

## راههای پدیده علاجبخشی پدیده واگرایی در سدهای خاکی

صادق پرتانی<sup>۱</sup>، محمد احمدی<sup>۲</sup>، پیمان کلبعلیان<sup>۳</sup>، مصطفی جلال<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس تهران،

۲- دانشجوی کارشناس ارشد مهندسی عمران - خاک و پی، دانشگاه بوعلی همدان

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - خاک و پی، دانشگاه علم و صنعت ایران

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی،

تلفن: ۰۹۱۵۵۸۴۵۶۳۵، تلفکس: ۰۲۱ - ۲۲۴۵۸۵۵۱، e\_mail: Sadegh\_Partani@yahoo.com

### چکیده

خاک‌های ریز دانه خاصی در طبیعت وجود دارد که به محض تماس یافتن با آب، به سرعت شسته می‌شود. این خاک‌هاکه معمولاً از نوع رس هستند، در صورت قرار گرفتن در معرض جریان آب حتی اگر سرعت جریان کم باشد به سهولت شسته می‌شوند و فرسایش می‌یابند. بالابودن درصد یون سدیم در آب منفذی از خصوصیات عمده این خاک‌هاست. خاک‌های مذکور به خاک‌های واگرا مرسومند. این پدیده را با توجه به خصوصیات خاک‌های رسی می‌توان توجیه کرد؛ بین ذرات خاک‌های رسی نیروهای دافعه و جاذبه وجود دارد. نیروهای جاذبه عمدتاً از نوع نیروهای واندروالسی هستند و نیروهای دافعه از وجود لایه دوگانه در اطراف ذرات کانیهای رسی ناشی می‌شوند. در خاک‌های واگرا بر اثر مجاورت با آب نیروی جاذبه بین ذرات از بین می‌رود و در نتیجه ذرات کلونیدی خاک به سهولت از یکدیگر دور شده و با نیروی کمی که می‌تواند ناشی از حرکت بسیار آرام آب باشد به حرکت در می‌آیند در صورتی که در خاک‌های رسی غیر واگرا نحوه فرسایش به گونه‌ای دیگر است. در این خاک‌ها بر اثر تماس خاک با آب نیروی جاذبه بین ذرات از بین نمی‌رود و برای فرسایش و شسته شدن آنها لازم است سرعت جریان آب بقدر کافی زیاد باشد. در این مقاله با بررسی راه‌های تشخیص خاک‌های واگرا و ملاحظات طراحی، روش‌های بهبود و اصلاح خاک و مقابله با مشکلات ناشی از آن مورد مطالعه قرار گرفته و در نهایت به‌طور اجمالی به بهسازی پی در سدهای خاکی اشاره می‌شود.

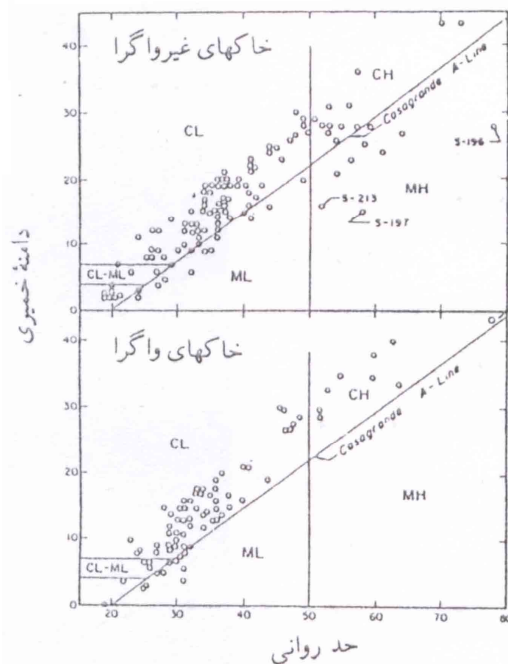
کلمات کلیدی: خاک‌های واگرا، خاک‌های رسی، بهبود و اصلاح خاک، بهسازی پی

