شناسایی و تثبیت خاک‌های واگرا: مطالعهٔ موردی کانال انتقال آب سیمین دشت-گرمسار

عبدالحسین حداد؛ دانشگاه سمنان، دانشکدهٔ‌مهندسی عمران
حامد جاودانیان*؛ دانشگاه شهرکرد، دانشکدهٔ فنی و مهندسی،
فائزه ابراهیم‌پور؛ دانشگاه سمنان، دانشکدهٔ مهندسی عمران

تاریخ: دریافت ۹٤/۳/۱۰ **پذیرش** ۹۵/۱/۱۵

چکیده

وجود املاح در بعضی از خاک‌های ریزدانه رسی باعث ایجاد پدیدهٔ واگرایی در این خاک‌ها می‌شود. عدم شناسایی دقیق رس‌های واگرا خسارات و خرابی‌هایی را به‌دنبال دارد زیرا ذرات خاک‌های رسی واگرا تحت شرایط خاصی متفرق شده و به‌سرعت شسته می‌شوند. در منطقهٔ سیمین دشت (واقع در استان سمنان)، برخی از سازه‌های هیدرولیکی به‌علت قرارگیری روی این نوع خاک‌ها دچار آسیب‌های جدی شده‌اند. از این‌رو در این تحقیق به بررسی خاک‌های اطراف کانال انتقال آب در منطقهٔ مذکور و ارزیابی میزان واگرایی این خاک‌ها پرداخته و در نهایت روش‌های اصلاح این خاک‌ها پیشنهاد شده است. بدین‌منظور نمونه‌هایی از خاک محل تهیه و پس از تعیین مشخصات خاک، نمونه‌های مذکور تحت آزمایش‌های کرامب، هیدرومتری دوگانه و تست‌های شیمیایی قرار گرفتند. نتایج حاصل بیان‌گر واگرایی خاک این منطقه به‌خصوص در اطراف کانال انتقال آب سیمین دشت بوده است. در این تحقیق تأثیر افزودن سیمان، آهک و آلومینیوم نیترات بر کاهش واگرایی نمونه‌های خاک با انجام آزمایش‌های پین‌هول بررسی شده واقع شد. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر نمونه‌های اصلاح شده نشان داده که افزودن ٪۵ سیمان، یا ٪۵ آهک (بدون برطرف شدن کامل پدیده آب‌شستگی)، یا ٪۳ آلومینیوم نیترات به خاک بسیار واگرا، و هم‌چنین افزودن ٪۳ سیمان، یا ٪۵ آهک، یا ٪۳ آلومینیوم نیترات به خاک واگرای این منطقه، موجب تثبیت آن می‌شود.

واژه‌های کلیدی: خاک واگرا، پین هول، هیدرومتری دوگانه، کرامب، تثبیت خاک.

* **نویسنده مسئول** javdanian@eng.sku.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.29]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.2.9]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.29]

مقدمه

تجربه‌های گذشته نشان می‌دهد که خواص مکانیکی اغلب خاک‌ها با افزایش رطوبت و اشباع شدن تغییر می‌کند. در برخی از خاک‌ها بر اثر افزایش رطوبت پدیده‌های خاصی بروز می‌کند که بعضاً به خسارات عمده‌ای در پروژه‌های عمرانی منجر می‌گردد. از انواع این خاک‌ها، خاک‌های واگرا هستند. خاک واگرا به خاکی اطلاق می‌شود که حالت فیزیکی-شیمیایی دانه‌های آن به گونه‌ای است که در تماس با آب ، ذرات منفرد رس پراکنده و از یک‌دیگر جدامی‌شوند [۱]، [۲]. در این حالت خاک رس به‌شدت فرسایش‌پذیر است، به‌طوری که حتی تحت تأثیر تنش‌های بسیار کوچک و با گرادیان هیدرولیکی کم روان می‌شود [۳]. وقتی خاک واگرا در تقابل با آب قرار می‌گیرد، ذرات رس متفرق شده و به‌صورت سوسپانسیون ته‌نشین می‌شوند [٤]. رس‌های واگرا در مقایسه با رس‌های معمولی دارای درصد سدیم محلول در آب بالاتری هستند [۵]، [٦].

شیب‌ها و سدهای خاکی بسیاری در اثر بروز پدیدهٔ واگرایی تخریب شدند [۷]. نخستین بار در استرالیا، مسئلهٔ تخریب، فرسایش و ایجاد حفره‌های بزرگ در بسیاری از سدهای خاکی کوتاه موجب شد تا انجمن حفاظت خاک استرالیا بررسی‌های گسترده‌ای در مورد روش‌های حفاظت و جلوگیری از ادامهٔ روند فرسایش ناشی از خاک‌های واگرا آغاز کند [۵].

ایجاد واگرایی مستلزم وجود یک مجرای نشت (مثلاً یک ترک) در خاک‌ریز یا تودهٔ خاک است. سپس فرسایش دیواره‌های سرتاسر مجرا به‌طور هم‌زمان اتفاق می‌افتد [۸]. رفتار خاک‌های واگرا متأثر از هر دو جنبه کانی‌شناسی و شیمیایی است که به‌علت حضور کانی‌های فعال رس همانند مونت‌موریونیت و حضور کاتیون‌های سدیم است [۹]. ذرات رس شامل کانی‌هایی هستند که با کانی‌های تشکیل دهندهٔ ذرات ماسه و لای کاملاً متفاوتند. رس‌ها معمولاً ذرات کریستالی صفحه‌ای شکلی هستند که از دو واحد اصلی سیلیکات‌های چهاروجهی ($(Si)_2 O_5$) و آلومینیوم‌هیدروکسید هشت‌وجهی ($Al (OH)_3$) ساخته شده‌اند. این دو واحد در لایه‌های متناوب روی هم قرار گرفته‌اند. به‌علت نقص در ساختار شبکهٔ کریستالی، یون‌های Al^{3+} جای‌گزین یون‌های Si^{4+} می‌شوند و برخی از یون‌های Al^{3+} با یون‌های Mg^{2+} جای‌گزین

می‌شوند. در نتیجه، کانی‌های رس از لحاظ بار الکتریکی مثبت، ضعف دارند، یعنی دارای یک بار منفی دائمی هستند و برای جبران این ضعف، کاتیون‌های آب موجود در اطراف خود را جذب می‌کنند [۵].

