

بررسی علل فرسایش خاک‌های دشت سیستان از دیدگاه زمین‌شناس مهندسی با نگرشی خاص به پدیده واگرایی

خامه چیان، ماشالله^۱ و رحیمی، ابراهیم^۱ و لشکری پور، غلامرضا^۲ و سلوکی، حمید رضا^۲

^۱ دانشگاه تربیت مدرس، گروه زمین‌شناسی مهندسی

^۲ دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی

(دریافت: ۸۱/۱۲/۲۱؛ پذیرش: ۸۳/۱۰/۲۶)

چکیده

سیستان، دشت هموار و پهناوری است که بر روی دلتای رودخانه‌ی هیرمند در شمال استان سیستان و بلوچستان قرار گرفته است. آورد زیاد نهشته‌ها در گذشته و در پی آن انباشت این نهشته‌ها سبب گردیده تا ژرفای دریاچه هامون کاهش یابد و امروزه شهر زابل در برخی جاها بلندای کمتری از این دریاچه داشته باشد. از این رو برای نگهداری شهر در برابر سیلاب‌های هیرمند، سیلاب‌بندهایی پیرامون شهر بنا شده است. فرسایش و تخریب این سیلاب‌بندها (که در گویش محلی گوره نامیده می‌شود) و خسارات ناشی از حمله سیلاب‌های محلی به تأسیسات شهری از مسائل عدیده سال‌های اخیر در این دشت بوده است. با توجه به این که دشت سیستان از تناوب خاک‌های ریزدانه رسی و سیلتی تشکیل گردیده است، لذا احتمال نقش داشتن پدیده واگرایی خاک در فرسایش و تخریب برخی از این خاک‌ها وجود دارد. خاک‌های واگرا در مجاورت آب‌های نسبتاً خالص پراکنده می‌شوند و محلول معلق کلوئیدی را بوجود می‌آورند. بنابراین نسبت به فرسایش و پدیده رگاب مستعد می‌باشند. چنین فرسایشی از سویی به شیمی رس‌ها و از سوی دیگر به نمک‌های محلول در آب منفذی - بویژه سدیم - و آب فرساینده بستگی دارد. در این تحقیق بر روی ۲۱ نمونه آزمایش‌های ویژه واگرایی صورت گرفت، لیکن واگرا بودن خاک‌های منطقه به‌رغم بالا بودن میزان سدیم رد شد. بنابراین، خاک‌های ریزدانه‌ی منطقه را می‌توان خاک‌های سدیم بالای غیر واگرا نام نهاد. فرسایش در این دشت از نوع مکانیکی و به شکل ریزشی ناشی از شسته شدن ذرات درشت‌تر فاقد چسبندگی (SM و SP) می‌باشد که در آستانه خاصی از سرعت آب رخ می‌دهد. پدیده ناپایداری خاک‌های ماسه‌ای در این نوع فرسایش نقش مهمی دارد.

واژه‌های کلیدی: سیستان، خاک‌های واگرا، فرسایش، سیلاب‌بند، روش‌های شناسایی.

مقدمه

مسأله فرسایش و شسته شدن خاک‌ها از دیرباز در زندگی بشر نقش داشته است. زمین‌شناسان، مهندسان راه و ساختمان و کشاورزان هرکدام به نوعی با این پدیده درگیر بوده‌اند و مطالعات و بررسی‌های زیادی نیز با دیدگاه‌های مختلف در این مورد انجام شده است. عواملی که در فرسایش خاک‌ها دخالت دارند بسیار متنوعند و بنا به موقعیت زمین‌شناسی و اقلیم منطقه اشکال مختلفی از فرسایش مشاهده می‌شود.

بنا به ویژگی‌های خاص منطقه مورد مطالعه که پوشیده از رسوبات ریزدانه رودخانه‌ای با محتوای نمک بالایی می‌باشد، نقش چندین پدیده را در فرسایش منطقه می‌توان بررسی کرد: پدیده واگرایی خاک‌ها، ناپایداری ماسه‌ها، خاک‌های انحلال‌پذیر و ... در این تحقیق به‌خاطر فرضیاتی که از قبل در مورد واگرا بودن خاک‌های منطقه مطرح بوده است بیشتر به این موضوع پرداخته شده است.

