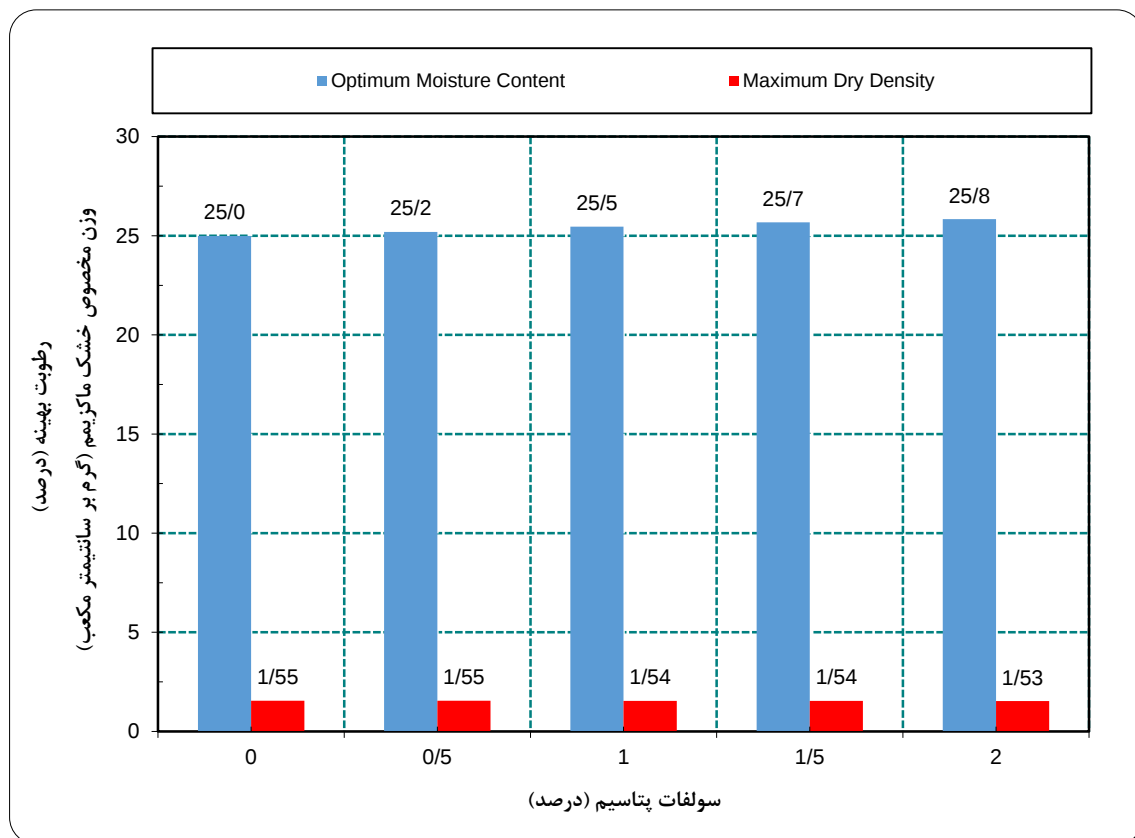
در این پژوهش آزمایش تراکم مطابق استاندارد ASTM D698 به روش پراکتور استاندارد انجام شده است. آزمایش تراکم مطابق روش A به ترتیب با اضافه کردن ۰/۵۰ ، ۱ ، ۱/۵۰ و ۲ درصد سولفات پتاسیم به خاک انجام شده است.

با بررسی نتایج متوجه می‌شویم که با افزایش سولفات پتاسیم، وزن مخصوص به مقدار خیلی کمی کاهش یافته و درصد رطوبت بهینه خیلی کم افزایش می‌یابد.

لازم بذکر است که سولفات پتاسیم بر خلاف آهک و سیمان، تأثیر کمتری بر روی وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه دارد.



شکل ۳-۰ منحنی آزمایش‌های تراکم



شکل ۴-۰ نتایج درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک ماکزیمم با درصدهای مختلف سولفات پتاسیم

۴-۳-۲-۱- تأثیر سولفات پتاسیم بر روی نتایج آزمایش تراکم

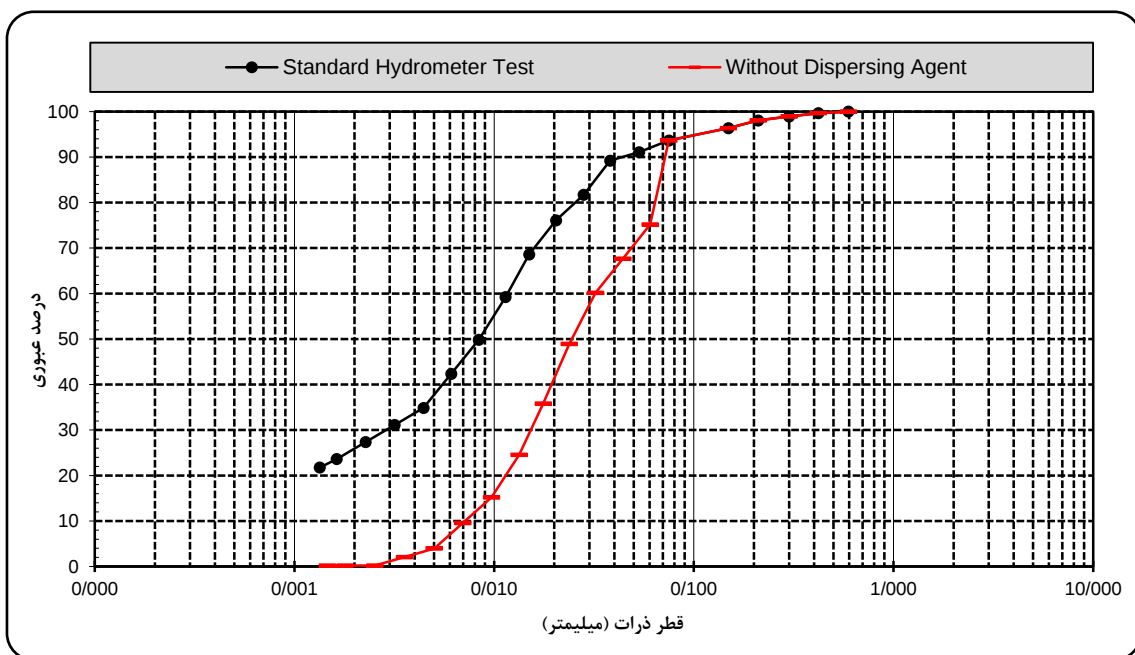
با افزایش سولفات پتاسیم به خاک، رطوبت بهینه خیلی کم افزایش یافته و وزن مخصوص خشک حداکثر به مقدار کمی کاهش یافته است.

با افزایش سولفات پتاسیم در این تحقیق، وزن مخصوص خشک حداکثر از ۱/۵۵ به ۱/۵۳ گرم بر سانتیمتر مکعب رسیده و درصد رطوبت از ۲۵ به ۲۵/۸۰ درصد رسیده که به ترتیب شاهد کاهش ۱ درصدی وزن مخصوص و افزایش ۳ درصدی مقدار رطوبت بهینه هستیم.

نکته مثبت در این تحقیق، تأثیر نه چندان زیاد سولفات پتاسیم بر روی کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر و افزایش درصد رطوبت بهینه می باشد. لازم بذکر است که افزایش درصد رطوبت بر روی خاک باعث قابلیت بهره‌وری خاک در کشاورزی، بخصوص کشت غلات می شود، زیرا نمونه‌ها بهتر آب را در خود نگه می دارند.

۳-۳-۴- نتایج آزمایش هیدرومتری مضاعف

آزمایش هیدرومتری مضاعف مطابق استاندارد ASTM D4221 انجام شده، که از تلفیق آزمایش هیدرومتری مضاعف با آزمایش دانه‌بندی به روش ASTM D422 می‌توان میزان واگرایی خاک را تعیین نمود. مقدار درصد عبوری ذرات ۵ میکرون برای خاک محل در روش استاندارد و مضاعف برابر ۵۳/۷۶ و ۳۲/۸۷ بدست آمده است. بنابراین با توجه به این دو مقدار، درصد واگرایی خاک محل ۶۱/۱۴ شده است که براساس معیار شرارد و همکاران خاک محل در رده خاک‌های واگرا قرار گرفته است. بنابراین آزمایش هیدرومتری مضاعف به ترتیب با اضافه کردن ۰/۵۰ ، ۱ ، ۱/۵۰ و ۲ درصد سولفات پتاسیم به خاک در این پژوهش انجام شده است. برای انجام آزمایش هیدرومتری دوگانه، با انجام دو بار آزمایش هیدرومتری روی نمونه، یکبار با ماده پراکنده‌ساز و همزن برقی و در مرحله بعدی آزمایش بدون ماده پراکنده‌ساز و همزن برقی انجام و نتایج ارائه شده است.