در ترکیب تبادلی یون‌ها، راحت‌تر آن است که Na^{+} با Ca^{2+} یا Al^{3+} جای‌گزین شود. یون‌های سدیم (که در سطح ذرات خاک واگرا حضور دارند) تک‌ظرفیتی هستند و نسبت به یون‌های دوظرفیتی یا سه ظرفیتی کلسیم و آلومینیوم تأثیر کم‌تری روی خنثی کردن بارِ روی ذرات کلوئیدی و جلوگیری از تورم و واگرایی ذرات خاک دارند [۱۰]. بنابراین ذرات کلوئیدی منفرد یک‌دیگر را دفع کرده و در محلول، معلق باقی می‌مانند [۹]. به‌عبارت دیگر در فرایند واگرایی کاتیون‌های یک‌ظرفیتی سدیم در روی سطح ذرات رس باعث افزایش ضخامت لایهٔ دوگانه و هم‌چنین افزایش نیروی دافعهٔ بین ذرات می‌شوند. زمانی‌که نیروی دافعهٔ بین ذرات از نیروی جاذبه بیش‌تر باشد، وجود آب به‌راحتی و سهولت ذرات خاک را از یک‌دیگر جدا کرده و جابه‌جا می کند. فرسایش این نوع خاک‌ها نیازمند جریان آب با سرعت زیاد نیست و ذرات رس ممکن است به‌علت نیروهای دافعه حتی در آب ساکن هم به‌صورت کلوئیدی شناور شوند، در حالی‌که برای فرسایش سایر رس‌ها سرعت جریان آب باید از یک حد مشخص بیش‌تر باشد و در کم‌تر از آن هیچ‌گونه فرسایشی در خاک رخ نمی‌دهد [۱۱].

ساخت پروژه‌های عمرانی در نواحی دارای خاک‌های واگرا بسیار مشکل است و احتمال فرسایش خاک همواره خطری جدی برای سازه‌های مستقر بر نهشته‌های دارای خاصیت واگرایی محسوب می‌شود. بنابراین شناسایی و هم‌چنین اصلاح خاک‌های واگرا اهمیت زیادی دارد. روش‌های مختلفی برای کنترل واگرایی وجود دارد که افزودن مواد شیمیایی به خاک نسبت به سایر روش‌ها ساده‌تر و اقتصادی‌تر است. از این رو تقویت خواص خاک با افزودن مواد تثبیت کننده به‌عنوان راهکاری مناسب در مواجهه با خاک‌های واگرا است.

در رابطه با اثر افزودن آهک به خاک تحقیقات گسترده‌ای در سرویس حفاظت خاک امریکا صورت گرفته است. سدهای بسیاری در اوکلاهاما با استفاده از این روش ترمیم شده‌اند. در تحقیقات انجام شده در اوکلاهاما مشخص شد که به‌طورکلی بر اثر افزودن آب‌آهک دامنهٔ خمیری خاک کاهش و حد انقباض آن افزایش می‌یابد. اگر خاک رس واگرای بررسی شده با یک یا دو درصد آهک زنده مخلوط شود، درصد واگرایی کاهش می‌یابد [۹].

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.29]

به‌طور معمول افزایش ۱ تا ۵ درصد وزنی آهک هیدراته به خاک رس واگرا، موجب جای‌گزینی کاتیون‌های کلسیم به‌جای کاتیون‌های سدیم خاک شده و علاوه بر کاهش خاصیت خمیری، پتانسیل واگرایی آن را نیز کاهش می‌دهد. افزایش آهک با کاهش خاصیت خمیری، از ایجاد درز و ترک ناشی از انقباض در خاک نیز جلوگیری کرده، جریان متمرکز و شدید آب به داخل توده خاک را که می‌تواند موجب فرسایش درونی آن شود، کاهش می‌دهد. براساس نتایج تحقیقات انجام شده افزایش ۰/۵ تا ۲ درصد وزنی آلومینیوم‌سولفات به خاک، علاوه بر افزایش مقاومت در برابر آب‌شستگی، باعث افزایش نفوذپذیری، کاهش پتانسیل تورم‌پذیری و افزایش مقاومت برشی خاک نیز می‌شود. افزودن گچ آب‌دار به خاک واگرا با انجام فرآیند جای‌گزینی یون‌های کلسیم به‌جای سدیم باعث تجمع ذرات رس و کاهش پتانسیل واگرایی می‌شود. مقدار گچ مورد نیاز باید متناسب با مشخصات شیمیایی خاک تعیین شود. در این روش نیز به‌علت قابلیت انحلال نسبتاً کم‌تر گچ در آب، عمل اختلاط و تأثیر گچ ممکن است با اشکالاتی همراه باشد [۱۲].

نتایج تحقیقات انجام شده در سال‌های اخیر نشان داده است که افزایش مقادیر کم سیمان به خاک بستر (۰/۸ تا ٤ درصد) توانسته است با جای‌گزینی یون‌های کلسیم آزاد موجود در سیمان پرتلند و نیز با ایجاد خاصیت چسبندگی ناشی از هیدراسیون سیمان، ذرات رس واگرا را به‌خوبی تثبیت کرده و خاصیت فرسایش‌پذیری آن را به میزان چشم‌گیری کاهش دهد، به‌گونه‌ای که مخلوط‌های خاک–سیمان حاصل به‌خوبی قادر به تحمل جریان آب با سرعت‌های تا ۲ متر در ثانیه نیز بوده است [۱۳].

در این تحقیق با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی به بررسی خاک‌های اطراف کانال انتقال آب سیمین دشت–سمنان پرداخته شده است. روش کلی در این تحقیق شامل بازدید محلی، تهیهٔ نمونه‌های خاک، تهیه و ساخت تیمارهای آزمایشی مختلف، انجام آزمایش‌های شناسایی خاک بررسی شده، و انجام آزمایش‌های هیدرومتری دوگانه و پین‌هول روی نمونه‌های خاک اصلی و تیمارهای بررسی شده است. اثر افزودن مقادیر مختلف سیمان، آهک و آلومینیوم‌نیترات در اصلاح واگرایی خاک‌های رسی منطقه سیمین‌دشت–سمنان بررسی و آزمایش واقع شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.29]