واگرایی در خاک‌های چسبنده زمانی رخ می‌دهد که نیروهای دافعه از نیروهای جاذبه بین ذرات رس تجاوز کند، بدین‌گونه با نزدیک شدن به حالت پراکنده (دفلوکوله)، در حضور آب نسبتاً خالص، ذرات یکدیگر را دفع کرده، به شکل سوسپانسیون کلوئیدی در می‌آیند. در خاک غیرواگرا آستانه مشخصی از سرعت آب وجود دارد که در زیر آن، آب جاری هیچ‌گونه فرسایشی را باعث نمی‌شود، ذرات مجزا در یکدیگر گیر می‌کنند و فقط بوسیله آب جاری با انرژی فرساینده معینی جدا می‌شود. برعکس، هیچ آستانه‌ای برای خاک‌های واگرا وجود ندارد، بلکه ذرات رس حتی در آب راکد نیز به حالت سوسپانسیون در آمده، بنابراین نسبت به فرسایش و رگاب بسیار مستعد می‌گردد.

مکانیسم فرسایش خاک‌های واگرا، از یک طرف شامل ساختار خاک و از طرفی دیگر شامل ویژگی اندرکنشی بین محلول‌های منفذی و فرساینده می‌باشد (Elges, 1985). مشاهده شده است که تنش لازم برای شروع فرسایش تحت تأثیر نوع کانی رسی موجود، مقدار pH، ماده‌ی آلی، دما، درصد رطوبت، بندش (تیکسوتروپی) و نوع و غلظت یون‌ها در محلول‌های منفذی و فرساینده می‌باشد (Bell and Walker, 2000).

ساختار خاک و اثرات اسمزی واقع در سطح ذرات رسی باعث تورم آنها می‌گردد. این تورم، نیروهای پیوندی بین ذره‌ای را کاهش می‌دهد و از فاکتورهای مهم در فرسایش خاک‌های چسبنده بوسیله آب جاری به حساب می‌آید. برای یک مایع فرساینده معین، مرز بین حالت فلوکوله (مجموع) و دفلوکوله (پراکنده) بستگی به مقدار غلظت نمک، مقدار نسبت جذب سدیم (SAR)، میزان pH و نوع کانی دارد.

حضور سدیم قابل تبادل، فاکتور شیمیایی مهمی در جهت کشاندن به سمت رفتار واگرایی خاک می‌باشد که بر حسب درصد سدیم تبدالی (ESP) بیان می‌شود:

$$ESP = \left(\frac{\text{Exchangeable Sodium}}{\text{Cation Exchangeable Capacity}} \right) \times 100 \quad (1)$$

که در آن CEC بر حسب میلی‌اکی‌والان در ۱۰۰ گرم رس خشک است.

یکی از روش‌های اصلی که در واگرا بودن خاک‌های رسی ادعا شده است، میزان کل نمک‌های محلول (Total Dissolved Solids) در آب منفذی است (Sherard *et al.*, 1976a). به عبارتی، هرچه میزان نمک‌های محلول در آب منفذی کمتر باشد، استعداد رس‌های اشباع در سدیم برای واگرایی بیشتر خواهد بود.

افزون بر آن مقدار آستانه‌ای برای کل نمک‌های محلول، تحت یک ESP معین وجود دارد که در بیشتر از آن، خاک به حالت فلوکوله (غیرواگرا) باقی می‌ماند. با این وجود، خاکی با ESP بالا که در ابتدا به حالت فلوکوله (ناشی از املاح نمکی بالا در آب منفذی) قرار دارد، می‌تواند با آبشویی به طرف واگرایی کشانده شود.