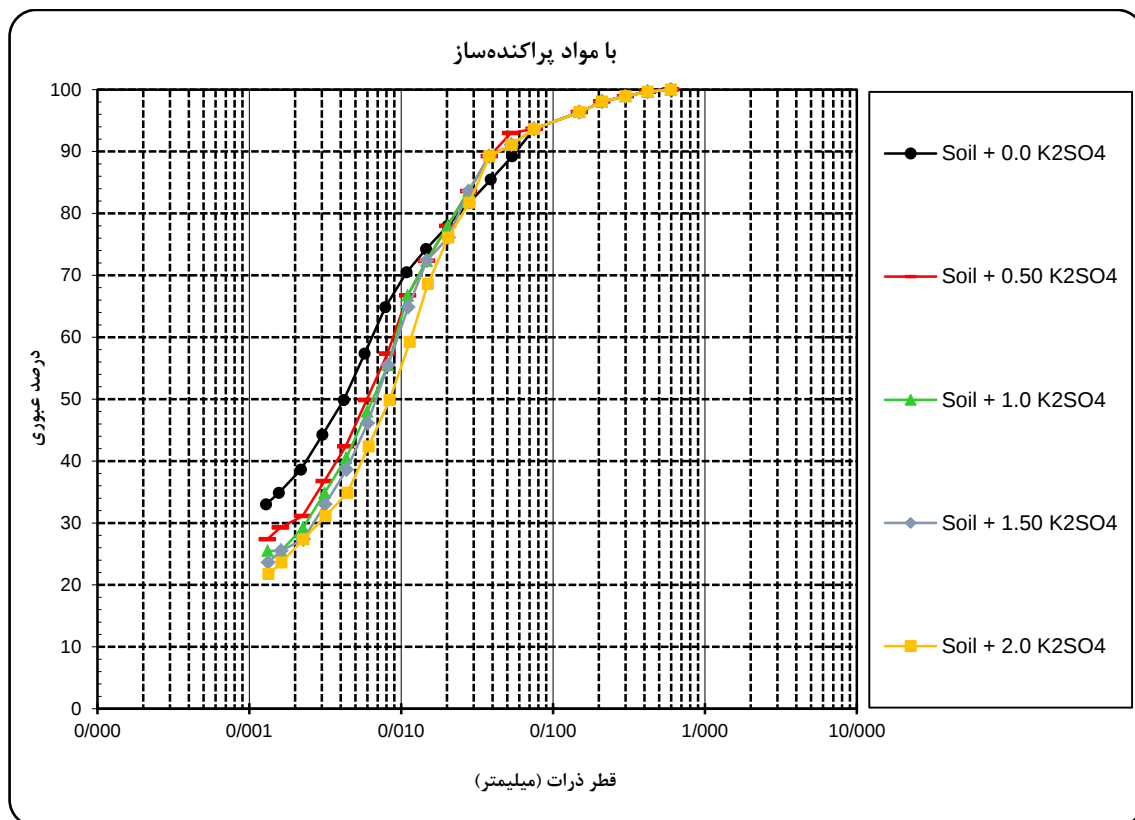


مقدار واگرایی ۱۰/۴۷ درصد

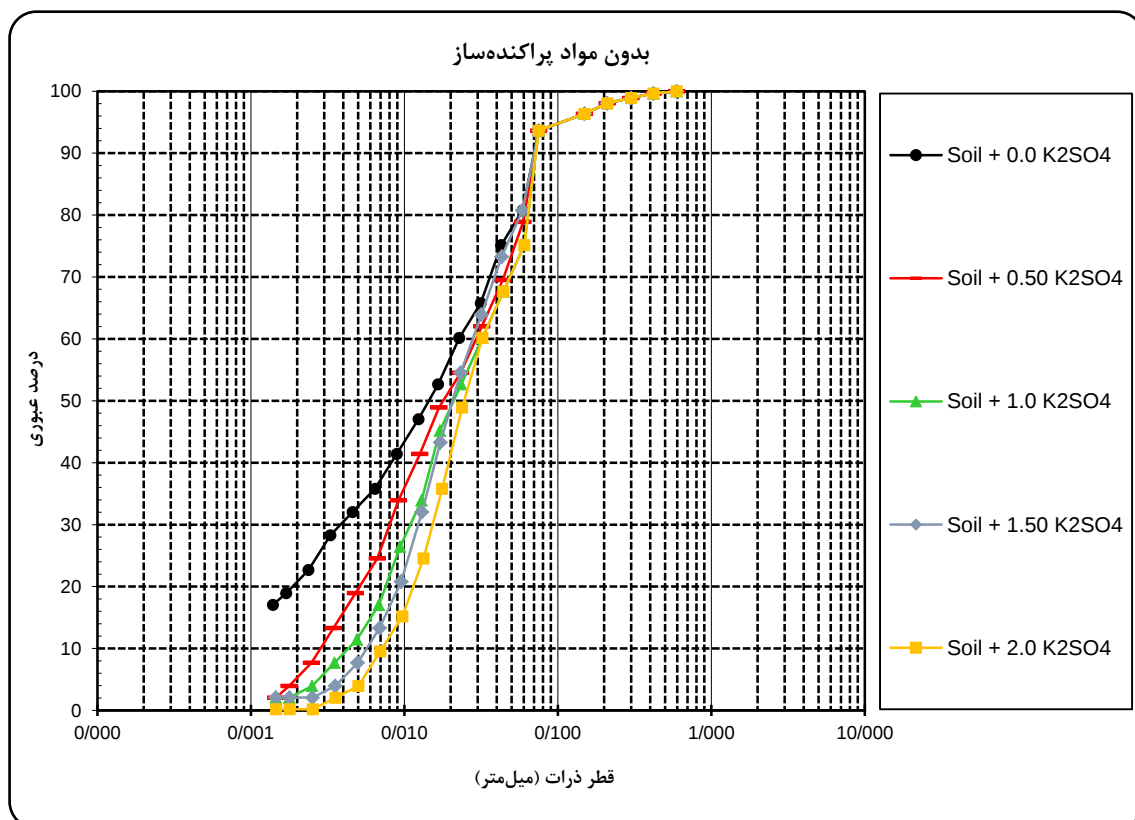
$$F_{(0.005)1} \approx 37.43 \%$$

$$F_{(0.005)2} \approx 3.92 \%$$

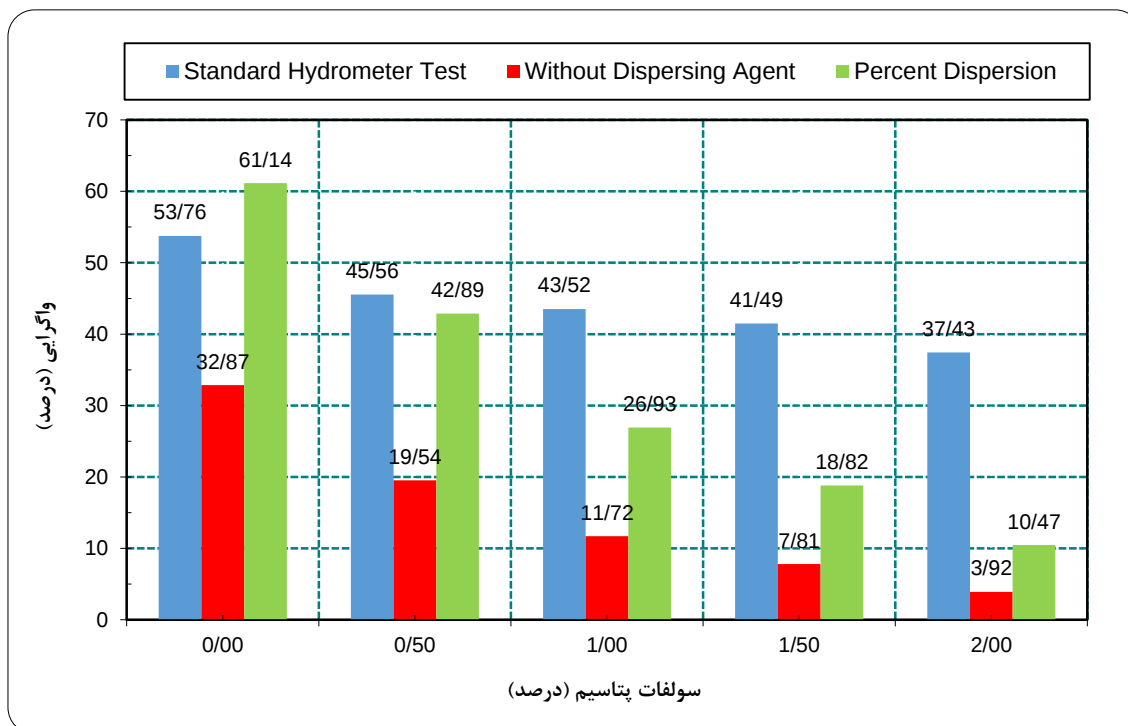
شکل ۵-۰ نتایج آزمایش هیدرومتری مضاعف با افزودن ۲ درصد سولفات پتاسیم به خاک پایه



شکل ۶-۰ نتایج آزمایش هیدرومتری به روش استاندارد با درصدهای مختلف سولفات پتاسیم



شکل ۷-۰ نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه با درصدهای مختلف سولفات پتاسیم



شکل ۸-۰ نمودار نتایج آزمایش هیدرومتری مضاعف با درصدهای مختلف سولفات پتاسیم

۳-۳-۱- تأثیر سولفات پتاسیم بر روی نتایج آزمایش هیدرومتری مضاعف

همانطور که از نمودار شکل ۸-۴ مشخص شده است، روند تغییرات واگرایی با افزایش سولفات پتاسیم نسبت به نمونه پایه کاهش یافته است. به عبارت دیگر سولفات پتاسیم توانسته به طور قابل ملاحظه‌ای واگرایی خاک را کاهش دهد.

براساس معیار شرارد با افزایش سولفات پتاسیم تا ۰/۵۰ درصد، واگرایی کاهش یافته اما همچنان نمونه در رده خاک‌های واگرا قرار گرفته است. با افزایش سولفات پتاسیم تا ۱/۵۰ درصد نمونه در رده واگرایی متوسط قرار گرفته و با افزایش سولفات پتاسیم تا ۲ درصد واگرایی خاک کلاً از بین رفته است. با توجه به اینکه پارامتر مکانیکی خاک‌های رسی، تابعی از نحوه قرارگرفتن ذرات در کنار یکدیگر می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش سولفات پتاسیم، چسبندگی ذرات به یکدیگر بیشتر شده و ساختار خاک از حالت پراکنده به مجتمع تبدیل شده است. که این امر باعث سرعت ته‌نشینی بیشتر نمونه‌ها شده و در آخر ما شاهد کاهش و از بین رفتن پتانسیل واگرایی خاک هستیم.

۴-۳-۴- نتایج آزمایش شیمیایی خاک

از آنجایی که واگرایی خاک‌های رسی پدیده‌ای شیمیایی و فیزیکی می‌باشد و خصوصیات شیمیایی خاک به خصوص میزان کاتیون‌ها و نوع آن و مقدار آب منفذی ایجاد شده در اطراف نمونه در ایجاد پدیده واگرایی نقش موثر دارند، محققین مختلف سعی نموده‌اند معیارهایی برای تشخیص پتانسیل واگرایی بر این اساس ارائه نمایند. که با توجه به اختلاط خاک با درصدهای مختلف سولفات پتاسیم واگرایی خاک بر اساس معیار شرارد بررسی شده است.

جدول ۱-۰ میزان عناصر موجود در ترکیبات شیمیایی خاک با درصدهای مختلف سولفات پتاسیم

Sample	K ₂ SO ₄ %	S.P	Ca meq/l	Mg meq/l	Na meq/l	K meq/l	SAR	TDS meq/l	Ps %
۱	۰/۰	۶۷/۵۰	۳۱/۸۰	۲۹/۴۰	۸۳/۴۰	۰/۳۵	۱۵/۰۸	۱۴۴/۹۵	۵۷/۵۴
۲	۰/۵۰	۶۵/۹۰	۳۶/۶۰	۴۷/۲۰	۸۶/۰۰	۲۸/۱۰	۱۲/۲۹	۱۹۷/۸۰	۴۳/۴۸
۳	۱/۰	۶۴/۱۰	۴۲/۰۰	۸۱/۱۰	۹۲/۵۰	۵۳/۴۰	۱۱/۷۹	۲۶۹/۰۰	۳۴/۳۹
۴	۱/۵۰	۶۲/۸۰	۵۰/۸۰	۱۱۱/۰	۹۷/۰۰	۷۶/۳۰	۱۰/۷۸	۳۳۵/۱۰	۲۸/۹۵
۵	۲/۰	۶۰/۶۵	۶۳/۰۰	۱۴۶/۰	۱۰۰/۵۰	۱۱۸/۶۰	۹/۸۳	۴۲۸/۱۰	۲۳/۴۸

Sample	K ₂ SO ₄ %	S.P	Ca ppm	Mg ppm	Na ppm	K ppm	T.D.S ppm
۱	۰/۰	۶۷/۵۰	۴۳۰/۱۶	۲۴۱/۱۲	۱۲۹۴/۲۲	۹/۲۴	۱۹۷۴/۷۴
۲	۰/۵۰	۶۵/۹۰	۴۸۲/۰۳	۳۷۷/۹۲	۱۳۰۲/۹۴	۷۲۴/۰۵	۲۸۸۶/۹۴
۳	۱/۰	۶۴/۱۰	۵۳۹/۵۲	۶۳۱/۶۲	۱۳۶۳/۱۳	۱۳۳۸/۳۷	۳۸۷۲/۶۴
۴	۱/۵۰	۶۲/۸۰	۶۳۹/۳۲	۸۴۶/۹۵	۱۴۰۰/۴۶	۱۸۷۳/۵۳	۴۷۶۰/۲۶
۵	۲/۰	۶۰/۶۵	۷۶۵/۷۲	۱۰۷۵/۸۷	۱۴۰۱/۳۲	۲۸۱۲/۵۰	۶۰۵۵/۴۱

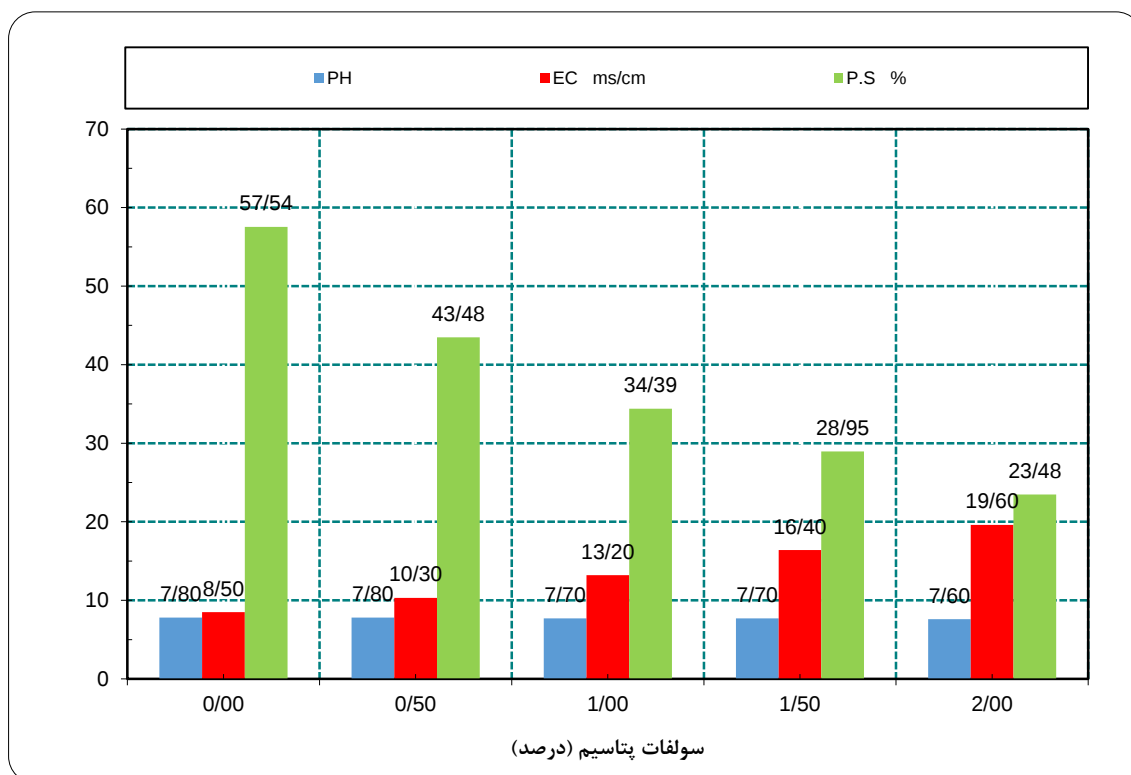
جدول ۲-۰ میزان میزان تغییرات PH و EC خاک با درصدهای مختلف سولفات پتاسیم