### مقدمه

خاک‌های واگرا خاک‌هایی هستند که با توجه به طبیعت و کانی‌شناسی و نیز خصوصیات شیمیایی آب بین حفرات، مستعد جدا شدن ذرات رسی از یکدیگر و در نتیجه شسته شدن این ذرات بسیار ریز از میان ترک‌های خاک در فرآیند تراوش آب در خاک می‌باشد. لازم به توضیح است که این پدیده را نباید با فرسایش مکانیکی که بیشتر در خاک‌ها ماسه ریز دانه و لای و در اثر گرادیان هیدرولیکی بحرانی بوجود می‌آید اشتباه گرفت. در ادامه این تحقیق پس از بررسی اجمالی مکانیزم وقوع این پدیده در ذرات خاک به عوارض و مسائل ناشی از این پدیده اشاره شده است. سپس با مقایسه نتایج روش‌های انجام شده جهت علاج بخشی این پدیده در ایران و سایر نقاط جهان به آسیب‌شناسی روش‌های موجود پرداخته و با در نظر گرفتن مشخصات خاک‌های ایران و اندرکنش عوامل اقلیمی و محیطی، به مطالعه تطبیقی سد‌های خاکی با مصالح واگرا و ارزیابی علاج بخشی این سد‌ها پرداخته می‌شود.

## منشأ ایجاد واگرایی و مکانیسم وقوع

از آنجا که علاج بخشی هر پدیده مستلزم شناخت علت و عوامل آن می باشد لذا مکانیسم وقوع پدیده واگرایی نیز ضرورت می یابد. براساس تئوری لایه دوگانه (Double Layer) با نزدیک شدن دو ذره رسی به یکدیگر و همپوشانی (Overlap) میدان الکتواستاتیکی اطراف دو ذره،



شکل ۱: نتایج بررسی شرارد در زمینه حدود اتربرگ خاکهای واگرا و غیر واگرا [۱]

البته با توجه به شکل ۱ در خاکهای غیر واگرا، ۱۲ مورد با حد روانی بزرگتر از ۴۰ درصد از رده لایهای با خاصیت خمیری متوسط تا زیاد (ML - MH) هستند. اما هیچیک از خاکهای واگرا از این رده نیستند، همچنین آزمایشهای مختلف بر روی بسیاری از خاکهای بر جا مانده از هوازدگی مانند بازالت، دیوریت و گنیس نشان داده است که این خاکها عمدتاً ML و یا ML - MH بوده اند که خاصیت واگرایی ندارند. به این ترتیب به نظر می رسد که لایهای دارای خاصیت خمیری متوسط تا زیاد واگرا نیستند.

## بررسی تاثیر میزان درصد رس در واگرایی خاکها

نتایج بررسی های انجام شده نشان داده است که بین ذرات رس در خاکهای واگرا و غیر واگرا تفاوتی وجود ندارد. در جدول شماره (۱) درصد ذرات رس در ۱۹۵ نمونه از خاکهای مورد آزمایش شرارد ارائه شده است. مشاهده می شود که براساس درصد ذرات رس، نمی توان درباره واگرا بودن یا نبودن خاک قضاوت کرد. البته در صورتی که میزان ذرات کوچکتر از ۰/۰۰۵ میلیمتر در خاک کمتر از ۱۲ دصد باشد، نیازی به بررسی واگرایی خاک نیست. در این موارد رفتار توده خاک، تابع ذرات بزرگتر است و واگرا بودن یا نبودن ذرات رس تاثیری در این رفتار ندارد [۱-۲]. ذکر این نکته لازم است که عدم توجه به این مطلب، باعث گردیده در معدودی از پروژه های داخلی، علت شسته شدن خاک به جای فراوانی درصد ذرات لای، پدیده واگرایی قلمداد گردد.