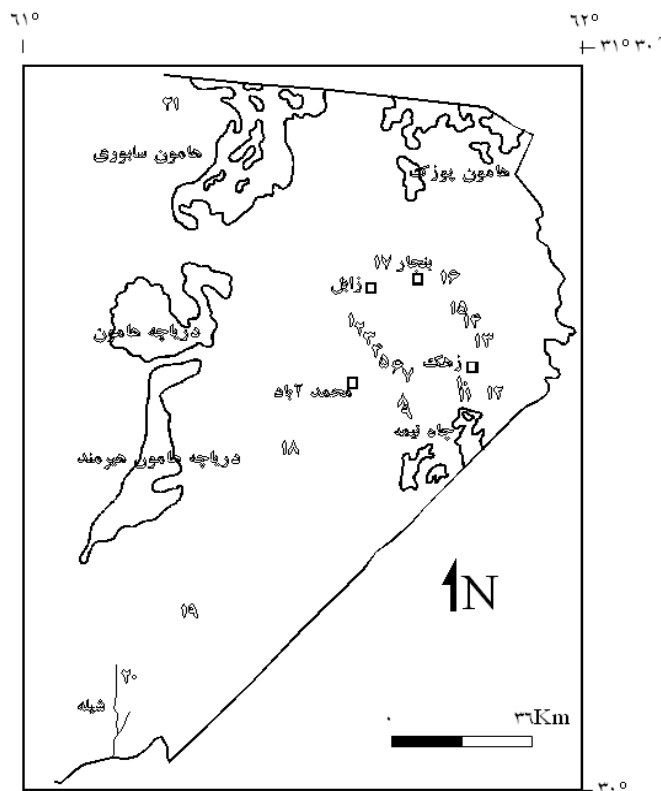
خاک‌های واگرا دارای نمک محلول بیشتری در آب منفذی نسبت به خاک‌های معمولی هستند. جهت کمی کردن نقش سدیم زمانی که در آب منفذی نمک‌های محلول وجود داشته باشد، از کمیت SAR استفاده می‌شود.

برطبق نظر (Bell *et al.*, 2000) اگر هیچ نمک آزادی وجود نداشته باشد استفاده از کمیت نسبت جذب سدیم (SAR: Sodium Absorption Ratio) جهت تعیین واگرایی عملی نیست، بنابراین از SAR زمانی برای شناسایی خاک‌ها استفاده می‌شود که میزان نمک‌های آزاد زیاد باشد (خاک‌های با TDS بزرگتر از ۴۰ میلی‌اکی‌والان در لیتر). این خاک‌ها در ابتدا به حالت فلوکوله هستند، اما با شستشوی نمک، واگرا می‌گردند. این مطلب در جای خود صحیح است، اما، باید به نوع کانی‌های رسی نیز توجه شود.

زمین‌شناسی و خاستگاه رسوبات دست سیستان

شهر زابل بر روی دلتای رودخانه‌ی هیرمند بنا گردیده است. این دلتا از گل و لای رودخانه‌ی هیرمند تشکیل شده است. رودخانه‌ی هیرمند از ارتفاع ۳۸۰۰ متری غرب کوه پغمان از رشته‌کوه‌های هندوکش در شمال افغانستان سرچشمه می‌گیرد. این رودخانه پس از طی مسیری بیش از ۱۰۰۰ کیلومتر به دشت سیستان می‌رسد. این دشت از رسوبات ریزدانه شامل رس و سیلت و به‌ندرت رسوبات درشت دانه در داخل رسوبات ریزدانه تشکیل گردیده و حدوداً ۵۰۰ متر ضخامت دارد (لشکری‌پور و غفوری، ۱۳۷۷). عدم یکنواختی در بافت خاک منجر به

تشکیل لایه‌های متناوب خاک گردیده است. این تناوب در پروفیل‌های طولی و عرضی مشخص می‌باشد. این رسوبات ریزدانه دارای نفوذپذیری کمی هستند. با توجه به موقعیت آب‌شستگی‌ها (مناطق با پتانسیل زیاد سیل‌خیزی) و در چند مورد به صورت تصادفی از ۲۱ نقطه دشت بگونه‌ای نمونه‌گیری انجام شده است که نمونه‌ها معرف همه دشت باشند (شکل ۱).



شکل ۱- محل‌های نمونه‌برداری از سطح دشت (اعداد روی شکل، شماره و محل نمونه‌ها را نشان می‌دهد).

بر اساس پراکندگی نمونه‌ها در دشت و به صورت تصادفی بر روی ۷ نمونه از خاک‌ها آزمایش XRD انجام گرفت (جدول ۱). با توجه به محدوده وزن مخصوص (G_s) ذرات خاک (۲/۷۰ تا ۲/۷۷) و نیز با در نظر گرفتن شرایط تشکیل برخی از این کانی‌های رسی عمده در نمونه‌ها (کلریت و ایلیت)، تا حدودی می‌توان به خاستگاه آذرین و یا دگرگونی آنها پی‌برد.