Sample	K ₂ SO ₄ %	PH	EC ms/cm
۱	۰/۰	۷/۸۰	۸/۵۰
۲	۰/۵۰	۷/۸۰	۱۰/۳۰
۳	۱/۰	۷/۷۰	۱۳/۲۰
۴	۱/۵۰	۷/۷۰	۱۶/۴۰
۵	۲/۰	۷/۶۰	۱۹/۶۰

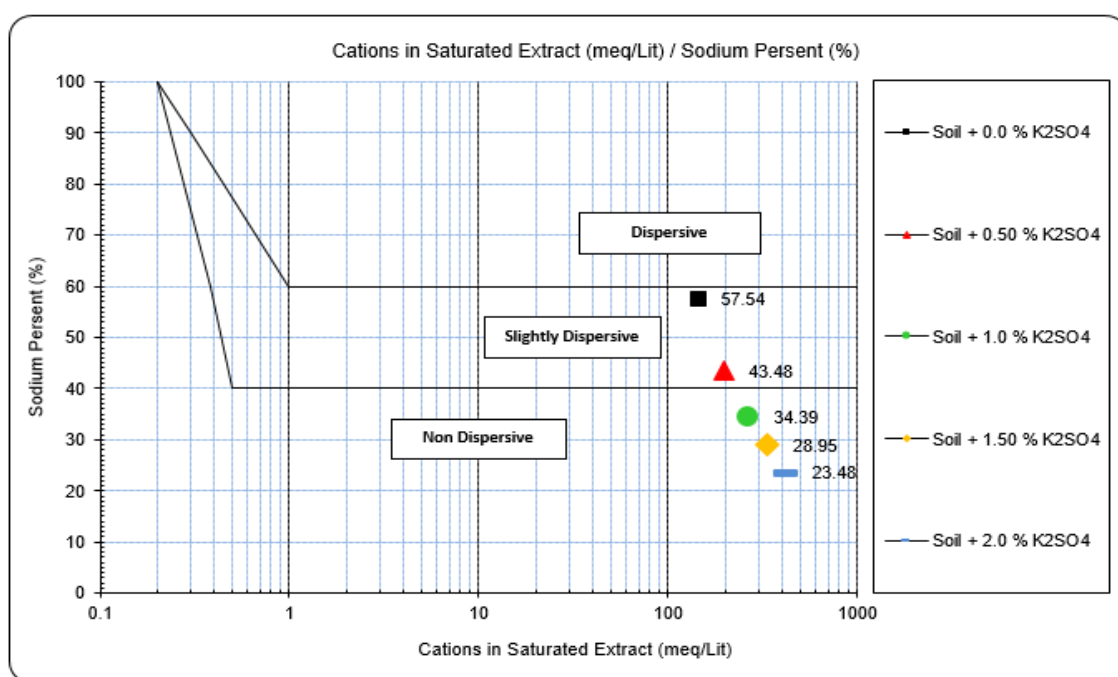
طبق نتایج آزمایش‌های شیمیایی خاک می‌توان مشاهده کرد که با اضافه کردن سولفات پتاسیم به خاک، مقدار ^۱PH به مقدار خیلی کم کاهش پیدا کرده و میزان هدایت الکتریکی ^۲افزایش پیدا کرده است.

^۱ PH (Power Hydrogene)

^۲ EC (Electrical Conductivity)



شکل ۹-۰ نمودار نتایج PH ، EC و درصد واگرایی نمونه با مقادیر مختلف مواد افزودنی



شکل ۱۰-۰ نمودار ارزیابی میزان واگرایی براساس معیار شرارد

۴-۳-۱- تأثیر سولفات پتاسیم بر نتایج شیمیایی خاک

پتانسیل واگرایی خاک با افزودن سولفات پتاسیم بر اساس نمودار پیشنهادی شرارد، کاهش پیدا کرده، و در درصدهای ۱، ۱/۵۰ و ۲ نمونه خاک کاملاً غیرواگرا شده است. با افزایش سولفات پتاسیم، هدایت الکتریکی خاک افزایش پیدا کرده و در نتیجه ذرات با بار منفی در خاک بیشتر شده (ذرات ارگانیک و رسی) است. در نتیجه کاتیون‌های موجود در خاک که دارای بار مثبت بوده افزایش پیدا کرده است.

با افزایش سولفات پتاسیم، یون سدیم افزایش پیدا کرده که این امر ناشی از ترکیب یون سولفات با یون سدیم موجود در فاز تبادلی خاک بوده که وارد فاز محلول شده است و سدیم موجود در فاز محلول افزایش پیدا کرده، ولی به دلیل کم شدن سدیم در فاز تبادلی، واگرایی خاک علیرغم افزایش سدیم، کاهش پیدا کرده است. بنابراین کاتیون‌های دو ظرفیتی موجود در خاک جایگزین کاتیون‌های تک ظرفیتی شده، ساختار خاک دچار تغییر شده، نیروهای جاذبه افزایش یافته و پتانسیل واگرایی نمونه‌ها کاهش پیدا کرده است.

۴-۳-۵- نتایج آزمایش پین‌هول

آزمایش پین‌هول مطابق استاندارد ASTM D4647 بر روی نمونه‌های ریمولد شده با رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر با اضافه کردن ۰/۰، ۰/۵۰، ۱، ۱/۵۰ و ۲ درصد سولفات پتاسیم به خاک با استفاده از روش‌های A و C مورد ارزیابی قرار گرفته است. که در آن مواردی چون هد جریان، نرخ جریان خروجی، میزان شفافیت آب‌خروجی و قطر سوراخ در انتهای آزمایش بررسی شده است. لازم بذکر است که آزمایش به روش C مشابه روش A می‌باشد، اما معیارهای رده‌بندی واگرایی آن متفاوت می‌باشد.

در ابتدا نمونه خاک طبیعی به روش ASTM D698 ریمولد شده و در درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر نمونه‌گیری و مورد آزمایش پین‌هول قرار گرفته است.

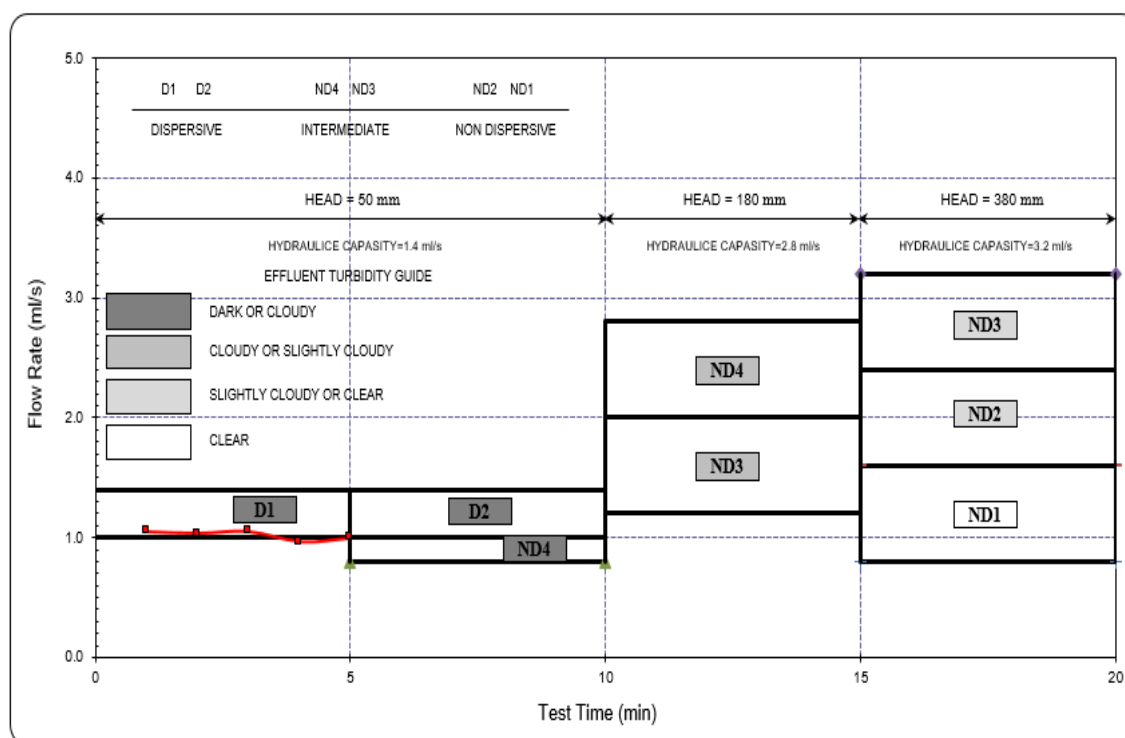
پس از انجام آزمایش پین‌هول، نمونه خاک در رده خاک‌های واگرا D1 قرار گرفته است و در ادامه برای تأثیر سولفات پتاسیم بر روی خاک پایه، آزمایش پین‌هول را در حالت ریمولد شده با اضافه کردن ۰/۵۰ ، ۱ ، ۱/۵۰ و ۲ درصد سولفات پتاسیم به خاک انجام و پتانسیل واگرایی نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است.

جدول ۰-۳ نتایج آزمایش پین‌هول خاک دست‌خورده محل

مدت آزمایش (دقیقه)	هد (mm)	جریان		نرخ جریان (mm/s)	تیرگی آب در انتهای آزمایش		قطر نهایی سوراخ (mm)	رده بندی واگرایی
		میلی متر	ثانیه		از کنار	از بالا		
۵	۵۰	۶۵	۶۰	۱/۰۸	کدر	تیره	>۲	D1
	۵۰	۶۶	۶۰	۱/۱۰				
	۵۰	۶۱	۶۰	۱/۰۲				
	۵۰	۶۰	۶۰	۱/۰۰				
	۵۰	۶۳	۶۰	۱/۰۵				

جدول ۴-۰ نتایج آزمایش پین هول خاک ریمولد شده محل با زمان عمل آوری ۷ روزه

مدت آزمایش (دقیقه)	هد (mm)	جریان		نرخ جریان (mm/s)	تیرگی آب در انتهای آزمایش		قطر نهایی سوراخ (mm)	رده بندی واگرایی
		میلی متر	ثانیه		از کنار	از بالا		
۵	۵۰	۶۳	۶۰	۱/۰۵	کدر	کدر	۲	D1
	۵۰	۶۲	۶۰	۱/۰۳				
	۵۰	۶۳	۶۰	۱/۰۵				
	۵۰	۵۸	۶۰	۰/۹۷				
	۵۰	۶۰	۶۰	۱/۰۰				