جدول ۱: درصد ذرات رس در نمونه‌های مورد آزمایش پین هول [۱]

تعداد نمونه‌های آزمایش شده		درصد ذرات رس (کوچکتر از ۰/۰۵ میلی‌متر)
واگرا	غیرواگرا	
۰	۰	۰ - ۵
۰	۱	۶ - ۱۰
۴	۵	۱۱ - ۱۵
۱۶	۱۳	۱۶ - ۲۰
۲۹	۳۶	۲۱ - ۳۰
۱۳	۲۲	۳۱ - ۴۰
۸	۱۹	۴۱ - ۵۰
۱۰	۱۹	بیش از ۵۰
۸۰	۱۱۵	مجموع

### روش‌های شناسایی خاکهای واگرا

تا کنون محققین مختلفی در زمینه ابداع روش‌های تشخیص خاکهای واگرا فعالیت داشته‌اند. شناسایی خاکهای واگرا شامل مراحل زیر است:  
الف - شناخت کلی خاکهای واگرا در بررسی‌های مقدماتی صحرائی  
ب - شناسایی خاکهای واگرا در آزمایشگاه

### ۱ - شناسایی خاکهای واگرا در بررسی‌های محلی یا مقدماتی صحرائی

این مرحله از شناسایی، در بازدیدهای مقدماتی از محل پروژه و محل مصالح قرضه و نیز در ضمن بررسی‌های اولیه زمین‌شناسی در سطح منطقه صورت می‌پذیرد. در پروژه‌های سد سازی، بویژه در انتخاب منابع قرضه برای سدهای خاکی، بررسی زمین از جهت وجود خاکهای واگرا باید بخشی از بررسی‌های کلی را تشکیل دهد.

در جاهایی که سطح زمین شیب نسبتاً تندی دارد، شناسایی خاکهای واگرا آسان‌تر است. در این مناطق، بر اثر بارندگی‌ها و فرسایش سریع، بریدگی‌های بسیار عمیق و مشخصی در سطح زمین بوجود می‌آید که مشخصه اصلی اینگونه خاکهاست. از سوی دیگر، در مناطق مسطح و کم شیب تشخیص خاکهای واگرا به سادگی میسر نیست. در این مناطق بر اثر بارندگی ذرات رسهای واگرا شسته و لایه‌ای از ماسه لای دار در سطح زمین باقی می‌ماند که لایه‌های عمیق‌تر را محافظت می‌کند. در نتیجه مشخصه بارز خاکهای واگرا را که فرسایش و بریدگی‌های عمیق است نمی‌توان در سطح زمین مشاهده نمود. معمولاً در مناطق در بردارنده خاکهای واگرا آثار شستگی از قبیل کانالهای تنگ و عمیق طبیعی (Erosion Gullies) خلل و فرج و حفره‌های بزرگ با دیواره‌های عمودی (Sink Holes)، جویبارها، تونلها و آب شستگی‌های کوزه ای شکل دیده می‌شوند - آب شستگی کوزه‌ای شکل به آن دسته از آب شکستگی‌ها گویند که در آنها میزان فرسایش خاک در اعماق بیشتر از میزان خاکهای زیرین است رخ می‌دهد - حفرات ناشی از آب شکستگی‌های مذکور غالباً به تونلهایی منتهی می‌شوند که در ترازهای پایین‌تر، در سطح زمین ظاهر می‌شوند.

آثار سطحی را می‌توان در بستر جریان آبهای سطحی و آب باران، در شیبهای طبیعی و شیبهای حاصل از خاکریزی یا خاکبرداری مشاهده کرد دیواره عمودی حفره‌ها . کانالهای حاصل از آب شستگی، از نزدیک بسیار شبیه دیواره غارها و حفره‌هایی که بر اثر حل شدن سنگهای آهکی در آب بوجود می‌آیند، می‌باشد. یکی از مشخصه‌های بارز کانالهای ناشی از آب شستگی در خاکهای واگرا، مسیر پریپیچ و خم آنهاست که مانند منادریهای بوجود آمده در بستر رودخانه می‌باشد معمولاً زاویه خمش مسیر این کانالها حدود ۹۰ درجه است.