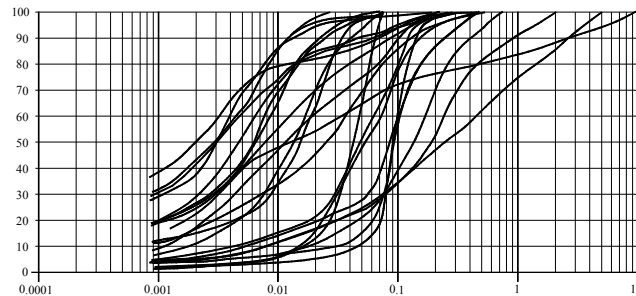
جدول ۱- نتایج آزمایش XRD

| شماره نمونه | نوع کانی |
|-------------|---|
| ۲ | کوارتز، کلسیت، فلدسپار، دولومیت، کلریت، ایلیت، و به مقدار ناچیز مونتموریلونیت |
| ۳ | کوارتز، کلسیت، فلدسپار، دولومیت، کلریت، ایلیت |
| ۵ | کوارتز، کلسیت، فلدسپار، دولومیت، کلریت، ایلیت |
| ۹ | کوارتز، کلسیت، فلدسپار، دولومیت، کلریت، ایلیت |
| ۱۶ | کوارتز، کلسیت، فلدسپار، دولومیت، کلریت، ایلیت |
| ۱۹ | کوارتز، کلسیت، فلدسپار، دولومیت، کلریت، ایلیت |
| ۲۱ | کوارتز، کلسیت، فلدسپار، دولومیت، کلریت، ایلیت، و به مقدار ناچیز مونتموریلونیت |

محدوده اندازه دانه‌ها، اندیس پلاستیسیته و رده‌بندی نمونه‌ها

محدوده اندازه ذرات مورد آزمایش در (شکل ۲) نشان داده شده است.

نتایج آزمایش‌های حدود پایداری در (جدول ۲) خلاصه شده است. نمونه‌های شماره‌ی ۱، ۷، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۴، ۱۵، ۱۷، ۲۰، ۲۱ فاقد خاصیت خمیری هستند. بر این اساس عمده خاک‌های ریزدانه در رده‌های CL و ML قرار می‌گیرند. رده‌بندی نمونه‌ها در (جدول ۳) آمده است.



شکل ۲- نمودار ارزیابی میزان واگرایی (نمودار شرارد) با استفاده از نتایج آنالیز شیمیایی

آزمایش‌های واگرایی

آزمایش‌های متداول واگرایی مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از: آزمایش‌های شیمیایی، آزمایش کرام، آزمایش هیدرومتری دوگانه و آزمایش پین‌هول. در ۶ نمونه (نمونه‌های ۱، ۷، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۴) مقدار ذرات کوچکتر از 0.005 میلی‌متر از ۱۲ درصد کل نمونه‌ها کمتر بود و با توجه به نداشتن خاصیت خمیری، در مورد آنها نیازی به انجام آزمایش‌های واگرایی نبود، زیرا در این موارد رفتار توده خاک تابع ذرات بزرگتر بوده، واگرا بودن یا نبودن ذرات رس تأثیری در این رفتار ندارد.

جدول ۲- نتایج آزمایش‌های حدود پایداری (اندیس پلاستیسیت PI)

| شماره نمونه | PI | شماره نمونه | PI | شماره نمونه | PI | شماره نمونه | PI |
|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|
| ۲ | ۱۶/۸۵ | ۵ | ۱۷/۲۳ | ۹ | ۲۳/۱۹ | ۱۸ | ۱۱/۶۳ |
| ۳ | ۸/۴۷ | ۶ | ۸/۴ | ۱۳ | ۵/۴ | ۱۹ | ۱۶/۰۶ |
| ۴ | ۱۱/۶ | ۸ | ۱۹/۸۵ | ۱۶ | ۲۵/۱۴ | | |

جدول ۳- رده بندی نمونه‌ها

| شماره نمونه | نام خاک | شماره نمونه | نام خاک | شماره نمونه | نام خاک |
|-------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|
| ۱ | ML | ۸ | MH | ۱۵ | ML |
| ۲ | CL | ۹ | CH | ۱۶ | CL |
| ۳ | CL | ۱۰ | SP-SM | ۱۷ | ML |
| ۴ | CL | ۱۱ | SP-SM | ۱۸ | CL |
| ۵ | CL | ۱۲ | SW-SM | ۱۹ | CL |
| ۶ | CL | ۱۳ | ML | ۲۰ | ML |
| ۷ | SP-SM | ۱۴ | ML | ۲۱ | ML |