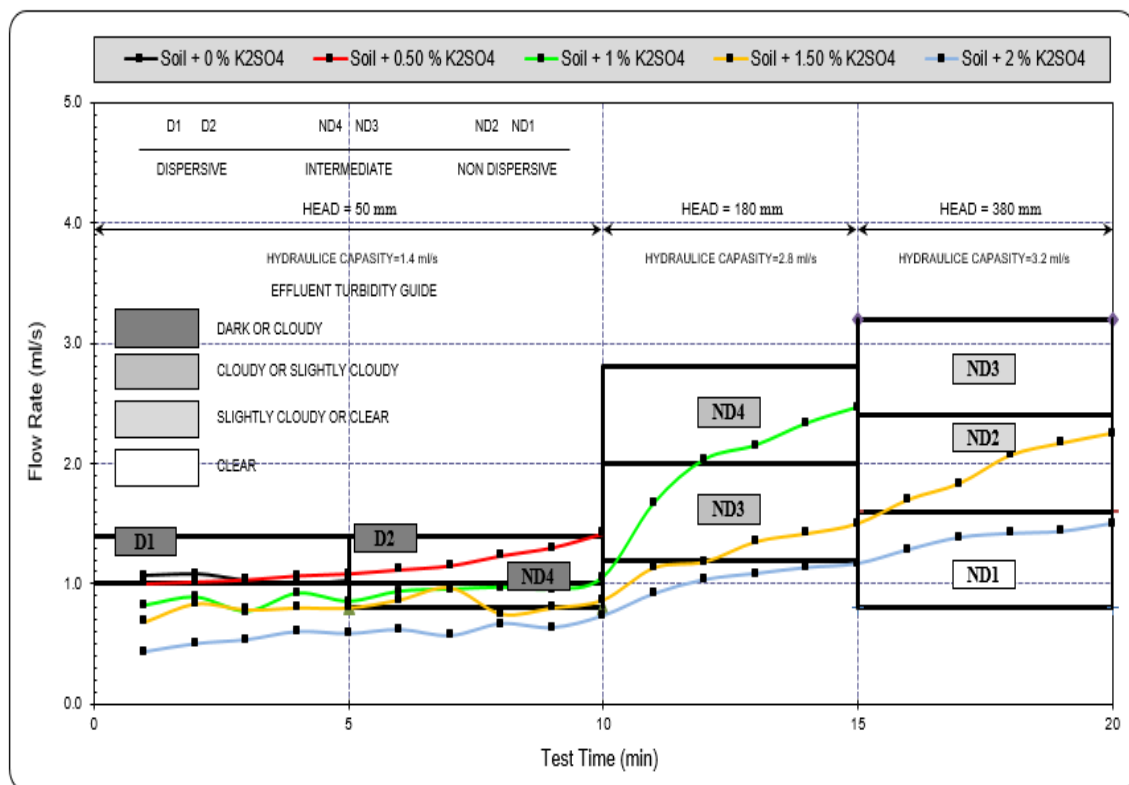
شکل ۱۱-۰ نمودار آزمایش پین هول خاک ریمولد شده محل با زمان عمل آوری ۷ روزه

جدول ۵-۰ نتایج آزمایش پین هول با درصدهای مختلف مواد افزودنی با زمان عمل آوری ۱ روزه

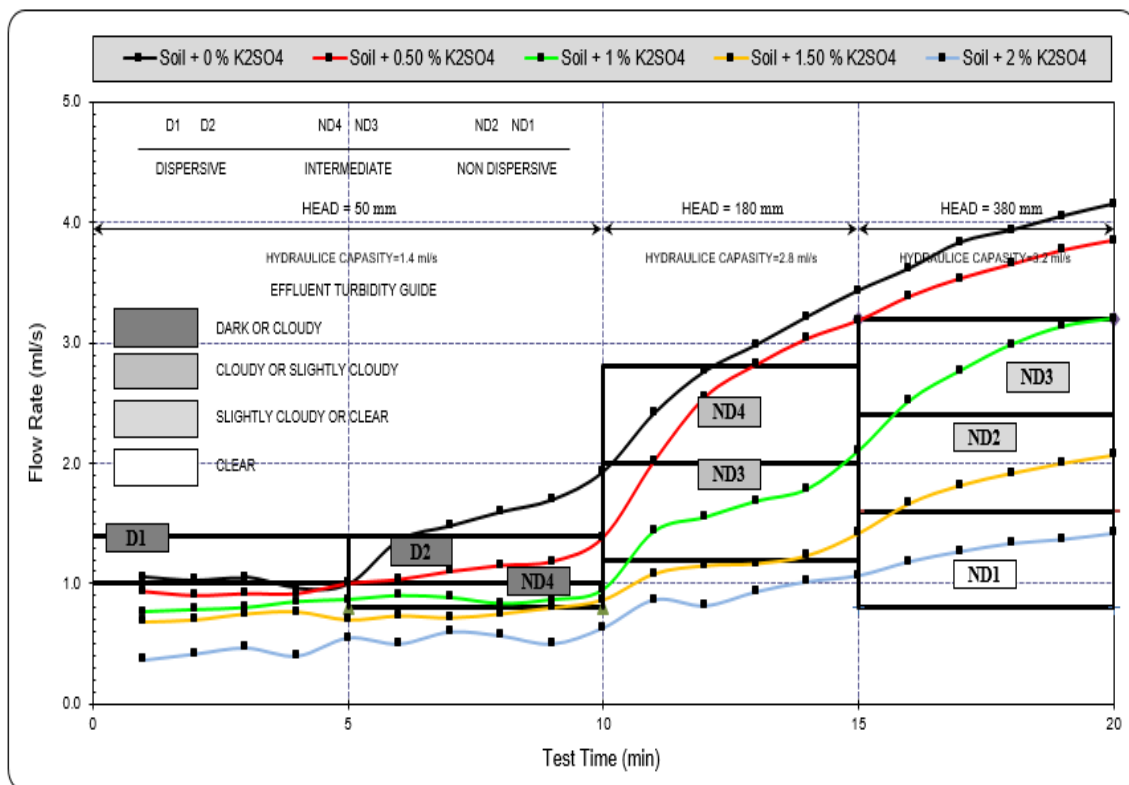
درصد اختلاط سولفات پتاسیم با خاک	مدت آزمایش (دقیقه)	هد (mm)	نرخ جریان (mm/s)	تیرگی آب در انتهای آزمایش	قطر نهایی سوراخ (mm)	رده بندی واگرایی
۰/۵۰	۵	۵۰	۱/۰۰ - ۱/۰۸	تیره	۲	D2
	۵ - ۱۰	۵۰	۱/۱۲ - ۱/۴۲			
۱/۰	۵	۵۰	۰/۷۷ - ۰/۹۲	کدر	۱/۵۰	ND4
	۵ - ۱۰	۵۰	۰/۹۳ - ۱/۰۵			
	۱۰ - ۱۵	۱۸۰	۱/۶۷ - ۲/۴۷			
۱/۵۰	۵	۵۰	۰/۶۸ - ۰/۸۳	نسبتاً کدر	۱	ND2
	۵ - ۱۰	۵۰	۰/۷۵ - ۰/۹۷			
	۱۰ - ۱۵	۱۸۰	۱/۱۳ - ۱/۵۰			
	۱۵ - ۲۰	۳۸۰	۱/۷۰ - ۲/۲۵			
۲/۰	۵	۵۰	۰/۴۳ - ۰/۶۰	شفاف	۱	ND1
	۵ - ۱۰	۵۰	۰/۵۷ - ۰/۷۳			
	۱۰ - ۱۵	۱۸۰	۰/۹۲ - ۱/۱۷			
	۱۵ - ۲۰	۳۸۰	۱/۲۸ - ۱/۵۰			

جدول ۶-۰ نتایج آزمایش پین هول با درصدهای مختلف مواد افزودنی با زمان عمل آوری ۷ روزه

درصد اختلاط سولفات پتاسیم با خاک	مدت آزمایش (دقیقه)	هد (mm)	نرخ جریان (mm/s)	تیرگی آب در انتهای آزمایش	قطر نهایی سوراخ (mm)	رده بندی واگرایی
۰/۵۰	۵	۵۰	۰/۹۰ - ۱/۰۰	تیره	۲	D2
	۵ - ۱۰	۵۰	۱/۰۳ - ۱/۳۸			
۱/۰	۵	۵۰	۰/۷۷ - ۰/۸۷	نسبتاً کدر	۱/۵۰	ND3
	۵ - ۱۰	۵۰	۰/۸۳ - ۰/۹۵			
	۱۰ - ۱۵	۱۸۰	۱/۴۳ - ۲/۱۰			
۱/۵۰	۵	۵۰	۰/۶۸ - ۰/۷۷	نسبتاً کدر	۱	ND2
	۵ - ۱۰	۵۰	۰/۷۲ - ۰/۸۷			
	۱۰ - ۱۵	۱۸۰	۱/۰۸ - ۱/۴۲			
	۱۵ - ۲۰	۳۸۰	۱/۶۷ - ۲/۰۷			
۲/۰	۵	۵۰	۰/۳۷ - ۰/۵۵	شفاف	۱	ND1
	۵ - ۱۰	۵۰	۰/۵۰ - ۰/۶۳			
	۱۰ - ۱۵	۱۸۰	۰/۸۲ - ۱/۰۷			
	۱۵ - ۲۰	۳۸۰	۱/۱۸ - ۱/۴۲			



شکل ۱۲-۰ نمودار آزمایش پین هول خاک ریمولد شده با درصدهای مختلف سولفات پتاسیم در زمان عمل آوری ۱ روزه



شکل ۱۳-۰ نمودار آزمایش پین هول خاک ریمولد شده با درصدهای مختلف سولفات پتاسیم در زمان عمل آوری ۷ روزه



خاک ریمولد شده محل



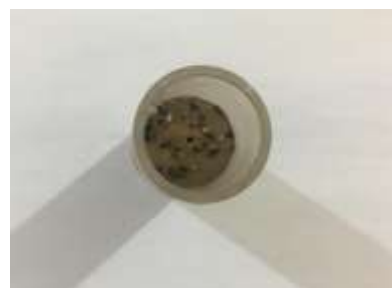
خاک ریمولد شده با ۰/۵۰ درصد سولفات پتاسیم



خاک ریمولد شده با ۱ درصد سولفات پتاسیم

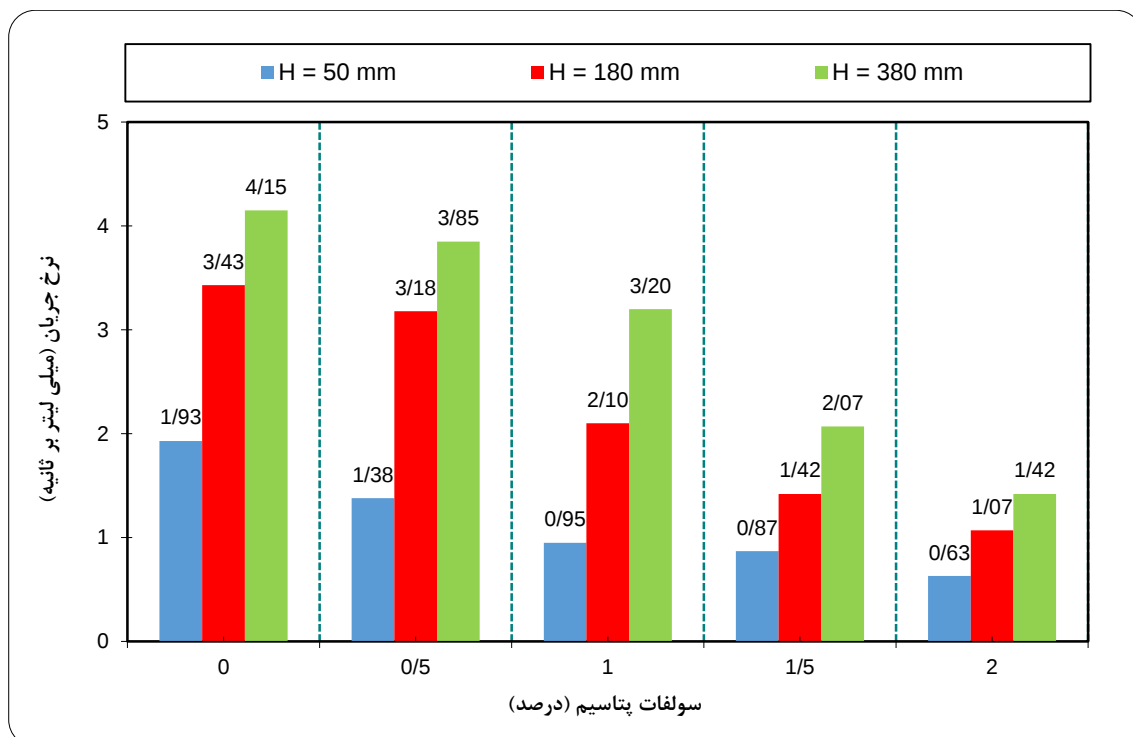


خاک ریمولد شده با ۱/۵۰ درصد سولفات پتاسیم



خاک ریمولد شده با ۲ درصد سولفات پتاسیم

شکل ۰-۱۴ قطر سوراخ و رنگ آب خروجی در پایان آزمایش پین هول با درصدهای مختلف سولفات پتاسیم