### ۲- آزمایشهای متداول در شناسایی خاکهای واگرا

شناسایی کامل و دقیق خاکهای واگرا در محل و بدون به انجام رساندن آزمایشهای مخصوص آزمایشگاهی، عملاً مشکل و تقریباً غیر قابل استناد است. به همین دلیل بسیاری از محققان تلاش نموده‌اند تا آزمایشهای مختلفی را به این منظور عرضه نمایند و در این میان فعالیتهای سازمان حفاظت خاک آمریکا از همه آنها چشمگیرتر است.

بدین منظور از آزمایشهای ویژه‌ای استفاده می‌گردد که متداول‌ترین این آزمایشها برای شناسایی خاکهای واگرا عبارتند از: آزمایش پین هول، آزمایش تعیین درصد نمکهای محلول در آب منفذی (آزمایشهای شیمیایی)، آزمایش هیدرومتری دو گانه، آزمایش کرامب. علاوه بر آزمایش های فوق، روش های دیگری نیز برای شناسایی خاک های واگرا وجود دارند که اغلب متداول نیستند و از برخی از آنها در شرایط و پروژه‌های خاص استفاده می‌شود، این آزمایش ها عبارتند از:

نسبت واگرایی میدلتون

آزمایش هیدرومتری سه گانه

آزمایش کاهش غلظت ( Dilution-Turbidity Test )

آزمایش شاخص واگرایی ( Dispersal Index Test )

آزمایش استوانه چرخان

آزمایش جریان سطحی آب در کانال های کوچک

آزمایش تورم آزاد

آزمایش نقطه چسبندگی [۳].

### علاج بخشی پدیده واگرایی و مطالعات موردی

با توجه به رفتار خاکهای واگرا پدیده آب شستگی در آنها، لازم است در طرح و اجرای آن دسته از سازه‌های خاکی که با خاکهای واگرا ساخته می‌شوند و یا با آنها در تماس می‌باشند، ضوابط ویژه‌ای در نظر گرفته شود بررسی رفتار بسیاری از سدهای خاکی ساخته شده در چند سال اخیر نشان می‌دهد که تعداد خرابیها و مشکلات ناشی از پدیده رگاب در سدهایی که در ساخت آنها ضمن استفاده از این خاکها، چنین ضوابطی رعایت شده، بسیار اندک بوده است. اولین راه حل ممکن برای مقابله با واگرایی، عدم استفاده از این خاکها می‌باشد، اما اگر استفاده از این خاکها ضرورت داشته باشد، باید برای مقابله با پدیده آبشستگی در آنها چاره‌ای اندیشید. بدین منظور عمدتاً یکی از دو هدف زیر مدنظر است:

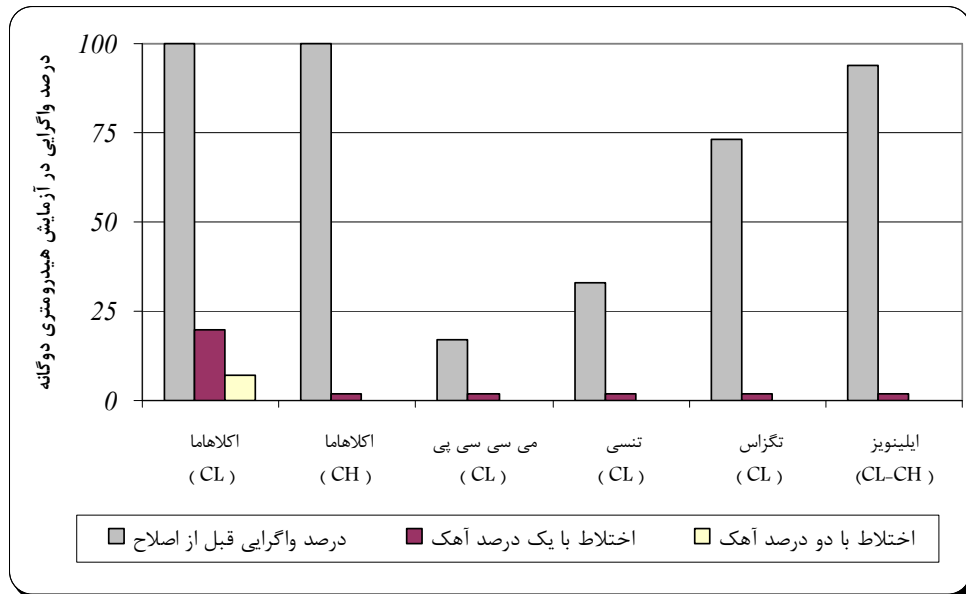
بهبود خصوصیات خاک با افزودن مواد شیمیایی