منطقهٔ بررسی شده

حوزهٔ آب‌ریز حبله‌رود با مساحت تقریبی ۳۳۱۰ کیلومترمربع در شمال شهرستان گرمسار در استان سمنان واقع شده است. کانال انتقال آب سیمین‌دشت به گرمسار در استان سمنان با طول ۳۷ کیلومتر در حدفاصل سد انحرافی سیمین‌دشت و سد انحرافی گرمسار با جهت شمال-جنوب در امتداد رودخانهٔ حبله‌رود احداث شده است. این کانال در بسیاری از نقاط دچار خرابی‌های چشم‌گیری شده است. در پوشش‌های بتنی کانال، آب‌شستگی و فرسایش خاک در زیر پوشش منجر به ایجاد ترک‌هایی در بتن شده و یا از روی خاک‌ریزها در اثر ترک‌های انقباضی خاک یا حفاری کانال به‌صورت نادرست ایجاد شده که در آخر به تخریب سازه منجر شده است. شکل‌های ۱ و ۲ نمونه‌هایی از خرابی‌های ناشی از وجود خاک‌های واگرا در کانال انتقال آب سیمین‌دشت به گرمسار را نشان می‌دهند. باید حتی‌الامکان از اجرای سامانه‌های انتقال آب در بسترهای واگرا اجتناب کرد و چنان‌چه احداث سامانه در چنین شرایطی اجتناب‌ناپذیر باشد باید تدابیر لازم به‌منظور جلوگیری از ایجاد خسارات اتخاذ شود. قابل ذکر است که بخشی از خسارت‌های موجود در کانال نیز به‌علت وجود خاک‌های تورم‌زا در بستر کانال بوده است [۱۳].

شکل ۱. کانال انتقال آب سیمین‌دشت به گرمسار

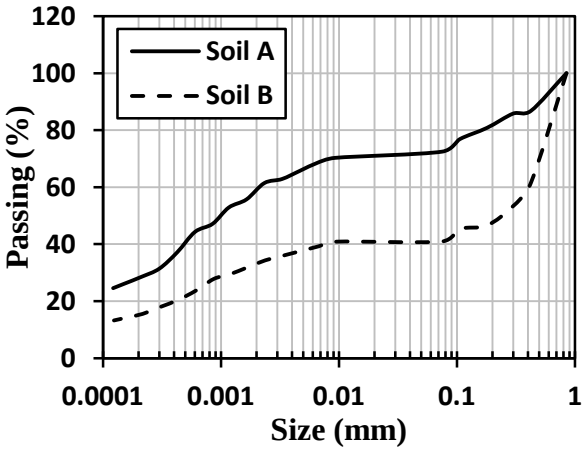
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.29]

شکل ۲. خرابی موجود در مجاورت کانال انتقال آب سیمین‌دشت به گرمسار

بررسی‌های آزمایشگاهی

۱. مصالح مصرفی

در این تحقیق اثر میزان سیمان (تیپ ۱ کلاس ۳۲۵)، آهک و آلومینیوم‌نیترات در تثبیت خاک واگرای منطقه سیمین‌دشت گرمسار بررسی شده است. دو نوع خاک رسی خاصیت واگرایی اصلاح شده که مشخصات و منحنی دانه‌بندی آن‌ها به‌ترتیب در جدول ۱ و شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳. منحنی دانه‌بندی خاک‌های واگرای استفاده شده در این تحقیق

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.29]

جدول ۱. مشخصات خاک‌های واگرای استفاده شده در این تحقیق

خاک	درصد رطوبت طبیعی (٪)	حد مایع (٪)	حد خمیری (٪)	شاخص خمیری (٪)	درصد رطوبت بهینه (٪)	G_s
A	۱۳/۸٤	۱۷/٦۳	۱٥/۰۹	۲/٥٤	۱٥	۲/۷۲
B	۳/۰۲	۲۲/٤٤	۱٦/۱۱	٦/۳۳	۱۱	۲/٦٦

نمونه‌های خاک رسی آزمایش شده در این تحقیق پس از بازرسی محلی و با انجام آزمایش‌های کرامب صحرایی و هم‌چنین آزمون‌های آزمایشگاهی هیدرومتری دوگانه و هم‌چنین تست‌های شیمیایی که نشان از واگرایی خاک داشته‌اند، تهیه شده است.

آزمایش کرامب این تحقیق مطابق با استاندارد ASTM D6572 انجام شده است [١٤]. آزمایش کرامب را امرسون[1] [١٥] معرفی کرد و در ادامه جرارد[2] [۹] اصلاح شد. اگرچه آزمایش کرامب روش قابل اطمینانی برای شناسایی دقیق خاک‌های واگرا نیست اما این آزمایش شناخت اولیهٔ خوبی از فرسایش‌پذیری خاک رس ارائه می‌دهد [١٦]. نتایج آزمایش کرامب نشان داده که خاک‌های A و B به‌ترتیب واگرا و نیمه‌واگرا هستند.

آزمایش هیدرومتری دوگانه بر اساس استاندارد ASTM D4221 بر خاک‌های استفاده شده در این تحقیق انجام شد [١٧]. بر اساس نتایج آزمایش‌های هیدرومتری دوگانه درصد واگرایی بدین‌صورت حاصل شد:

$$\text{درصد واگرایی نمونه } A = \frac{\text{میانگین درصدذرات کوچک‌تر از } \mathbf{5} \text{ میکرون در آزمایش دوم در ده آزمایش}}{\text{میانگین درصدذرات کوچک‌تر از } \mathbf{5} \text{ میکرون در آزمایش اول در ده آزمایش}} = \frac{59.76}{85.37} \times 100 = 70\ \% \quad (۱)$$

$$\text{درصد واگرایی نمونه } B = \frac{\text{میانگین درصدذرات کوچک‌تر از } \mathbf{5} \text{ میکرون در آزمایش دوم در ده آزمایش}}{\text{میانگین درصدذرات کوچک‌تر از } \mathbf{5} \text{ میکرون در آزمایش اول در ده آزمایش}} = \frac{60.59}{92.29} \times 100 = 65.5\ \% \quad (۲)$$

بر اساس نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه، خاک‌های A و B هر دو واگرا است و با واگرایی شدید ارزیابی شد.

1. Emerson
2. Sherard

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.29]

نتایج به‌دست آمده از انجام تست‌های شیمیایی (جدول ۲) نیز نشان از واگرایی خاک‌های A و B داشته است. چنان‌که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، غلظت یون سدیم در خاک‌هـای بررسـی شده بسیارزیاد است.