شکل ۰-۱۵ نمودار نرخ جریان با هدهای مختلف در آزمایش پین هول با درصدهای مختلف K_2SO_4 برای زمان عمل آوری ۷ روزه

۴-۳-۵-۱- تأثیر سولفات پتاسیم بر نتایج آزمایش پین هول

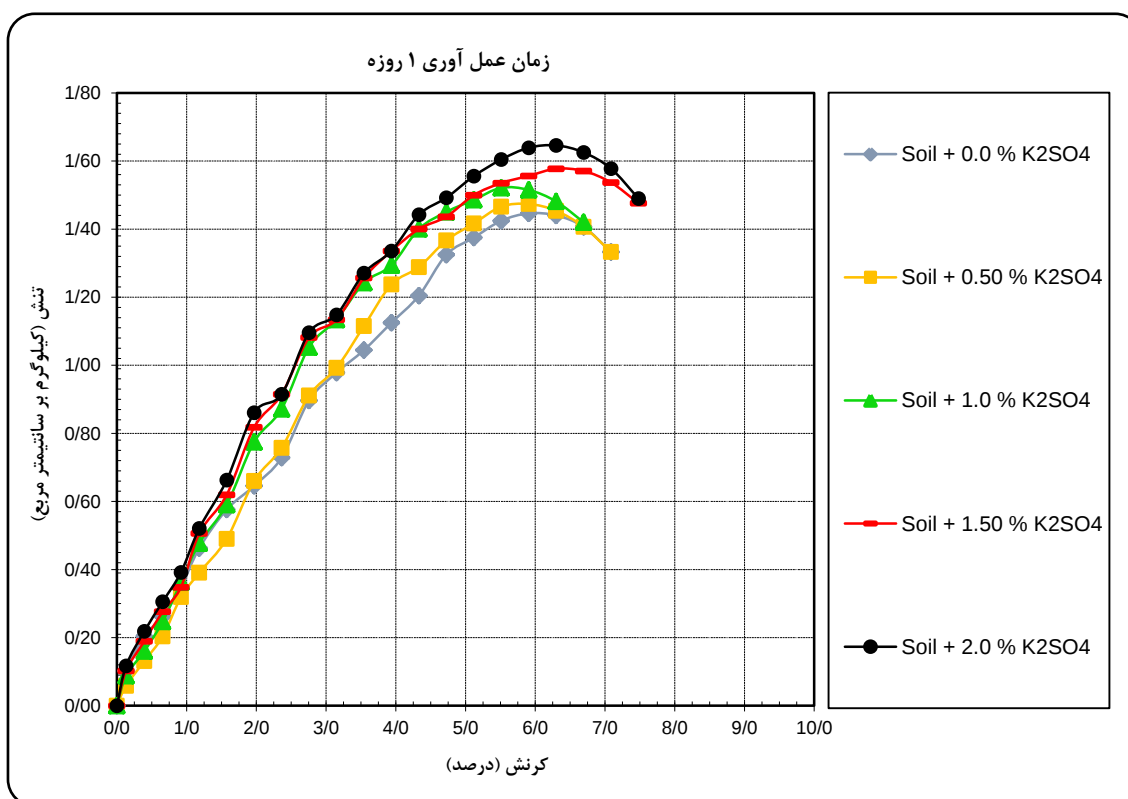
با افزایش سولفات پتاسیم به خاک، پتانسیل واگرایی نمونه‌ها کاهش یافته است. بطوریکه با افزایش سولفات پتاسیم، واگرایی خاک از رده D1 (واگرا) به رده ND1 (غیرواگرا) تغییر کرده است. در زمان عمل آوری ۷ روزه با افزایش سولفات پتاسیم تا ۱ درصد خاک در رده خاک‌های نیمه‌واگرا قرار گرفته و با افزایش سولفات پتاسیم تا ۱/۵۰ و ۲ درصد خاک کلاً غیرواگرا شده است.

نرخ جریان خروجی به شدت کاهش یافته بطوریکه برای هد ۵۰ در زمان عمل آوری ۷ روزه مقدار آن از ۱/۹۳ میلی متر بر ثانیه به ۰/۶۳ میلیمتر بر ثانیه کاهش پیدا کرده است. همچنین رنگ آب خروجی از تیره به شفاف تغییر کرده و قطر سوراخ در انتهای آزمون از ۲ میلی متر به ۱ میلی متر کاهش پیدا کرده است. لازم بذکر است که زمان عمل آوری سولفات پتاسیم بر خلاف سایر مواد افزودنی تأثیر چندانی بر روی نتایج آزمایش نداشته است.

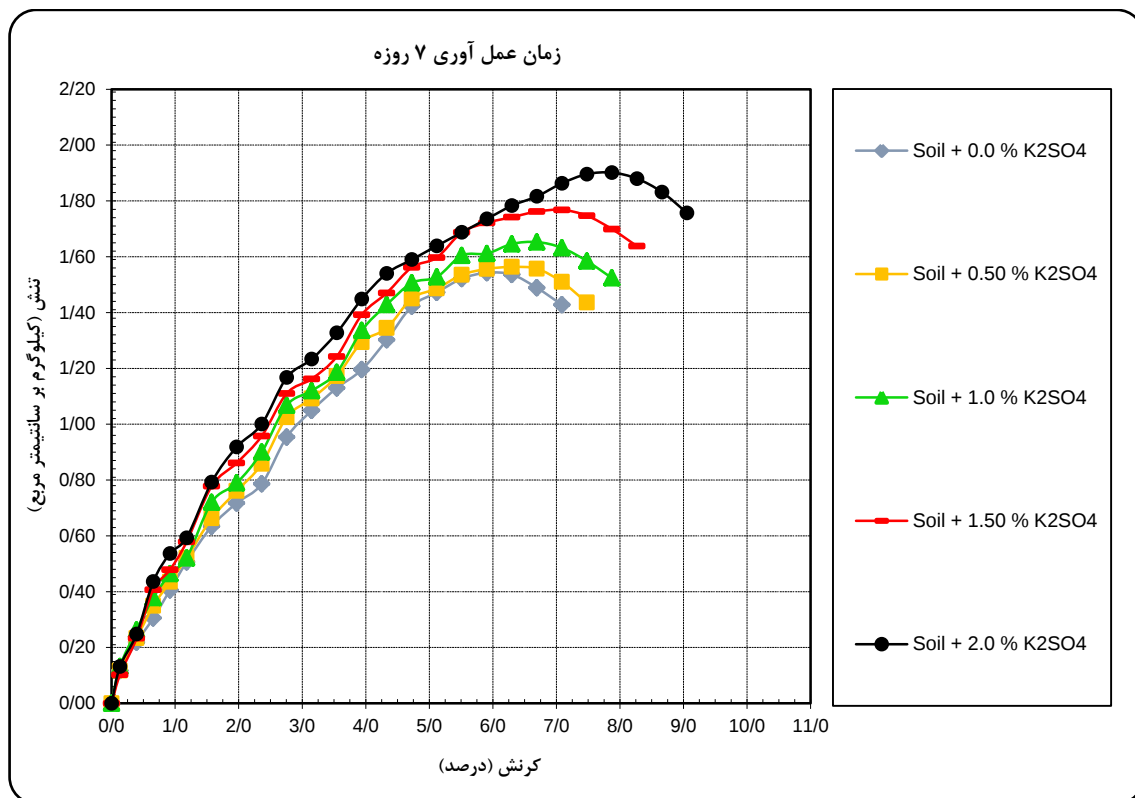
۴-۳-۶- نتایج آزمایش تک محوری

آزمایش تک محوری بر روی نمونه‌های ریمولد شده با درصدهای مختلف سولفات پتاسیم در زمان‌های عمل آوری ۱، ۷ و ۲۸ روزه انجام شده و نتایج به اختصار در نمودارهای زیر آورده شده است. روش انجام آزمون به این صورت می‌باشد که ابعاد و وزن نمونه اندازه‌گیری و ثبت شده و نمونه در صفحه پایینی دستگاه تک محوری قرار داده می‌شود و برای اطمینان از قرار گرفتن صفحه بالایی دستگاه تک محوری بر روی خاک، می‌توان نمونه را پیش بارگذاری کرده بطوریکه به محض تغییرات گنج تغییر مکان، پیش بارگذاری را متوقف، گنج‌ها را تصحیح و روی صفر تنظیم می‌نماییم.

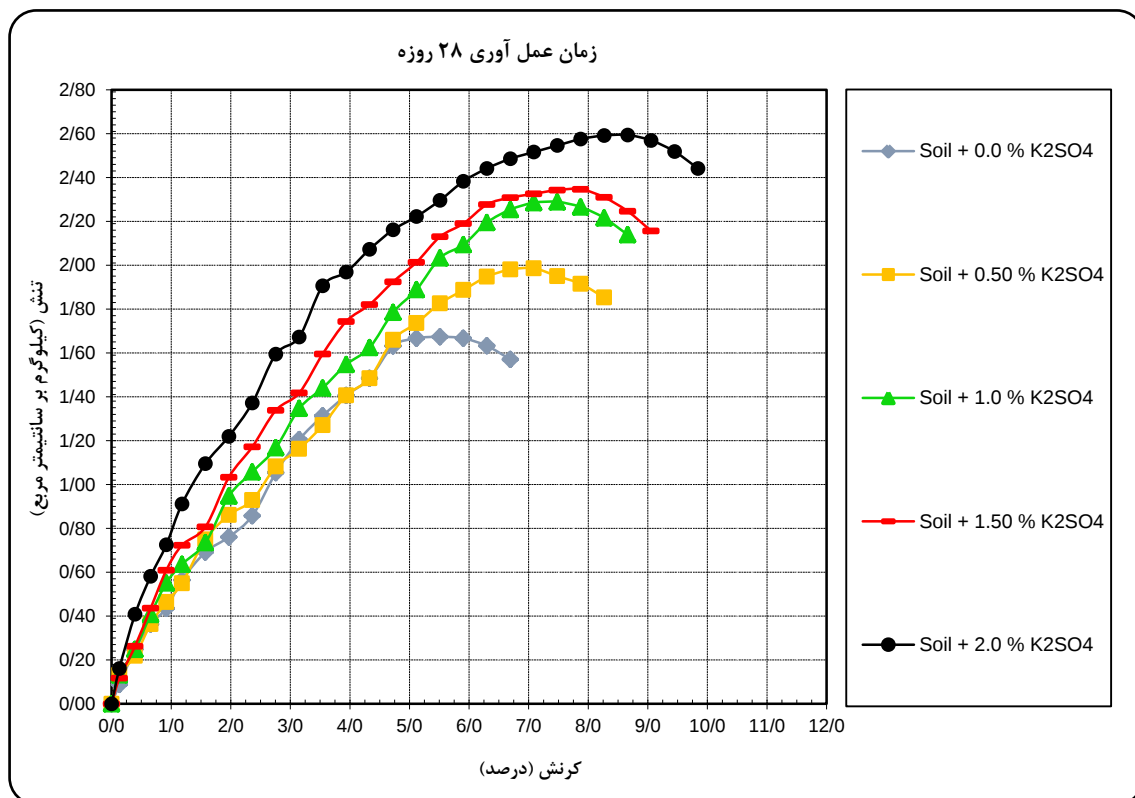
با تنظیم کردن گنج اندازه‌گیری بار و تغییر مکان روی صفر، بارگذاری با نرخ کرنش ۰/۵۰ تا ۲ درصد در دقیقه اعمال می‌شود. قرائت‌های بارگذاری را در کرنش‌های مختلف اندازه‌گیری کرده و فشاری اعمالی تا ایجاد ترک در نمونه ادامه پیدا می‌کند.