۱- آزمایش شیمیایی

آزمایش‌های شیمیایی ویژه واگرایی خاک‌ها دو دسته‌اند:

دسته اول آزمایش‌هایی هستند که بر روی محلول منفذی خاک انجام می‌شود. با این شرح که ابتدا به خاک آب مقطر اضافه می‌شود تا به حد روانی برسد. پس از آن خمیر بدست آمده را جهت برقرار شدن تعادل بین نمک‌های موجود در آب منفذی و کاتیون‌های موجود در خاک، چند ساعت به حال خود رها می‌کنند در آخر در حدود ۱۰ تا ۲۵ سانتیمتر مکعب از محلول منفذی را جدا می‌کنند و برای آزمایش مورد استفاده قرار می‌دهند. این جدایش محلول منفذی از خمیر معمولاً با استفاده از یک صافی و یک پمپ خلأ انجام می‌گیرد. محلول منفذی خارج شده از نمونه به شیره یا عصاره اشباع موسوم است.

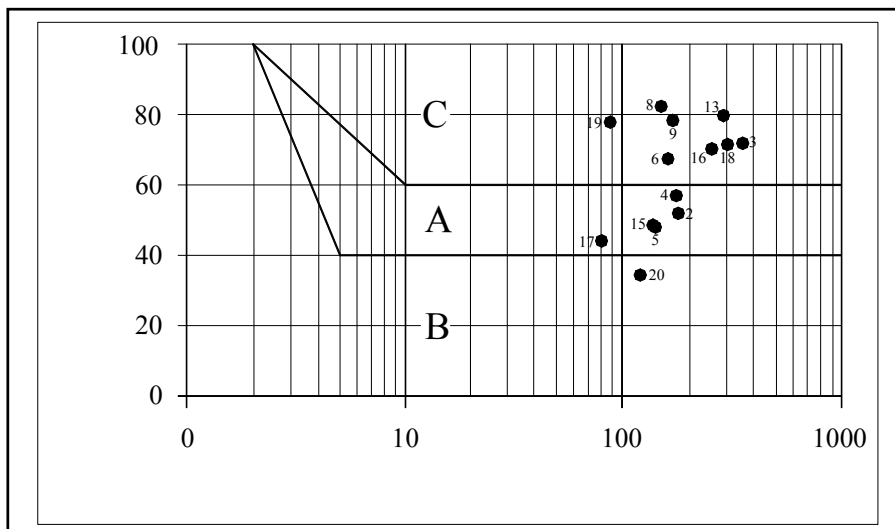
به منظور تعیین درصد کاتیون‌های Na^+ ، Mg^{2+} ، Ca^{2+} ، K^+ و همچنین pH و CEC خاک، از نمونه‌ها عصاره‌گیری شد و آزمایش‌های مورد نظر بر روی آنها صورت گرفت. درصد سدیم با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$PS = \frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{2+} + Na^+} \quad (2)$$

یکی دیگر از پارامترهای مورد استفاده، میزان جذب سدیم (SAR) می‌باشد که از رابطه (۳) محاسبه می‌شود، (مقادیر بر حسب میلی‌اکی‌والان در لیتر).

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

میزان PS نمونه‌ها در جدول (۴) نشان داده شده است. با توجه به نمودار شرارد (شکل ۳) به جز نمونه شماره ۲۰ که غیرواگرا ارزیابی می‌گردد، بقیه نمونه‌ها واگرا یا بینابین هستند. شایان ذکر است، تحقیقات بر روی خاک‌های ایران مشخص نموده که برای خاک‌هایی که TDS آنها بیشتر از ۱۰۰ میلی‌اکی‌والان در لیتر باشد، تعیین واگرایی بر اساس نمودار شرارد دارای دقت کافی نبوده، با خطای قابل ملاحظه‌ای همراه است (Rahimi and Delphi, 1993). در تحلیل نتایج آنالیز شیمیایی از معیارهای دیگری نظیر معیار شیمیایی استرالیایی و معیار شیمیایی رحیمی در ایران (که بر اساس معیار شیمیایی آفریقای جنوبی ترتیب یافته) نیز استفاده می‌گردد (Rahimi and Delphi, 1993).