جدول ۲. نتایج آزمون‌های شیمیایی

نمونه خاک	pH (25°C)	غلظت منیزیم (meq/Lit)	غلظت کلسیم (meq/Lit)	غلظت پتاسیم (meq/Lit)	غلظت سدیم (meq/Lit)
A	۷/۸	۱۵۵	۲۰۹/۵	۸/۳	۱۷۹۳
B	۸/۱۲	۳۸۵	۲۰۵	۱۱/۰۳	۱۵۷٦

۲. برنامه آزمایش‌ها

با توجه به این‌که هدف اصلی این تحقیق بررسی اثر مقادیر مختلف آهک، سیمان و آلومینیوم نیترات بر میزان واگرایی خاک است، درصدهای مختلفی از این مواد در قالب تیمارهای آزمایشی بررسی شدند. بدین‌منظور ابتدا، سیمان، آهک و نمونه‌های خاک به‌مدت ۲٤ ساعت و در دمای ٤۰ درجه سانتی‌گراد در گرم‌خانه خشک شدند. نسبت‌های پوزولان و آهک در مخلوط‌های سیمان-خاک، آهک-خاک و آلومینیوم‌نیترات-خاک به‌صورت نسبت وزن خشک آن‌ها به وزن خشک مخلوط تعریف شده است. لازم به ذکر است که درصدهای آهک، سیمان و آلومینیوم‌نیترات به‌کار رفته در این پژوهش برابر صفر، ۳، ۵، و ۷ درصد است. روش عمل‌آوری نمونه‌های حاوی آهک، روش استفاده شده بل[1] (۱۹۹٦) [۱۸] و روش عمل‌آوری نمونه‌های حاوی سیمان روش استفاده شده کولیس[2] و همکاران (۲۰۰۵) [۱۹] بوده است. جزئیات تیمارهای به‌کار رفته در این پژوهش در جدول ۳ ارائه شده است.

۳. روش انجام آزمایش

آزمایش‌های پین‌هول مطابق با استاندارد ASTM D4647 [۲۰] و با استفاده از دستگاه پین‌هول ساخت صنایع مکانیک خاک ایران (شکل ٤) در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه سمنان روی انواع نمونه‌های اصلاح شده و اصلاح نشده خاک‌های A و B انجام شد. نمونه

1. Bell
2. Kolias

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.29]

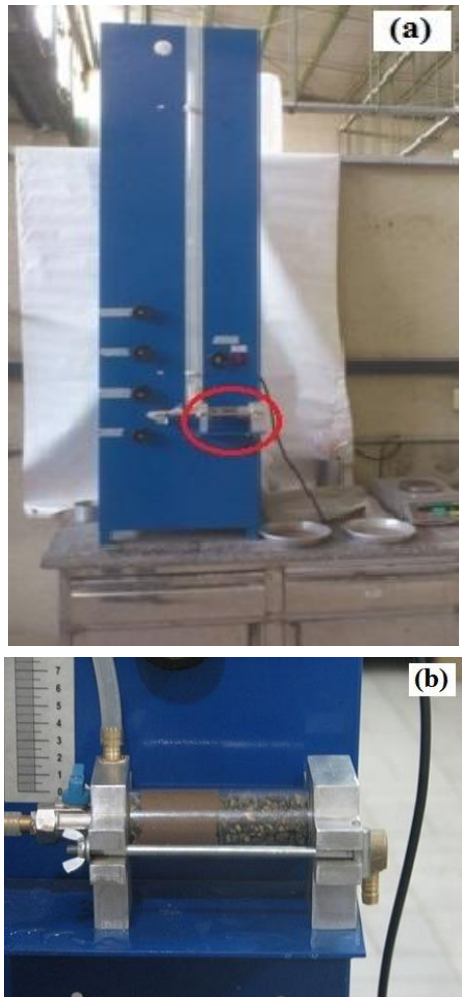
آزمایش پین‌هول به قطر ۳/۲ سانتی‌متر و طول ۳/۸ سانتی‌متر است که یک سوراخ به قطر ۱ میلی‌متر توسط یک سوزن، در وسط آن ایجاد شد. در سه تراز ۵، ۱۸، ۳۸، و ۱۰۲ سانتی‌متری، آب از داخل این نمونه عبور داده شد و با توجه به میزان دبی خروجی، رنگ آب خروجی و قطر نهایی سوراخ ایجاد شده در نمونه میزان واگرایی تعیین شد.

جدول ۳. خلاصه آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش

Soil	Sample No.	Cement (%)	Lime (%)	Aluminum nitrate (%)
A	۱	۰	۰	۰
	۲	۳	۰	۰
	۳	۵	۰	۰
	٤	۷	۰	۰
	۵	۰	۳	۰
	٦	۰	۵	۰
	۷	۰	۷	۰
	۸	۰	۰	۳
	۹	۰	۰	۵
	۱۰	۰	۰	۷
B	۱۱	۰	۰	۰
	۱۲	۳	۰	۰
	۱۳	۵	۰	۰
	۱٤	۷	۰	۰
	۱۵	۰	۳	۰
	۱٦	۰	۵	۰
	۱۷	۰	۷	۰
	۱۸	۰	۰	۳
	۱۹	۰	۰	۵
	۲۰	۰	۰	۷

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.29]

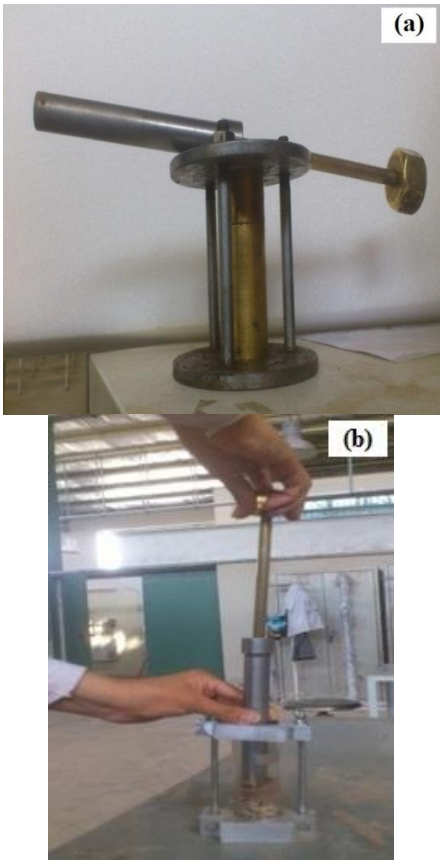
برای تهیه نمونه آزمایشی پین هول مطابق با استاندارد از چکش تراکم هاروارد استفاده شد (شکل ۵). به‌این‌ترتیب که پس از اضافه کردن رطوبت بهینه مربوط به هر یک از مخلوط‌های بررسی شده، مخلوط یک‌نواخت حاصل شده در قالب پین هول و با چکش هاروارد در ۵ لایه و هر لایه با ۱٦ ضربه چکش متراکم شد. قابل ذکر است که رطوبت بهینه برای هر یک از تیمارها با استفاده از آزمایش تراکم استاندارد (ASTM D1557) تعیین شد [۲۱]. نمونه‌های



شکل ٤. الف) دستگاه پین‌هول استفاده شده در این تحقیق، ب) محل قرارگیری نمونه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.29]

ساخته شده به‌منظور عمل‌آوری داخل کیسه پلاستیکی در محیط آزمایشگاه نگه‌داری و پس از رسیدن به سن مورد نظر (یک روز) مورد آزمایش پین‌هول قرار گرفتند.