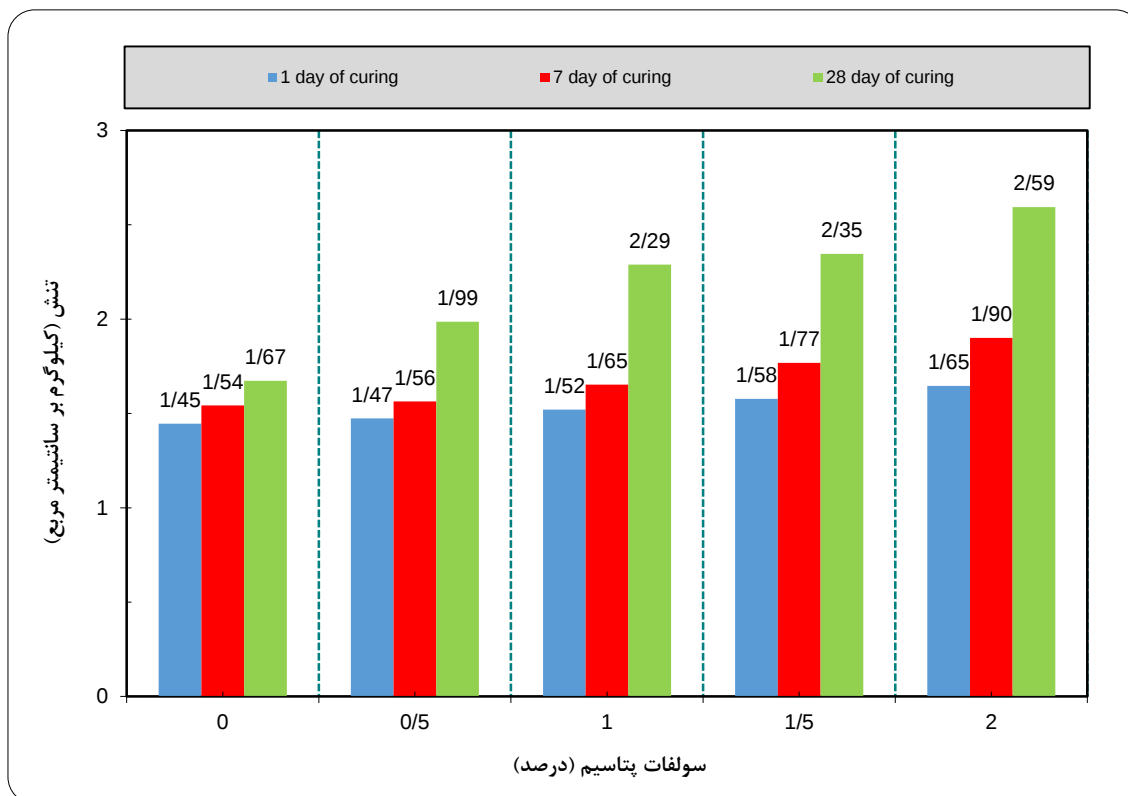
شکل ۱۶-۰ نتایج آزمایش تک محوری با درصدهای مختلف سولفات پتاسیم در زمان عمل آوری ۱ روزه



شکل ۱۷-۰ نتایج آزمایش تک محوری با درصدهای مختلف سولفات پتاسیم در زمان عمل آوری ۷ روزه



شکل ۱۸-۰ نتایج آزمایش تک محوری با درصدهای مختلف سولفات پتاسیم در زمان عمل آوری ۲۸ روزه



شکل ۱۹-۰ نمودار نتایج آزمایش‌های تک محوری با درصدهای سولفات پتاسیم در زمان‌های عمل آوری ۰.۱ و ۲۸ روزه

۴-۳-۶-۱- تأثیر سولفات پتاسیم بر نتایج آزمایش تک محوری

با افزایش سولفات پتاسیم به خاک، مقاومت فشاری محصور نشده^۱ نمونه‌ها به تدریج افزایش پیدا کرده بطوریکه با افزایش K_2SO_4 مقاومت فشاری خاک در زمان عمل آوری ۲۸ روزه از ۱/۶۷ به ۲/۵۹ کیلوگرم بر سانتیمترمربع تغییر کرده و مقدار آن حدود ۵۵ درصد افزایش یافته است.

همانطور که مشاهده می‌شود مقدار تغییرات مقاومت تک محوری در سن ۷ روز، کم و نزدیک به مقاومت نمونه‌ها در زمان عمل آوری ۱ روز می‌باشد. اما تغییرات مقاومت در سن ۲۸ روز با افزایش سولفات پتاسیم، افزایش چشمگیری داشته است. لازم بذکر است که با اضافه کردن سولفات پتاسیم به خاک بر خلاف سایر مواد افزودنی، کرنش محوری خاک افزایش پیدا کرده و این مانع از ترک خوردگی

¹ Unconfined Compressive Strength

سریع ساختار خاک در بارگذاری‌ها می‌شود.

۷-۳-۴- نتایج آزمایش تورم آزاد یا بالازدگی

استفاده از خاک‌های متورم در کارهای عمرانی بویژه سازه‌های خاکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش پتانسیل تورم آزاد^۱ نمونه‌ها بررسی شده است که نتیجه آن، عدم تورم خاک‌های اختلاط شده با سولفات پتاسیم می‌باشد.

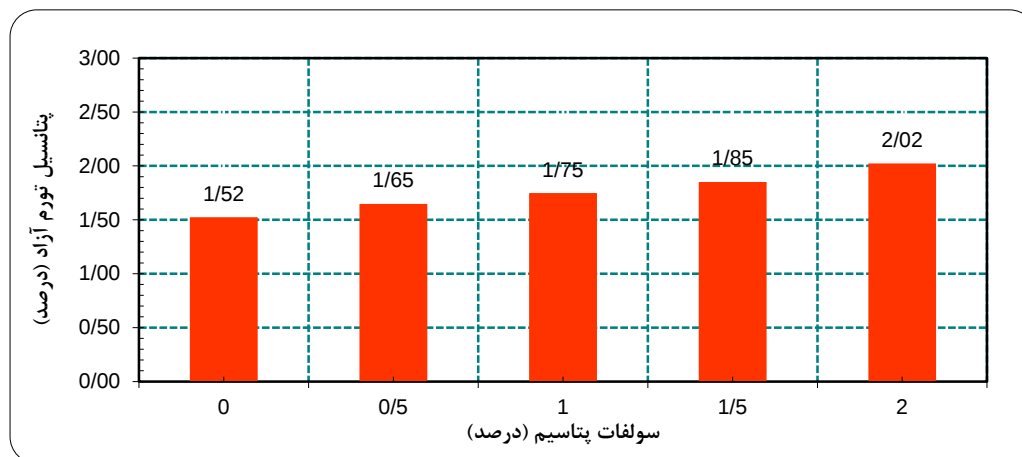
جدول ۷-۰ نتایج آزمایش تورم آزاد با درصد‌های مختلف سولفات پتاسیم در زمان عمل آوری ۱ روزه

Sample	K ₂ SO ₄ (%)	γ_d (gr/cm ³)	ΔH	e _o	e _{se}	S _{W(free)} (%)
۱	۰/۰	۱/۵۵	۰/۳۰۵	۰/۷۰۷	۰/۷۳۳	۱/۵۲۴
۲	۰/۵۰	۱/۵۵	۰/۳۳۰	۰/۷۱۳	۰/۷۴۱	۱/۶۴۸
۳	۱/۰	۱/۵۴	۰/۳۵۰	۰/۷۱۹	۰/۷۴۹	۱/۷۴۸
۴	۱/۵۰	۱/۵۳	۰/۳۷۰	۰/۷۲۴	۰/۷۵۶	۱/۸۵۱
۵	۲/۰	۱/۵۳	۰/۴۰۵	۰/۷۳۱	۰/۷۶۶	۲/۰۲۳

جدول ۸-۰ معیار اداره آبادانی زمین ایالات متحده آمریکا برای طبقه بندی پتانسیل تورم [۵۲]

پتانسیل تورم محتمل	درجه تورم
بیشتر از ۳۰	بسیار زیاد
۲۰ - ۳۰	زیاد
۱۰ - ۲۰	متوسط
کمتر از ۱۰	کم

¹ Unrestrained Swell

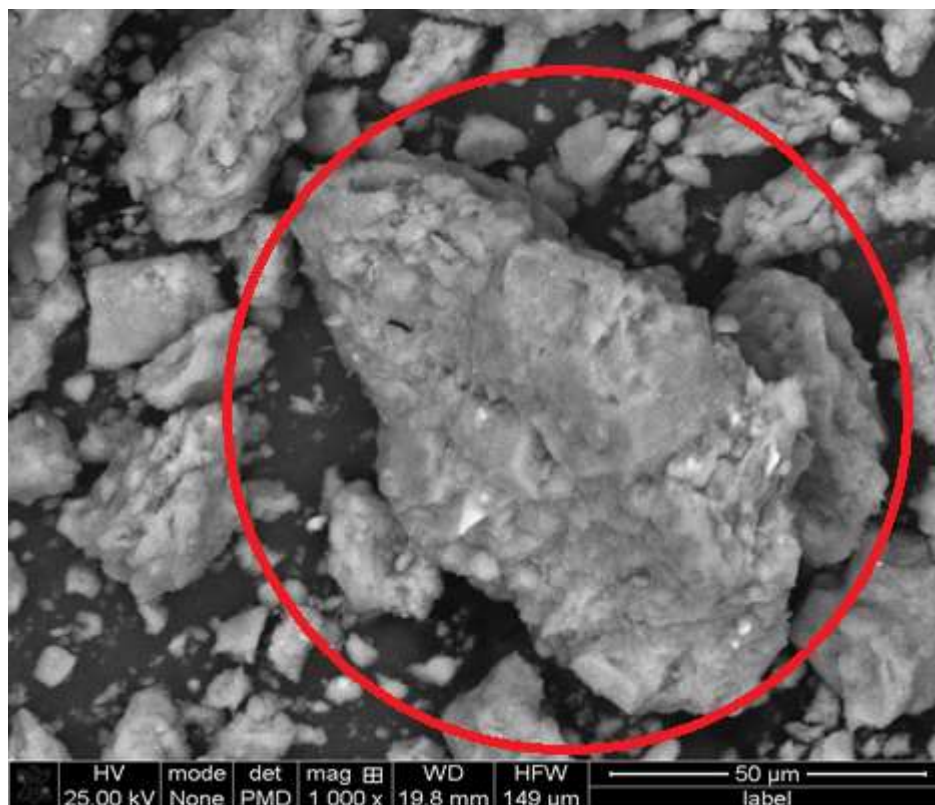


شکل ۲۰-۰ نتایج آزمایش‌های تورم آزاد با درصدهای سولفات پتاسیم در زمان عمل آوری ۱ روزه

۴-۳-۸- نتایج عکسبرداری میکروسکوپ الکترونی SEM

در این مطالعه سعی شده است با تصویربرداری ^۱SEM، علل نتایج به دست آمده در این مطالعه با جزئیات بیشتری مورد بررسی قرار گیرد. به این منظور و در راستای تکمیل نتایج بدست آمده، تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی جهت بررسی ریزساختار خاک و بررسی علت تغییر پارامترهای مقاومتی بر روی اختلاط خاک با ۲ درصد سولفات پتاسیم توسط شرکت بینالود انجام شده است.

^۱ SEM (Scanning Electron Microscope)



شکل ۰-۲۱ عکس SEM از خاک مورد پژوهش با ۲ درصد سولفات پتاسیم

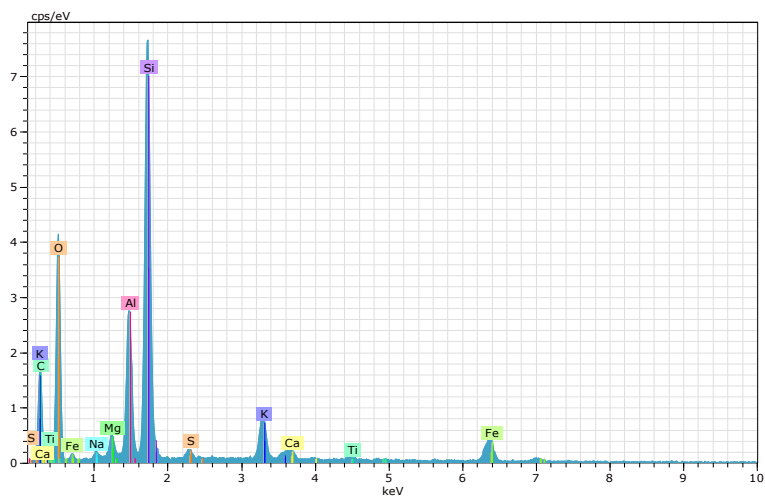
بر اساس تصویر SEM در نمونه خاک رس واگرا بعد از اضافه کردن ۲ درصد سولفات پتاسیم به خاک ما شاهد هستیم که ساختار خاک تغییر کرده و واکنش شیمیایی بین دانه‌های خاک، باعث بوجود آمدن بافت‌های پیوسته بین ذرات شده و خاک حالت کلوخه‌ای و مجتمع شدن پیدا کرده و مقاومت خاک به تناسب افزایش پیدا کرده است.