بهبود خصوصیات خاک معمولاً با افزودن مواد شیمیایی به خاک و در مواردی با افزودن این مواد به آب مخزن سد صورت می‌گیرد. مهمترین مواد شیمیایی مورد استفاده در اصلاح خاک عبارتست از آهک، سولفات آلومینیوم و ژئوپس.

طراحی سازه های محافظ یا پوشش هایی به منظور جلوگیری از شسته شدن خاک.

در این بخش به بررسی روش های علاج بخشی به کار رفته در ایران و سایر نقاط جهان با تمرکز بر سد ۱۵ خرداد پرداخته می‌شود.

افزودن آهک به عنوان یکی از روشهای شیمیایی اصلاح خاک به طور گسترده ای مورد تحقیق و استفاده در سد های بسیاری قرا گرفته است. بر اثر افزودن آب آهک، دامنه خمیری خاک کاهش و حد انقباض آن افزایش می‌یابد. اگر خاک رس واگرایی با یک یا دو درصد آهک زنده مخلوط شود درصد واگرایی در آزمایش هیدرومتری دوگانه تقریباً صفر می‌گردد. نمودار زیر بیانگر نتایج تأثیر مستقیم آهک در اصلاح خاک در مناطقی که در آزمایش هیدرومتری دوگانه دارای درصد واگرایی نسبتاً بالایی بوده اند می‌باشد [۴].



شکل ۲: درصد واگرایی با اضافه کردن آهک در رس

افزودن آهک علاوه بر کاهش میزان واگرایی خاک، باعث کاهش وزن مخصوص و پتانسیل تورم زایی و افزایش مقاومت برشی و نفوذ پذیری خاک نیز می گردد. این روش کاملاً سودمند بوده و تاکنون آبشستگی های داخلی یا سطحی در هیچ یک از موارد مطالعاتی فوق مشاهده نشده است. [۵].

اثر افزودن این ماده بر میزان واگرایی خاک در پروژه آبیاری گتوند بررسی گردیده و مطالعات انجام شده در این پروژه نشان داده است که خاک واگرایی این منطقه با افزودن سه درصد آهک به خاکی غیر واگرا تبدیل می شود.

سولفات آلومینیوم، یکی دیگر از موادی است که برای تثبیت خاکهای واگرا از آن استفاده شده است، از این ماده جهت تثبیت خاکریز سد ساپرادینهو (Sabradinho) در برزیل استفاده شده است. قابلیت حل شدن سولفات آلومینیوم در آب بسیار بیشتر از آهک است و به همین دلیل نیز مخلوط کردن آن با خاکی که اصلاح آن مورد نظر می باشد به نسبت آهک هزینه کمتری دارد، همچنین ضرر سولفات آلومینیوم در تماس با دست، نسبت به آهک، کمتر است، در نتیجه استفاده از آن راحت تر است. از معایب این روش گران بودن سولفات آلومینیوم و اسیدی بودن آن و ایجاد مشکل برای رویش گیاهان است. اضافه کردن حدود ۰/۵ تا ۲ درصد سولفات آلومینیوم به خاک، علاوه بر افزایش مقاومت در برابر آب شستگی، باعث کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت برشی و کاهش پتانسیل تورم نیز می شود. لیکن وزن مخصوص خاک تغییر محسوسی نمی کند. [۶]

در پروژه آبیاری گتوند، اثر اختلاط سولفات آلومینیوم با خاک در میزان واگرایی، مورد بررسی قرار گرفته است. در این پروژه، آزمایش پین هول بر روی تعدادی از نمونه های خاک منطقه با درصدهای مختلف سولفات آلومینیوم انجام گرفت و نتیجه آن بود که با افزودن ۰/۶ درصد سولفات آلومینیوم به خاک واگرایی مورد مطالعه، خاک مذکور بطور کامل غیرواگرا می شود.