شکل ۱- محدوده‌ی اندازه‌ی ذرات مورد مطالعه

جدول ۴- نتایج آنالیز شیمیایی

| شماره نمونه | Na ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ | TDS | SAR | PS | نتیجه براساس نمودار شرارد |
|-------------|-----------------|------------------|------------------|----------------|--------|-------|--------|---------------------------|
| ۲ | ۹۴/۴۵ | ۳۰ | ۵۴ | ۳/۸۷ | ۱۸۳/۳۲ | ۱۴/۷۳ | ۵۲/۰۶۷ | بینابین |
| ۳ | ۲۶۲ | ۲۸ | ۵۲ | ۲۰/۸۳ | ۳۶۲/۸۳ | ۴۱/۴۳ | ۷۲/۲۱ | واگرا |
| ۴ | ۱۰۲/۲۷ | ۱۶ | ۵۰ | ۱۱/۱۱ | ۱۷۹/۳۸ | ۱۷/۸ | ۵۷/۰۱۳ | بینابین |
| ۵ | ۶۹/۳۳ | ۲۰ | ۴۶ | ۷/۸۴ | ۱۴۳/۰۷ | ۱۲/۰۵ | ۴۸/۳۸۹ | بینابین |
| ۶ | ۱۱۱/۳۶ | ۱۸ | ۲۸ | ۷/۱۷ | ۱۶۴/۵۳ | ۲۳/۲۲ | ۶۷/۶۸۴ | واگرا |
| ۸ | ۱۲۷ | ۴ | ۱۶ | ۶/۷۵ | ۱۵۳/۷۵ | ۴۰/۱۶ | ۸۲/۶۰۲ | واگرا |
| ۹ | ۷۰/۱۹ | ۸ | ۶ | ۵/۸۳ | ۹۰/۰۲ | ۲۶/۵۳ | ۷۷/۹۷۲ | واگرا |
| ۱۳ | ۲۳۶/۳۶ | ۱۶ | ۲۴ | ۱۹/۵ | ۲۹۵/۸۶ | ۵۲/۸۵ | ۷۹/۸۸۹ | واگرا |
| ۱۵ | ۶۸/۳۷ | ۲۸ | ۳۸ | ۵/۹۵ | ۱۴۰/۳۲ | ۱۱/۸۸ | ۴۸/۶۸۸ | بینابین |
| ۱۶ | ۱۸۳/۸۲ | ۴۰ | ۲۶ | ۱۰/۸۷ | ۲۶۰/۶۹ | ۳۲ | ۷۰/۵۱۳ | واگرا |
| ۱۷ | ۳۶/۰۶ | ۲۲ | ۱۸ | ۵/۳۷ | ۸۱/۴۳ | ۸/۰۶۳ | ۴۴/۲۸۳ | بینابین |
| ۱۸ | ۲۲۲/۷۳ | ۴۲ | ۲۴ | ۲۱/۵۳ | ۳۱۰/۲۶ | ۳۸/۷۷ | ۷۱/۷۸۸ | واگرا |
| ۱۹ | ۱۳۶ | ۱۸ | ۱۲ | ۷/۲۹ | ۱۷۳/۲۹ | ۳۵/۱۲ | ۷۷/۴۸۱ | واگرا |
| ۲۰ | ۴۲/۰۴ | ۴۸ | ۱۰ | ۲۱/۷۵ | ۱۲۱/۷۹ | ۷/۸۰۷ | ۳۴/۵۱۸ | غیرواگرا |

۲- آزمایش کرام (Crumb Test)

در آزمایش، تنها نمونه‌های ۱، ۳، ۵ و ۱۶ به مقدار بسیار ناچیز واکنش نشان دادند و در سایر نمونه‌ها هیچگونه واکنشی مشاهده نشد.

۳- آزمایش هیدرومتری دوگانه (Double Hydrometer or SCS)

با توجه به نتایج جدول (۵) مشاهده می‌گردد که نمونه‌های ۸ و ۱۷ دارای نسبت واگرایی بیش از ۴۰ هستند و در رده‌بندی جزء خاک‌های واگرا قرار می‌گیرند.