۴-۳-۹- نتایج آنالیز EDX

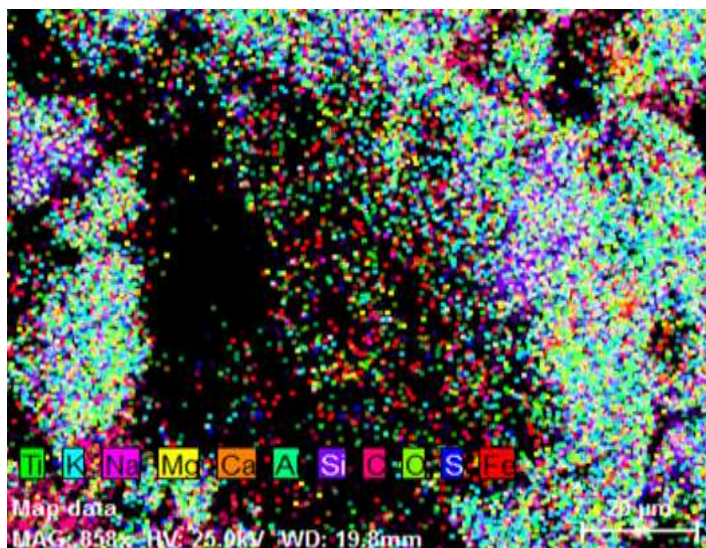
در این پژوهش به منظور بررسی تجزیه و تحلیل ساختاری، یا خصوصیات شیمیایی نمونه از روش طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس استفاده شده است. نمودارهای بدست آمده از آنالیز^۱ EDX روی نمونه های خاک تثبیت شده با ۲ درصد سولفات پتاسیم نشان دهنده پیک‌های ظاهر شده عناصر

^۱ EDX (Energy Dispersive X ray)

اصلی تشکیل دهنده ترکیب خاک می‌باشد که توسط شرکت بینالود انجام شده است.



شکل ۰-۲۲ نمودار آنالیز EDX برای خاک اختلاط شده با ۲ درصد سولفات پتاسیم



شکل ۰-۲۳ عکس Map data برای خاک اختلاط شده با ۲ درصد سولفات پتاسیم

۴-۴- نتایج مقایسه رده‌بندی واگرایی خاک با آزمایش‌های انجام شده

دراین پژوهش برای بررسی واگرایی خاک‌ها، از سه روش هیدرومتری مضاعف، شیمی خاک و پین‌هول استفاده شده که در اینجا به مقایسه و بررسی رده‌بندی واگرایی نمونه‌ها پرداخته شده است.

جدول ۹-۰ نتایج رده‌بندی واگرایی آزمایش هیدرومتری مضاعف

آزمایش هیدرومتری مضاعف		سولفات پتاسیم
مقدار	رده واگرایی	درصد
۶۱/۱۴	واگرا	۰/۰
۴۲/۸۹	واگرا	۰/۵۰
۲۶/۹۳	نیمه واگرا	۱/۰
۱۸/۸۲	نیمه واگرا	۱/۵۰
۱۰/۴۷	غیرواگرا	۲/۰

جدول ۱۰-۰ نتایج رده‌بندی واگرایی آزمایش شیمیایی

آزمایش شیمیایی		سولفات پتاسیم
مقدار	رده واگرایی	درصد
۵۷/۵۴	نیمه واگرا	۰/۰
۴۳/۴۸	نیمه واگرا	۰/۵۰
۳۴/۳۹	غیرواگرا	۱/۰
۲۸/۹۵	غیرواگرا	۱/۵۰
۲۳/۴۸	غیرواگرا	۲/۰

جدول ۱۱-۰ نتایج رده‌بندی واگرایی آزمایش پین‌هول

سولفات پتاسیم		آزمایش پین‌هول در زمان عمل آوری ۷ روزه
درصد	مقدار	رده واگرایی
۰/۰	D1	واگرا
۰/۵۰	D2	واگرا
۱/۰	ND3	نیمه واگرا
۱/۵۰	ND2	غیرواگرا
۲/۰	ND1	غیرواگرا

نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که نمونه‌ها فقط در اختلاط خاک با ۲ درصد سولفات پتاسیم در هر سه آزمایش هیدروتری مضاعف، شیمی خاک و پین‌هول غیرواگرا شده است.

۴-۵- بررسی اقتصادی استفاده از سولفات پتاسیم

در پروژه‌های عمرانی ما با محدودیت‌های بیشماری مواجه هستیم که محدودیت بودجه در پروژه‌های عمرانی باعث می‌شود که کار مطالعاتی و شناسایی منابع قرضه به خوبی انجام نشود و مشکلاتی را در طول انجام پروژه ایجاد می‌نماید.

بنابراین با توجه به تمام مشکلات موجود در پروژه‌های عمرانی از قبیل محدودیت‌های مالی، تأمین مصالح به دلیل مشکلات تحریمی، مسائل محیط زیستی و ... تصمیم گرفتیم که از سولفات پتاسیم برای بهسازی خاک‌های واگرا استفاده نماییم و مقایسه‌ای با مواد افزودنی دیگری که جهت بهسازی خاک‌های واگرا استفاده می‌شود انجام دهیم که در زیر به بیان آنها می‌پردازیم.

۱- در پروژه‌های عمرانی بویژه پروژه‌های خاکی، حداقل ۱۰ درصد از مبلغ پروژه، به حمل خاک مناسب اختصاص پیدا می‌کند. که در صورت افزودن سولفات پتاسیم به خاک مناطق تفرقه قوزی و یا قویجق کلاله می‌توان مشکل واگرایی خاک را با کمترین هزینه از بین برد.

۲- با توجه به افزایش دامنه خمیری در خاک با افزودن سولفات پتاسیم، می‌توان هزینه‌های مربوط

به اختلاط خاک جهت افزایش دامنه خمیری خاک برای استفاده در کاتاف سدها یا بندهای خاکی را کاهش داد.

۳- با توجه به بررسی نتایج آزمایش‌های هیدرومتری مضاعف، شیمی خاک و پین هول، واگرایی خاک با اضافه کردن حداکثر ۲ درصد سولفات پتاسیم از بین رفته است که در مقایسه با مواد افزودنی دیگر مثل سیمان، آهک، لیگنوسولفات، فیبر پلی پروپلین که چیزی حدود ۱۰ الی ۲۰ درصد می‌باشد از لحاظ اقتصادی خیلی مرقون به صرفه می‌باشد.

۴- لازم بذکر است که افزودن ۲ درصد سولفات پتاسیم به خاک، باعث بروز مشکلات محیط زیستی نمی‌شود. بطوریکه در آب بندان‌هایی که جهت پرورش ماهی استفاده می‌شود، وجود سولفات پتاسیم باعث رشد جلبک‌ها شده و برای تغذیه ماهی‌ها مناسب می‌باشد.

فصل پنجم

نتیجہ گیری و پیشہادات

۵-۱- مقدمه

همان‌طور که در فصل‌های قبل بیان شد، هدف از این پژوهش، بررسی رفتار واگرایی خاک‌های رسی با افزودن سولفات پتاسیم بوده است. خاک‌های واگرا از منطقه تمرقره‌قوزی کلاله نمونه‌گیری شده و به آزمایشگاه انتقال داده شد. پژوهش انجام شده می‌تواند به عنوان یک طرح عملیاتی برای بهسازی خاک‌های واگرا در نظر گرفته شود. در قالب این پژوهش، علاوه به بررسی واگرایی خاک‌ها با افزودن سولفات پتاسیم، پارامترهای مقاومتی نیز بررسی شده که مقادیر آن به تفکیک در فصل چهارم ارائه گردیده است.

۵-۲- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی تأثیر سولفات پتاسیم بر پتانسیل واگرایی، تغییرات حدود آتربرگ، مقاومت تک محوری و درصد تورم یا بالازدگی پرداخته شده است. بدین منظور خاک با مقادیر ۰/۵۰، ۱/۰، ۱/۵۰ و ۲ درصد سولفات پتاسیم اختلاط و آزمون‌های مختلف انجام شده که به بیان نتایج آن پرداخته می‌شود.

۱- کاهش پتانسیل واگرایی در نمونه‌های اختلاط شده با سولفات پتاسیم در آزمایش شیمیایی به این علت است که در واکنش تبادل یونی ساختار خاک دچار تغییرات می‌شود و نیروی دافعه بین ذرات کاهش پیدا کرده و خاک از حالت پراکنده به مجتمع تبدیل می‌شود و در نهایت با افزایش نیروهای جاذبه از پتانسیل واگرایی نمونه‌ها کاسته شده است.

۲- با افزایش سولفات پتاسیم از میزان کمیت‌های SAR و Ps نمونه‌ها کاسته شده و متناسب با آن پتانسیل واگرایی نیز کاهش یافته است. لازم بذکر است که علیرغم افزایش سدیم در نمونه‌ها، سایر کاتیون‌ها افزایش پیدا کرده که این امر باعث افزایش TDS و کاهش Ps شده است. و این نشان دهنده خاصیت اصلاحی سولفات پتاسیم بر کاهش پتانسیل واگرایی خاک بوده بطوریکه در اختلاط خاک با ۲ درصد سولفات پتاسیم نمونه در رده خاک‌های غیرواگرا

قرار گرفته است.

۳- طبق نتایج آزمایش هیدرومتری مضاعف با افزایش میزان سولفات پتاسیم، پتانسیل واگرایی نمونه‌ها کاهش پیدا کرده و این روند کاهشی در اختلاط ۲ درصد سولفات پتاسیم با خاک از همه بیشتر می‌باشد که می‌توان علت آن را به نحوه قرارگیری ذرات رس در کنار هم با افزودن سولفات پتاسیم دانست. در نتیجه با افزایش سولفات پتاسیم چسبندگی ذرات و سرعت ته‌نشینی بیشتر شده و درصد واگرایی کاهش پیدا کرده است.

۴- طبق نتایج آزمایش پین هول با افزایش میزان سولفات پتاسیم، نرخ جریان خروجی آب کم شده و رنگ آب خروجی شفاف شده و در نتیجه پتانسیل واگرایی نمونه‌ها کاهش پیدا کرده است. بطوریکه میزان واگرایی از D1 در خاک محل به ND1 در خاک اختلاط شده با ۲ درصد سولفات پتاسیم تغییر کرده است. و در اختلاط خاک با ۱/۵۰ و ۲ درصد سولفات پتاسیم نمونه‌ها کاملاً غیرواگرا شده است. لازم بذکر است که زمان‌های عمل‌آوری ۱ و ۷ روزه در این پژوهش تأثیر چندانی بر روی خاک‌های اختلاط شده با سولفات پتاسیم ندارد.

۵- مطابق نتایج آزمایش تعیین حدود آتربرگ، با افزایش سولفات پتاسیم، مقدار حدروانی (LL)، حدخمیری (PL) و نشانه خمیری (PI) افزایش پیدا کرده است و می‌توان نتیجه گرفت که به همان نسبت میزان نفوذپذیری در نمونه‌ها کاهش پیدا کرده است.

۶- حداکثر مقاومت تک محوری نمونه‌ها در اختلاط ۲ درصد سولفات پتاسیم در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه اتفاق افتاده است که روند نتایج آزمایشات نشان می‌دهد زمان عمل‌آوری نقش بسزایی در افزایش مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها داشته است. لازم بذکر است که کرنش محوری نمونه‌ها با افزایش سولفات پتاسیم و زمان عمل‌آوری افزایش پیدا کرده است.

۷- مطابق با انجام آزمایش تراکم، درصد رطوبت بهینه تا حدودی افزایش پیدا کرده و وزن مخصوص خشک خاک به مقدار خیلی کم کاهش یافته است.