### روش های دیگر علاج بخشی عبارتند از

افزودن ژئوپیس (سنگ گچ آبدار) به آب مخزن سد برای بهبود کیفیت آب مخزن که در سد کاردینیا در استرالیا به کار برده شده است. معمولاً افزودن غلظت کاتیونهای موجود در آب، روشی گران و غیر متداول است.

آماده سازی پی، در مواردی که خاک پی و دیواره های محل احداث سد نیز تا عمق زیادی واگراست، تزریق و ایجاد دال بتنی در محل احداث هسته سد به بستر سنگی و استفاده از خاکهای غیرواگرا در لایه هایی از خاکریز که مستقیماً بر سطح سنگ قرار می گیرند از راه حل هایی هستند که در سد ساپرادینهو در برزیل استفاده شده و عملکرد آن نیز تا کنون خوب بوده است.

استفاده از فیلترهای مناسب در پایین دست خاکهای واگرا، استفاده از زهکشهای دودکشی در سدهای خاکی همگن، جلوگیری از ترک خوردگی، استفاده از خاکهای غیرواگرا در مقاطع بحرانی (اطراف آبروها، سطوح تماس سازه خاکی با سایر سازه های صلب، مقاطعی از خاکریز که احتمال ایجاد ترکهای کششی وجود دارد).

## سد مارون:

آزمایشهای شیمیایی انجام شده بر مصالح ریزدانه بالادست نشان می دهند که این خاکها اساسا واگرا محسوب نمی شوند، ولی در مجاورت آبهایی که دارای درصد بالایی از یون سدیم باشند می توانند قابلیت واگرایی پیدا کنند. در عین حال نتایج آزمایشات بر روی آب رودخانه مارون نشان می دهند که این آب دارای درصد نسبتا بالایی از یون سدیم است که این خود می تواند نقش یک عنصر پراکنده کننده را برای مواد ریزدانه داشته باشد. همچنین آزمایشات انجام شده بر روی مصالح پایین دست نشان دادند که این خاکها واگرا هستند. با توجه به مطالعات انجام شده و مصالح موجود در محل، در طراحی سد مارون یک لایه فیلتر در بالادست و لایه ای دیگر در پایین دست هسته رسی سد جهت جلوگیری از خرابی های ناشی از پدیده واگرایی خاک ریزدانه هسته سد در نظر گرفته شده است.

## سد پانزده خرداد:

قبل از نمونه گیری و انجام آزمایشات لازم بازدیدی از منبع قرضه پایین دست به عمل آمده و آثار فرسایش سطحی در سراسر سطح زمین قرضه و آبستگي های داخلی در برخی از نقاط آن دیده می شود. جهت بررسی میزان واگرایی خاکهای مورد مطالعه آزمایشات انجام شده بر روی ۴۳ نمونه بشرح جدول زیر می باشند:

جدول ۲: خلاصه نتایج آزمایشگاهی

آزمایشات انجام شده				
نتایج	کرامب	هیدرومتری دوگانه	پین هول	شیمیایی
غیرواگرا	۳۸	۳۵	۲۲	۵
متوسط واگرا	۴	۷	۱۶	۶
واگرا	۱	۱	۵	۳۲