شکل ۵. الف) تجهیزات تراکم هاروارد، ب) نحوهٔ متراکم کردن نمونه آزمایش پین هول به‌وسیلهٔ چکش هاروارد

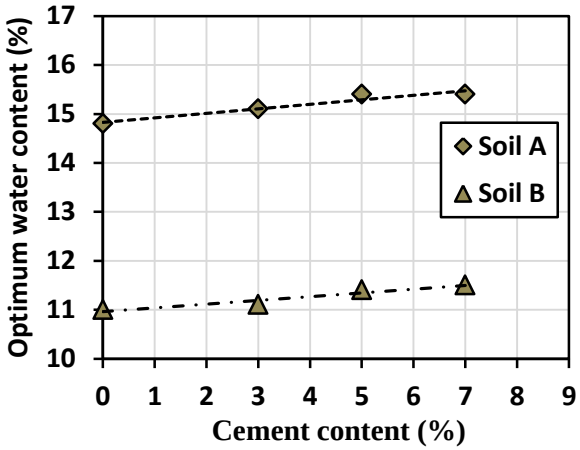
نتایج و بحث

۱. نتایج آزمایش تراکم

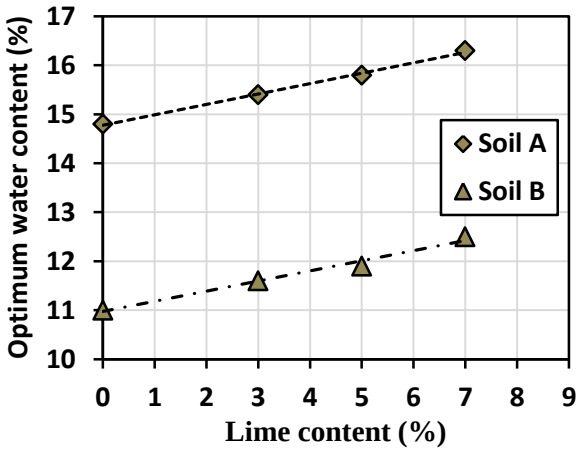
آزمایش‌های تراکم به‌منظور تعیین درصد رطوبت بهینه تیمارهای مورد نظر صورت پذیرفت. تأثیر مقدار سیمان و آهک بر درصد رطوبت بهینه به‌ترتیب در شکل‌های ٦ و ۷ و ۸ نشان داده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.29]

شده است. شکل‌های ٦ و ۷ نشان می‌دهد که با افزایش مقدار سیمان و آهک، درصد رطوبت بهینه افزایش می‌یابد که این مطلب می‌تواند ناشی از نرمی سیمان و آهک مصرفی باشد. با افزایش درصد سیمان و آهک و به‌علت نرمی زیاد آن‌ها، جذب آب سطحی به‌وسیلهٔ ذرات سیمان یا آهک افزایش می‌یابد و این امر افزایش رطوبت بهینه را به‌دنبال داشته است. با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که افزودن آلومینیوم‌نیترات تأثیر زیادی بر میزان رطوبت بهینه نداشته است.

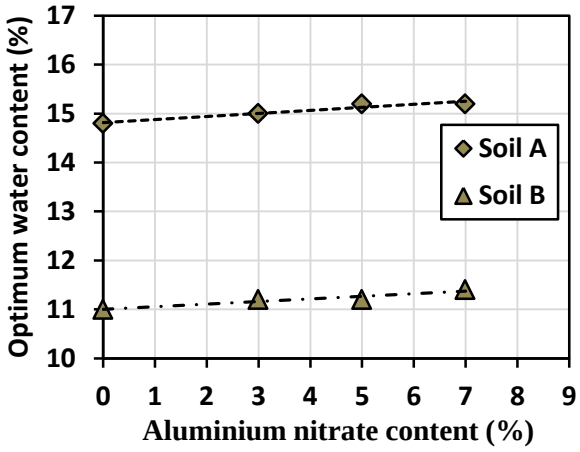


شکل ٦. تأثیر مقدار سیمان بر درصد رطوبت بهینه



شکل ۷. تأثیر مقدار آهک بر درصد رطوبت بهینه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.29]



شکل ٨. تأثیر مقدار آلومینیوم‌نیترات بر درصد رطوبت بهینه

٢. نتایج آزمایش پین‌هول

آزمایش پین‌هول روی همهٔ نمونه‌های تهیه شده با سن ٢٤ ساعت و با دو تکرار انجام گرفت. نتایج آزمایش پین‌هول نشان داده که میزان واگرایی خاک A شدید و خاک B واگرا است. در آزمایش‌های صورت گرفته بر خاک A و B در حالت معمولی و بدون افزودن تثبیت کننده، قطر سوراخ بیش از دو برابر شده و رنگ آب خروجی نیز تیره بوده است (جدول ٤) که این نشان از میزان بالای پتانسیل واگرایی خاک‌های آزمایش شده دارد.

جدول ٤. نتایج تست پین‌هول بر خاک‌های A و B

Soil	Head (mm)	Time (min)	رنگ آب خروجی	دبی آب خروجی	قطر نهایی نقب	توضیحات	Result
A	٥٠	٥	تیره	١/١	≤٢ برابر قطر سوزن	پایان تست	خیلی واگرا
B	٥٠	٥	تیره	٠/٩			
	٥٠	٥	تیره	١/٢	≤٢ برابر قطر سوزن	پایان تست	واگرا

با افزودن آهک، سیمان و آلومینیوم نیترات به‌میزان ٣، ٥ و ٧ درصد مشاهده می‌شود که رفتار واگرایی خاک‌های A و B اصلاح می‌شود، زیرا هم دبی خروجی و هم قطر نهایی سوراخ، نسبت به‌حالت خالص، کاهش می‌یابد. اثر افزودن درصدهای مختلف آهک، سیمان و آلومینیوم نیترات به خاک‌های A و B به‌ترتیب در جدول‌های ٥، ٦ و ٧ نشان داده شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.29]