۴- آزمایش پین‌هول یا سوراخ سوزنی (Pinhole Test)

این آزمایش به دلیل ماهیتی که دارد بهترین آزمایش جهت واگرایی خاک می‌باشد، چراکه پتانسیل فرسایش‌پذیری را بطور مستقیم ارزیابی می‌کند. برای انجام این آزمایش از روش A در استاندارد ASTM 4647-87D بر روی نمونه‌های با تراکم و رطوبت بهینه کمک گرفته شد. در این روش خاک‌های واگرا با D1 و D2، خاک‌های کمی تا اندازه‌ای واگرا (بینابین) با ND3 و ND4 و خاک‌های غیرواگرا با ND1 و ND2 نمایش داده می‌شوند. نتایج آزمایش‌های پین‌هول در جدول (۶) ارائه گردیده است. آزمایش، نمونه‌ها را کاملاً غیرواگرا نشان می‌دهد، تنها نمونه‌های ۲، ۳، ۱۷ و ۲۰ به میزان ناچیزی واگرایی نشان می‌دهند.

جدول ۵- نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه

| شماره نمونه | درصد ذرات زیر ۰/۰۰۵ میلیمتر در حالت بدون همزن و ماده‌ی جدا سازنده | | درصد ذرات زیر ۰/۰۰۵ میلیمتر در حالت بدون همزن و ماده‌ی جدا سازنده | |
|-------------|---|-------|---|--------------|
| | نسبت واگرایی | (B) | (A) | نتیجه آزمایش |
| ۲ | ۶/۷۳ | ۴۱/۸۸ | ۲/۸۲ | غیرواگرا |
| ۳ | ۱۳/۳۸ | ۳۵/۷۲ | ۴/۷۸ | غیرواگرا |
| ۴ | ۶/۲۰ | ۴۴/۹۸ | ۲/۷۹ | غیرواگرا |
| ۵ | ۱۷/۰۱ | ۵۳/۹۲ | ۹/۱۷ | غیرواگرا |
| ۶ | ۳۲/۲۱ | ۲۹/۲۴ | ۹/۴۲ | بینابین |
| ۸ | ۵۲/۹۶ | ۲۰/۲۶ | ۱۰/۷۳ | واگرا |
| ۹ | ۳۶/۷۶ | ۴۷/۸۸ | ۱۷/۶ | بینابین |
| ۱۳ | ۳۳/۲۰ | ۲۰/۳۳ | ۶/۷۵ | بینابین |
| ۱۵ | ۳۷/۸۰ | ۲۳/۱۵ | ۸/۷۵ | بینابین |
| ۱۶ | ۹/۷۰ | ۴۳ | ۴/۱۷ | غیرواگرا |
| ۱۷ | ۴۸/۶۹ | ۲۴/۴ | ۱۱/۸۸ | واگرا |
| ۱۸ | ۱۷/۰۵ | ۳۰/۴۴ | ۵/۱۹ | غیرواگرا |
| ۱۹ | ۶/۷۸ | ۴۷/۸۱ | ۳/۲۴ | غیرواگرا |
| ۲۰ | ۳۷/۴۲ | ۱۲/۱۶ | ۴/۵۵ | بینابین |
| ۲۱ | ۲۴/۸۹ | ۱۱ | ۲/۷۳ | غیرواگرا |

جدول ۶- نتایج آزمایش‌های بین‌هول

| شماره نمونه | نتیجه آزمایش | شماره نمونه | نتیجه آزمایش | شماره نمونه | نتیجه آزمایش |
|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| ۱ | - | ۸ | ND1 | ۱۵ | ND3 |
| ۲ | ND3 | ۹ | ND1 | ۱۶ | ND1 |
| ۳ | ND1 | ۱۰ | - | ۱۷ | ND3 |
| ۴ | ND2 | ۱۱ | - | ۱۸ | ND2 |
| ۵ | ND2 | ۱۲ | - | ۱۹ | ND2 |
| ۶ | ND1 | ۱۳ | ND3 | ۲۰ | ND3 |
| ۷ | - | ۱۴ | - | ۲۱ | ND2 |

فرسایش در آزمایش بین‌هول معمولاً به دو گونه رخ می‌دهد، اول به دلیل وجود سیلت زیاد که در این صورت فرسایش از نوع فیزیکی خواهد بود و دوم به دلیل پدیده فیزیکی- شیمیایی واگرایی. مواردی گزارش گردیده که در برخی نمونه‌ها هر دو عامل می‌تواند علت فرسایش خاک باشد (خامه‌چیان و همکاران، ۱۳۷۹؛ Rahimi & Delfi, 1993).