عمده ترین مسئله درخور توجه اینست که نتایج آزمایش شیمیایی با سه آزمایش دیگر بویژه آزمایش پین هول چندان مطابقت ندارد که دلیل آن اینست که نمونه های مورد آزمایش حاوی درصد فراوانی املاح، بویژه املاح سدیم هستند. بدلیل نوع و ابعاد کانیهای موجود در خاک، میزان گسترش لایه دوگانه درحدی نیست که منجر به از بین رفتن نیروی جاذبه میان ذرات رس شود و لذا علیرغم بالا بودن میزان یون سدیم، ذرات در آزمایش پین هول در کنار یکدیگر باقی می مانند. همچنین فراوانی درصد ذرات لای و ماسه و کمبود درصد ذرات رسی و نبودن چسبندگی در بین این ذرات در نتایج آزمایش پین هول مؤثر بوده است. در نهایت پتانسیل واگرایی خاک کم و قابلیت آب شستگی آن ناشی از تأثیر همزمان دو عامل واگرایی شیمیایی و فرسایش پذیری مکانیکی متوسط می باشد.

## نتیجه گیری

احتمال برخورد با خاکهای واگرا، در همه مناطق آب و هوایی وجود دارد. اگرچه خاکی از نظر املاح موجود غیرواگرا باشد ولی در صورت وجود املاح در آب مخزن سد (خصوصا املاح سدیم) احتمال واگرا شدن خاک در اثر ترکیب با این آبها وجود دارد، همانطور که وجود این مسئله در سد مارون توضیح داده شد. در این حالات استفاده از سازه های محافظ خصوصا فیلترها می تواند مفید باشد. همچنین در خاکهایی که دارای مقادیر زیادی املاح (بعنوان مثال سدیم) می باشند بهبود خاصیت خاک با استفاده از مواد شیمیایی مفید است. بهترین روش شناسایی خاکهای واگرا در یک منطقه، انجام آزمایشات مختلف بر روی نمونه های متعدد است، زیرا نتایج برخی آزمایشات ممکن است دال بر عدم واگرایی خاک باشند در حالی که خاک واگرا باشد، همانند سد پانزده خرداد که به دلیل فراوانی املاح سدیم در خاک از نظر آزمایش شیمیایی واگراست ولی علیرغم بالا بودن میزان یون سدیم، ذرات در آزمایش پین هول در کنار یکدیگر باقی می ماند.

در صورت وجود منابع قرضه متعدد از خاکهای واگرا و غیرواگرا با تحلیل اقتصادی بین انتخاب منابع قرضه غیر واگرا با فاصله دورتر و انتخاب منابع قرضه واگرا به همراه استفاده از روشهای علاج بخشی پدیده واگرایی می توان بهینه ترین گزینه را انتخاب کرد.

## مراجع

[1] - Elges, H. F. W. K. 1985. Dispersive soils. The Civil Engineer in South Africa, 27, 347-355

[2] - Anon 1990. Dispersive Soils in Embankment Dams. International Commission on Large Dams, Paris

[3]-Heinzen, R. T. & Arulanandan, K. 1977. Factors influencing dispersive clays and methods of identification. In: Sherard, J. L. & Decker, R. S. (eds), Proceedings Symposium on Dispersive Clays, Related Piping and Erosion in Geotechnical Projects, Philadelphia. ASTM Special Publication 623, 202–217

[4]-Sherard J.L. , Ryker N.L. And Decker R.S. " Piping in earth dams of dispersive soils ", Proc. Of speciality conf. on performance of earth and earth supported structures, ASCE, Vol.1 part.1, 1972,PP. 584-626.

[5]- Watermeyer, C. F., Botha G. R. & Hall, B. E. 1991. Countering potential piping at an earth dam on dispersive soils. In: Blight, G. E., Fourie, A. B., Luker, I., Mouton, D. J. & Scheurenburg, R. J. (eds), Geotechnics in the African Environment. Balkema, Rotterdam, 321–328

[6]-Bourdeaux, G. & Imaizumi, H. 1977. Dispersive clay at Sobrandinho dam. In: Shepard, J. L. & Decker, R. S. (eds) Proceedings Symposium on Dispersive Clays, Related Piping and Erosion in Geotechnical Projects, Philadelphia. 13–24.