جدول ۵. اثر افزودن آهک به خاک‌های A و B

گروه واگرایی	رنگ آب خروجی در آخرین هد مورد بررسی	دبی خروجی در آخرین هد مورد بررسی	قطر نهایی سوراخ	آهک (٪)	خاک
ND3	نسبتاً تیره	۲	۲ برابر قطر سوزن	۳	A
ND2	اندکی تیره	۳/۱۳	۱/۵ برابر قطر سوزن	۵	
ND1	شفاف	۳/۵	برابر با قطر سوزن	۷	
ND2	اندکی تیره	۵	۱/۵ برابر قطر سوزن	۳	B
ND1	شفاف	۱/۴۷	برابر با قطر سوزن	۵	
ND1	شفاف	۰/۷۱	برابر با قطر سوزن	۷	

جدول ٦. اثر افزودن سیمان به خاک‌های A و B

گروه واگرایی	رنگ آب خروجی در آخرین هد مورد بررسی	دبی خروجی در آخرین هد مورد بررسی	قطر نهایی سوراخ	سیمان (٪)	خاک
ND3	تیره	**۳/۳۳**	۲ برابر قطر سوزن	۳	A
ND1	شفاف	**۲**	برابر با قطر سوزن	۵	
ND1	شفاف	**۲**	برابر با قطر سوزن	۷	
ND1	کاملاً شفاف	**۱/۳**	برابر با قطر سوزن	۳	B
ND1	کدر	**۲/۵**	برابر با قطر سوزن	۵	
ND1	شفاف	**۲/۲۸**	برابر با قطر سوزن	۷	

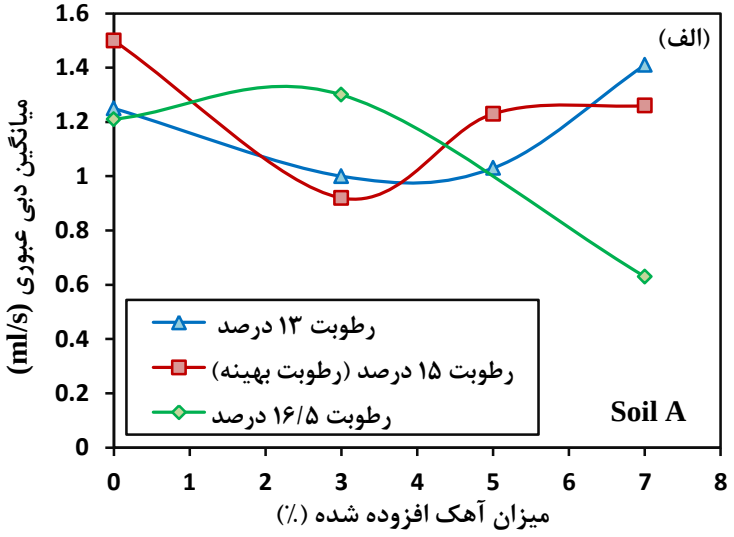
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.29]

جدول ۷. اثر افزودن آلومینیوم‌نیترات به خاک‌های A و B

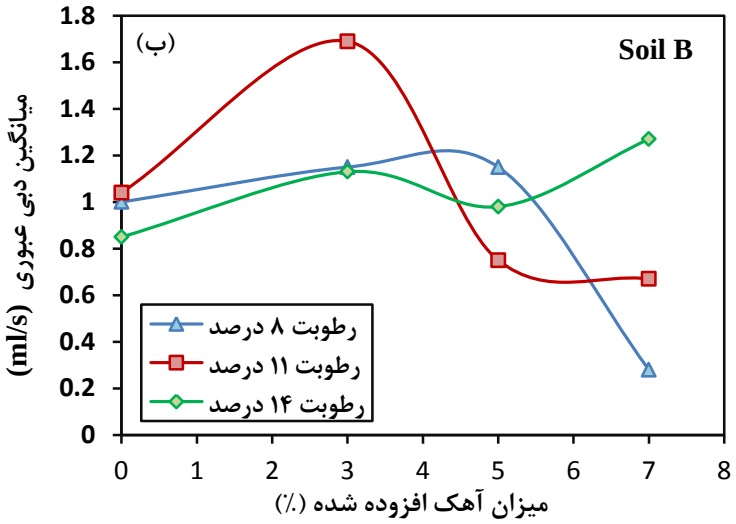
گروه واگرایی	رنگ آب خروجی در آخرین هد مورد بررسی	دبی خروجی در آخرین هد مورد بررسی	قطر نهایی سوراخ	آلومینیوم نیترات (٪)	خاک
ND1	شفاف	۱/۵	برابر با قطر سوزن	۳	A
ND1	شفاف	۱/۲	برابر با قطر سوزن	۵	
ND1	شفاف	۰/۸	برابر با قطر سوزن	۷	
ND1	شفاف	۱/۳	برابر با قطر سوزن	۳	B
ND1	شفاف	۱/۰	برابر با قطر سوزن	۵	
ND1	شفاف	۰/۸۵	برابر با قطر سوزن	۷	

تغییرات میانگین دبی آب عبوری از نمونه‌های خاک‌های واگرای A و B و هم‌چنین نمونه‌های اصلاح شدهٔ این خاک‌ها با آهک، سیمان و آلومینیوم نیترات در آزمایش‌های پین‌هول به‌ترتیب در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.

چنان‌که در شکل ۹ الف مشاهده می‌شود، رفتار نمونه‌های خاک A اصلاح شده با آهک از روند خاصی پیروی نمی‌کند، اما با احتیاط می‌توان گفت که خاک A مستقل از رطوبت نمونهٔ خاک با ٪۴/۵ آهک غیرواگرا خواهد شد.

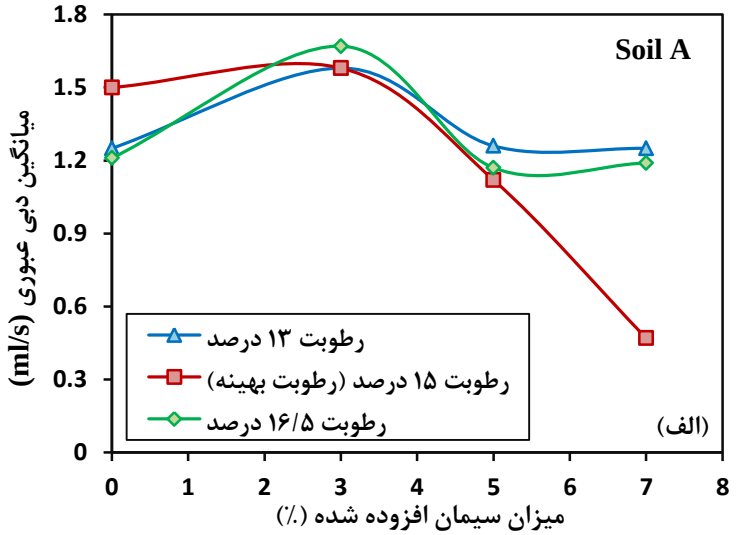


[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.29]