۵-۳- پیشنهادات

انجام موارد زیر جهت ادامه پژوهش به شرح زیر پیشنهاد می‌شود :

- ۱- بررسی تأثیر سولفات پتاسیم بر پارامترهای مقاومت برشی با انجام آزمایش‌های برش مستقیم و آزمایش سه محوری.
- ۲- بررسی تأثیر سولفات پتاسیم بر روی خاک‌های رمبنده در زمان‌های عمل آوری مختلف.
- ۳- بررسی تأثیر سولفات پتاسیم در تزریق دوغاب سیمان در پروژه‌های بهسازی خاک.
- ۴- مقایسه تأثیر سولفات پتاسیم بر روی خاک‌های ریمولد شده به روش استاندارد و اصلاح شده.
- ۵- بررسی نتایج تحکیم و کنترل مقادیر ضریب تراکم، ضریب فشردگی و ضریب الاستیسیته خاک.

-
-
- [1] McCarthy, D.F. 2006. Essential of soil mechanics and foundations. Prentice Hall.
- [۲] عالمی، آ. ۱۳۷۷. بررسی علل نشست زمین در دشت یزد - اردکان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- [۳] عسکری، ف. فاخر، ع. ۱۳۷۲. تورم و واگرایی خاک‌ها از دیدگاه مهندس ژئوتکنیک. تهران: انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران.
- [4] R. Van de Graaff and R. A. Patterson, "Explaining the mysteries of salinity, sodicity, SAR and ESP in on-site practice," in *advancing on-site wastewater systems*, New England, 2001.
- [5] T. Umesh, S. Dinesh and P. V. Sivapullaiah, "Characterization of dispersive soils," *Materials Sciences and Applications*, vol. 2, no. 6, pp. 629-633, 2011.
- [۶] اوحدی، و. ر. امیری، م. حمیدی، ص. آ. ۱۳۹۳. بهسازی خاک‌های واگرا با آهک با نگرش ویژه به کاهش شدت قله‌های اصلی کانی‌های رسی در پراش پرتو ایکس. مجله علمی - پژوهشی «عمران مدرس» دوره چهاردهم.
- [7] Briscolland, R.; R. chown. 2001. Problem soils: A review from a British perspective. In: proceeding of problematic soils conference. Proc prob soils conf: 53-66.
- [8] Umesh, T.S.; S. V. Dinesh; P. V. Sivapullaiah. 2011. Characterization of Dispersive Soils. *Materials Sciences and Applications*, 2: 629-633
- [9] Bolzon, G. 2010. Collapse mechanisms at the foundation interface of geometrically similar concrete gravity dams. *Engineering Structures*, 32: 1304-1311.
- [10] Azam, S. 2000. Collapse and compressibility behavior of arid calcareous soil formations. *Bull Eng Geol Env*, 59: 211-217.
- [11] Liua, S.H.; D.A. Sun; Y. Wang. 2003. Numerical study of soil collapses

behavior by discrete element modeling. Computers and Geotechnics, 30: 399-408.

[۱۲] میرمحمد حسینی، م. ۱۳۷۸. «مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای»، چ اول، انتشارات پژوهشگاه

بین‌المللی مهندسی زلزله.

[۱۳] صفویان، م. رضائی، م. ۱۳۸۹ بررسی مشکلات احداث کانال بر روی خاک‌های گچ‌دار -

مطالعه موردی : شبکه آبیاری دشت مهبیار. مجموعه مقالات دومین سمینار ملی مسائل ژئوتکنیکی

شبکه‌های آبیاری و زهکشی، ص ۲۳۵-۲۴۶.

[۱۴] رحیمی، ح. ۱۳۷۹. مسائل احداث کانال‌های آبیاری در خاک‌های نامتعارف. کمیته ملی

آبیاری و زهکشی ایران. مجموعه مقالات کارگاه فنی : ساخت کانال‌های آبیاری، محدودیت‌ها و راه

حل‌ها. نشریه شماره ۳۹، ص ۱۲۸-۱۶۴.

[15] Bell, F. G., 2007, "Engineering Geology", ButterworthHeinemann, Oxford, UK, 581 pp.

[16] جعفری اردکانی، ع. بیات، ر. پیروان، ح. ر. شریعت جعفری، م. ۱۳۸۸، بررسی وضعیت

فرسایش و رسوب در نهشته‌های لسی استان گلستان، ششمین کنفرانس زمین شناسی، دانشگاه

تربیت مدرس.

[17] گیاهی، س. ۱۳۸۹. بررسی مشخصات رسوب شناسی و نقش زیست محیطی لس‌های منطقه

گرگان-دشت. پایان نامه کارشناسی ارشد رشته رسوب شناسی و سنگ شناسی رسوبی دانشگاه تهران،

۱۵۶ صفحه.

[18] Hardie, M. (2006), "Dispersive soils and their management. Support manual for Councils", Consultants and Landholders, Department of Primary Industries and Water of Tasmania.

[۱۹] هومن حیدریان، روش‌های استاندارد آزمون‌های آزمایشگاه مکانیک خاک بر اساس استاندارد

.ASTM

[20] ASTM Committee D-18 on Soil and Rock, Standard test method for dispersive characteristics of clay soil by double hydrometer, ASTM International, 2000.

[21] ASTM Committee D-18 on Soil and Rock, Standard test method for identification and classification of dispersive clay soils by the pinhole test, ASTM International, 2006.

[22] J. L. Sherard., R. S. Decker., and L. P. Dunnigan., "Identification and nature of dispersive soils," J. Geotech. Eng. Div., VOL. 102, N0. GT4, pp. 287–301, 1976.

[23] Dixit, M. and Gupta, S. L. (2011) "Problems in characterization and identification of dispersive soils – a case study", International Journal of Earth Sciences and Engineering, ISSN 0974-5904, Volume 04, No 06 SPL, pp 143-146.

[24] A. H. Vakili, J. Ghasemi, M. R. bin Selamat, M. Salimi, and M. S. Farhadi, "Internal erosional behavior of dispersive clay stabilized with lignosulfonate and reinforced with polypropylene fiber," Constr. Build. Mater., vol. 193, pp. 405–415, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.10.213.

[25] A. H. Vakili, M. Kaedi, M. Mokhberi, M. R. bin Selamat, and M. Salimi, "Treatment of highly dispersive clay by lignosulfonate addition and electroosmosis application," Appl. Clay Sci., vol. 152, pp. 1–8, Feb. 2018, doi: 10.1016/J.CLAY.2017.11.039.

[۲۶] احمدی، ه. اکرامی، ح. ۱۳۹۸. بررسی آزمایشگاهی کاهش پتانسیل واگرایی با استفاده از

نانو اکسید آلومینیوم و آهک. مجله انجمن زمین شناسی ایران، دوره دوازدهم، ص ۷۳–۸۵.

[۲۷] روشنگر، ک. اعلمی، م. هوشیار، ی. ۱۳۹۹. بررسی آزمایشگاهی تأثیر آهک در روند خود

ترمیمی و واگرایی خاک های رسی (مطالعه موردی : سد گردیان)، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۶.

[28] M. Turkoz, H. Savas, A. Acaz and H. Tosun, "The effect of magnesium chloride solution on the engineering properties of clay soil with expansive and dispersive characteristics," Applied Clay Science, vol. 101, pp. 1-9, 2014.

[29] H. Savas, "Consolidation and swell characteristics of dispersive soils stabilized with lime and natural zeolite," *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 23, no. 6, pp. 589-598, 2016.

[30] V. Ouhadi and A. Goodarzi, "Assessment of the stability of a dispersive soil treated by alum," Engineering geology, vol. 85, no. 1-2, pp. 91-101, 2006.

[31] C. F. Wan and R. Fell, "Investigation of rate of erosion of soils in embankment

dams,” J. Geotech. Geoenvironmental Eng., vol. 130, no. 4, pp. 373–380, 2004.

[32] F. G. Bell and D. J. H. Walker, “A further examination of the nature of dispersive soils in Natal, South Africa,” Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol., vol. 33, no. 3, pp. 187–199, 2000.

[۳۳] علی عسگری، آ. مقایسه معیارهای مختلف شیمیایی شناسایی خاک‌های واگرا، ص ۶۷-۶۸ و

ص ۷۳-۸۷.

[34] Decker, R.S. and Dunnigan L.P. “Development and Use of the Soil Conservation Service Dispersion Test”, ASTM STP 623, 1977, PP. 34-109.

[35] Ingles O.G. and Aitchison G.D., “Soil- Water Disequilibrium as a Cause of Subsidence in Natural Soils and Earth Embankments”. International Symposium on Land Subsidence, Tokyo, AIHS Publication No.89, VOL. 2, 1969.

[36] Sherard J.L., Dunnigan L.P. and Decker R.S., “Pinhole Test for Identifying Dispersive Soils”. J. Geotech.Eng.Div., ASCE, VOL. 102, NO. GT1, 1976, PP. 6985.

[37] Haeri M., “Physico – Chemical Erosion of Natural and Compacted Earth Embankments”, Unpublished paper.

[38] Umesha, T.S. Dinesh, S.V and Sivapullaiah, P.V, "Controls of dispersity of soil using lime and cement", international journal of geology, Issuel,Vo 1.3,2009.

[۳۹] رحیمی، ح. فکور، ک. ۱۳۷۲. مقایسه سیمان و امولسیون قیر در تثبیت خاک‌های واگرا.

موسسه تحقیقات مهندسی زراعی.

[۴۰] امیری، م. ابراهیمی، م. ۱۳۸۹. تأثیر فناوری نوین نانو در مهندسی عمران با نگرش ویژه به

کاربرد نانورس‌ها در پروژه‌های ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست محیطی، اولین همایش ملی فناوری‌های نوین در علوم مهندسی.

[۴۱] بهنیا، س. شواخی، آ. ۱۳۸۹. مقدمه‌ای بر نانورس‌ها و کاربرد آن‌ها در مهندسی عمران،

کنفرانس مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد.

[۴۲] قاسمی، ح. حسنلو، م. ۱۳۹۲. بررسی آزمایشگاهی قابلیت واگرایی خاک‌های رسی واگرای

آلوده به مواد نفتی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان.

[43] ASTM Committee D-18 on Soil and Rock, "Standard Practice for Classification

of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)," ASTM International, 2017.

[44] ASTM Committee D-18 on Soil and Rock, Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass, ASTM International, 2005.

[45] ASTM Committee D-18 on Soil and Rock, Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer, ASTM International, 2005.

[46] ASTM Committee D-18 on Soil and Rock, Standard test method for density and unit weight of soil in place by the sand-cone method, ASTM International, 2005.

[47] ASTM Committee D-18 on Soil and Rock, Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soil, ASTM International, 2010.

[48] ASTM Committee D-18 on Soil and Rock, Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil Using standard effort (12 400 Ft-lbf/ft³ (600 KN-m/m³)), ASTM International, 2007.

[49] L. P. D. S. D. James L. Sherard, "Identification and Nature of Dispersive Soils," Journal of the Geotechnical Engineering Division, no. Vol. 102, Issue 4 (April 1976), 1976.

[50] Bell, F. G., Maud R. R., 1994. Dispersive Soils: A Review from a South African Perspective. Quarterly Journal of Engineering Geology, 1994, 11: 195 -21.

[51] ASTM Committee D-18 on Soil and Rock, Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil, ASTM International, 2016.

[52] W. G. Holtz, Soil as an Engineering Material, Washington, 1969.

Abstract

Dispersion is a process in which clayey soil is easily eroded by low-salt water. The failure to understand soil dispersion could lead to damage to hydraulic and other structures constructed on dispersive soils. The present study aims to evaluate the effects of potassium sulfate on the dispersion and strength of clayey soils. To this end, the effects of potassium sulfate on the physical, chemical, and strength properties of dispersive clay specimens from the Kalaleh catchment were studied. The specimens were subjected to primary tests. Then, potassium sulfate (K_2SO_4) was added at dry soil mass fractions of 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, and 2.0% at the optimum moisture content (OMC). The dispersion potential of the specimens was measured using chemical, pinhole, and double hydrometer tests. In addition, the strength parameters of the soil were evaluated using uniaxial tests at curing ages of 1, 7, and 28 days. It was found that potassium sulfate reduced or eliminated the dispersion potential. Furthermore, potassium sulfate at a mass fraction of 2.0% enhanced the compressive strength by 23.2% and 78.9% at curing ages of 7 and 28 days, respectively, compared to the control specimen.

Keywords: Dispersion, Clayey soil, Potassium sulfate, Pinhole test, Double hydrometer test, Compressive strength



Shahrood University of Technology
Faculty of Civil Engineering
M.Sc. Thesis in Geotechnical Engineering

Improvement of Dispersive Soils using Potassium Sulfate

By: Farhad Givari

Supervisor:
Dr. Mohsen Keramti

February 2022