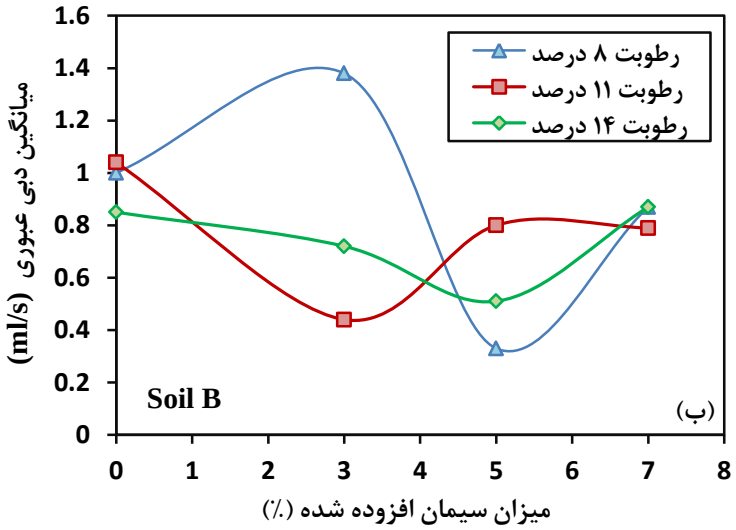


شکل ۹. تغییرات میانگین دبی آب عبوری در اثر تثبیت با آهک، الف) خاک A، ب) خاک B

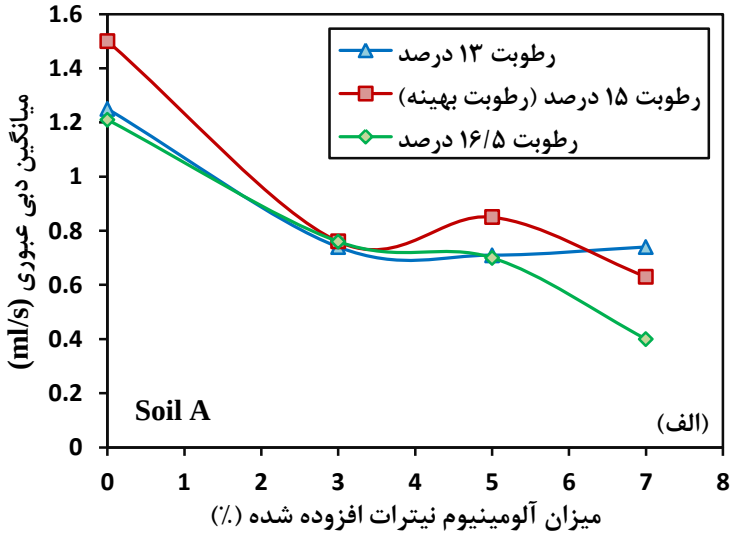
افزایش میزان اصلاح در خاک‌های واگرای A و B به‌روش تثبیت با سیمان مستقل از رطوبت نمونهٔ خاک آزمایش شده بوده است (شکل ۱۰).



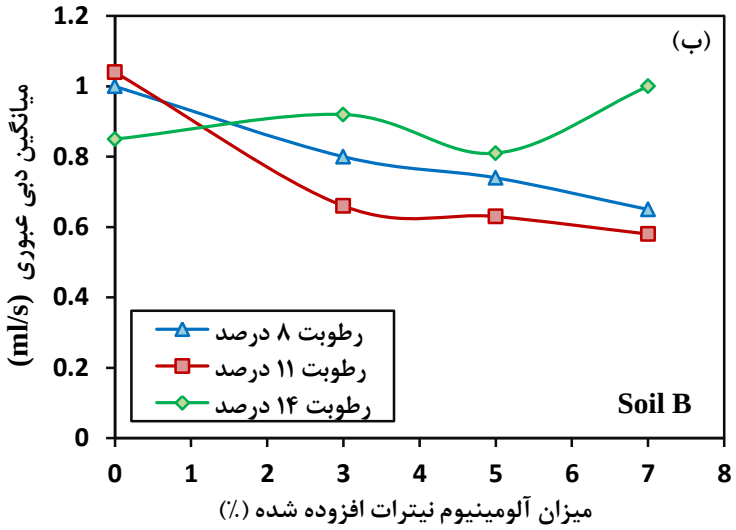
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.29]



شکل ۱۰. تغییرات میانگین دبی آب عبوری در اثر تثبیت با سیمان، الف) خاک **A**، ب) خاک **B**



[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.29]



شکل ۱۱. تغییرات میانگین دبی آب عبوری در اثر تثبیت با آلومینیوم نیترات، الف) خاک A، ب) خاک B

رفتار نمونه‌های خاک A تثبیت‌شده با آلومینیوم‌نیترات نسبت به سایر تثبیت‌کننده‌ها از روند مشخصی پیروی می‌کند (شکل ۱۱). با افزایش میزان آلومینیوم‌نیترات افزوده‌شده (در هر سه رطوبت)، اندازهٔ قطر سوراخ پس از پایان تست کاهش یافته و نرخ این کاهش با افزایش آلومینیوم نیترات کاهش می‌یابد (شکل ۱۱).

بررسی میانگین دبی آب عبوری در آزمایش‌های پین‌هول انجام شده در این تحقیق بر خاک‌های واگرای A و B نشان می‌دهد که رفتار نمونه‌های اصلاح‌شده با آهک و سیمان از الگوی مشخصی پیروی نمی‌کند اما در نمونه‌های تثبیت‌شده با آلومینیوم نیترات رفتار منظم‌تری مشاهده شده است (شکل‌های ۹ تا ۱۱). بنابراین رفتار نمونه‌های تثبیت‌شده با آلومینیوم‌نیترات به هنگام وقوع پدیدهٔ آبشستگی قابل پیش‌بینی خواهد بود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق شناسایی و اصلاح خاک‌های واگرا با استفاده از تحقیقات آزمایشگاهی بررسی شد. بر اساس آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، این نتایج حاصل شده است:

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.29]

۱. نتایج آزمون‌های انجام‌شده در این تحقیق نشان‌دهندهٔ آن است که واگرایی خاک A با افزودن ۵٪ سیمان، یا ۵٪ آهک (بدون برطرف شدن کامل پدیدهٔ آب‌شستگی) یا ۳٪ آلومینیوم نیترات اصلاح شده و هم‌چنین خاصیت واگرایی خاک B با افزودن افزودن ۳٪ سیمان، یا ۵٪ آهک یا ۳٪ آلومینیوم‌نیترات اصلاح شده است. تفاوت در میزان سیمان، آهک یا آلومینیوم نیترات مورد نیاز برای اصلاح خاصیت واگرایی این دو نمونه می‌تواند مربوط به نوع کانی‌های تشکیل‌دهندهٔ این دو نوع خاک باشد.

۲. نتایج آزمایش‌های پین‌هول نشان داده که میزان واگرایی نمونه‌ها در رطوبت بهینه کم‌تر از سایر رطوبت‌ها است.

۳. رس‌های با پلاستیسیتهٔ پایین نیز مستعد واگرایی هستند.

٤. با توجه به این‌که در تست‌های شیمیایی میزان کل یون‌های محلول در عصارهٔ اشباع بیش‌تر از ۱۰۰ میلی‌اکی‌والانت در لیتر است، نتایج تست‌های شیمیایی دقت کافی ندارد. به‌عبارت دیگر در خاک‌های دارای املاح و نمک زیاد، شناسایی خاصیت واگرایی تنها به کمک آزمایش‌های شیمیایی مقدور نیست.

۵. برای یک خاک مشخص، هر مادهٔ تثبیت کننده باید به‌میزان مشخصی به خاک افزوده شود و افزودن بیش از آن مقدار تأثیری در اصلاح و بهبود رفتار خاک نخواهد داشت. به‌عبارت دیگر درصد اختلاط هر مادهٔ شیمیایی با خاک واگرا در هر پروژه باید با آزمایش‌های مختلف تعیین شود.

٦. نرخ اصلاح واگرایی نمونه‌های آزمایش شده، با افزایش میزان مواد تثبیت‌کننده کاهش یافته و تقریباً به مقدار ثابتی رسیده است..

۷. آلومینیوم‌نیترات در مقایسه با آهک اصلاح بهتر و بیش‌تری روی نمونه‌های خاک‌های واگرا انجام داده است. چنان‌که می‌دانیم کاتیون موجود در آهک، کلسیم (Ca^{2+}) است و کاتیون موجود در آلومینیوم نیترات، آلومینیوم (Al^{3+}) است. بنابراین یون آلومینیوم در مقایسه با یون کلسیم، به نحو مناسب‌تری در ساختار رس‌های واگرا جای‌گزین می‌شود.

۸. مقایسهٔ نتایج آزمایش‌های پین‌هول انجام شده بر نمونه‌های اصلاح‌شده با آلومینیوم-

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.29]

نیترات، آهک و سیمان بیان‌گر آن است که نمونه‌های تثبیت‌شده با آلومینیوم‌نیترات در مقایسه با دو مادهٔ افزودنی دیگر در زمان کوتاهتری تثبیت می‌شوند.

۹. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق بیان‌گر آن است که تنها با استناد به نتایج یکی از آزمایش‌های واگرایی نمی‌توان با قاطعیت در مورد میزان واگرایی خاک‌ها اظهار نظر کرد.

منابع

۱. بلوری‌بزاز ج.، معروف م. ع.، *شناسایی و ارزیابی خصوصیات مکانیکی خاک‌های رمبنده (مطالعه موردی منطقه شمال شرق ایران)*، نشریهٔ زمین‌شناسی مهندسی، جلد پنجم، شماره ۱ و ۲ (۱۳۹۱).

۲. معروف م. ع.، بلوری‌بزاز ج.، *اصلاح و به‌سازی خاک‌های رمبنده*، نشریه زمین‌شناسی مهندسی ایران، جلد هشتم، شماره ٤ (۱۳۹۳).

3. ICOLD Bulletin, "Dispersive soils in Embankment Dams" No. 77 (1990).

4. Foster M., Fell R., Spannagle M., "A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 37, No. 5 (2000) 1025-1061.

5. Van de Graaff R., Patterson R.A., "Explaining the mysteries of salinity sodicity, SAR and ESP in on-site practice", Conference: Advancing On-site Wastewater Systems, University of Armidale, New England, September (2001) 25-27.

6. Edgar H.N., "Soil mechanics note No. 13: Dispersive clays. Soil Conservation Service", United States Department of Agriculture, Washington, D.C. (1991)11-12.

7. Indraratna B., Nutalaya P., Kuganenthira N., "Stabilization of a dispersive soil by blending with fly ash", Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, Vol. 24, No. 3 (1991) 275-290.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.2.9]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.29]

8. Umesh T.S., Dinesh S.V., Sivapullaiah P.V., "Characterization of dispersive soils. Materials Sciences and Applications", Vol. 2, No. 6, (2011) 629-633.

9. Sherard J.L., Decker R.S., Pyker N.L., "Piping in earth dams of dispersive clays", Specially Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures, ASCE, Vol. 1, Part 1 (1972) 584-626.

10. Fan H., Kong L., "Empirical equation for evaluating the dispersivity of cohesive soil", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 50, No. 9 (2013) 989-994.

11. Flores-Berrones R., Lopez-Acosta N.P., "Internal erosion due to water flow through earth dams and earth structures", INTECH Open Access Publisher (2011) 283-306. DOI: 10.5772/24615.

12. Fan H.H., Kong L.W., "Study on the dispersivity of the dam core soil of the Ningmute Reservoir on the Yellow River", In Proceedings of the 3rd International Conference on Problematic Soils, Adelaide, Australia, 7-9 April (2010) 89-96.

13. Ebrahimpour F., "Identification of dispersive soils in semnan and their stabilization. M.Sc. Dissertation", Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran (2012).

14. ASTM Standard D6572: "Standard test method for determining dispersive characteristics of clayey soils by crumb test", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa. (2009).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.29]

15. Emerson W.W., "A classification of soil aggregrates based on their coherence in water", Australian Journal of Soil Research, Vol. 5 (1967) 47-57.

16. Kinney J.L., "Laboratory procedures for determining the dispersibility of clayey soils", Report No. REC-ERC-79-10, USBR, Denver, Colorado (1979).

17. ASTM Standard D4221: "Standard test method for dispersive characteristics of clay soil by double hydrometer", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa. (2009).

18. Bell F., "Lime stabilization of clay minerals and soila", Engineering Geology, Vol. 42 (4) (1996) 223-237.

19. Kolias S., Kasselouri-Rigopoulou V., Karahalios A., "Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement", Cement & Concrete Composites 27 (2005) 301-313.

20. ASTM Standard D4647: "Standard test method for identification and classification of dispersive clay by the pinhole test", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa. (2009).

21. ASTM Standard D1557: "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft3 (2,700 kN-m/m3))", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa. (2009).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.29]