برطبق این آزمایش‌ها هیچکدام از نمونه‌ها واگرا نیستند. چون گمان می‌رفت که علت تخریب سازه‌ها عدم تراکم صحیح سازه‌ها می‌باشد، یک سری آزمایش بین‌هول دیگر بر روی نمونه‌ها در تراکم‌های پایین‌تر صورت گرفت. نتیجه بدین‌گونه بود که حتی در ۰/۸ تراکم بهینه نمونه‌های رسی- سیلتی فرسایشی رخ نداد، اما، در نمونه‌های درشت‌تر آب‌شستگی و فرسایش

به راحتی مشاهده شد. نمونه‌های اخیر دقیقاً از محل‌های تخریب شده سیلاب‌بندها گرفته شده بودند.

مقایسه نتایج

آنگونه که اشاره شد، نتایج آزمایش‌های مختلف با یکدیگر از یک‌سو و مشاهدات صحرائی از سوی دیگر، نه تنها یکدیگر را حمایت نمی‌کنند، بلکه، در برخی موارد در تضاد با یکدیگر می‌باشند. چنین تضادهایی در تحقیقات محققین دیگر نیز مشاهده می‌شود (فرزانه و عسکری، ۱۳۷۲؛ Craft & Acciardi, 1984). همچنین مشاهده شده است، زمانی که در آب منفذی نمک آزاد به صورت محلول وجود دارد، آزمایش‌های کرام، هیدرومتری دوگانه و پین‌هول قادر به شناسایی خاک‌های واگرا نیستند، زیرا محتوای نمکی بالا جلو فعالیت لایه کاتیون‌های تبادل‌پذیر را می‌گیرد و ذرات رسی بصورت مجتمع (فلوکوله) باقی می‌مانند.

عمده‌ترین مسأله شایان توجه در نتایج چهار گروه آزمایش، عدم تطابق نتایج آزمایش‌های شیمیایی با نتایج سه آزمایش دیگر و بویژه آزمایش پین‌هول است، لیکن، با دقت در نتایج آزمایش پین‌هول و ضمن قبول نسبی بودن اعتبار نتایج هر کدام از چهار آزمایش مورد استفاده در سنجش میزان واگرایی خاک‌های رسی می‌توان ناهم‌انگهی مشاهده شده را با بررسی دقیق‌تر مجموع یافته‌ها از جمله دانه‌بندی خاک، نتایج مطالعات کانی‌شناسی و محتوای نمک در ارتباط دانست. مقایسه نتایج آزمایش‌های مختلف در جدول (۷) نشان داده شده است.

جدول ۷- مقایسه نتایج آزمایشات واگرایی

| شماره نمونه | آزمایش هیدرومتری دوگانه | آزمایش پین‌هول | آزمایش شیمیایی |
|-------------|-------------------------|----------------|----------------|
| ۲ | غیرواگرا | ND3 | بینابین |
| ۳ | غیرواگرا | ND1 | واگرا |
| ۴ | غیرواگرا | ND2 | بینابین |
| ۵ | غیرواگرا | ND2 | واگرا |
| ۶ | بینابین | ND1 | واگرا |
| ۸ | واگرا | ND1 | واگرا |
| ۹ | واگرا | ND1 | واگرا |
| ۱۳ | واگرا | ND3 | واگرا |
| ۱۵ | بینابین | ND3 | بینابین |
| ۱۶ | واگرا | ND1 | واگرا |
| ۱۷ | بینابین | ND3 | بینابین |
| ۱۸ | واگرا | ND2 | واگرا |
| ۱۹ | واگرا | ND2 | واگرا |
| ۲۰ | غیرواگرا | ND3 | غیرواگرا |

ساده‌ترین آزمایش مورد استفاده، آزمایش کرام هیچکدام از نمونه‌ها را واگرا معرفی نکرد. این آزمایش بنا به دلیل ضعف‌هایی که دارد، جواب معتبری ارائه نمی‌دهد.

معتبرترین آزمایش جهت تعیین واگرایی را بنا به ماهیتی که دارد، آزمایش پین‌هول می‌دانند. در این آزمایش جریان آب در داخل خاک به خوبی مدل می‌شود و تقریباً شرایط طبیعی زمین پیاده می‌شود. آنگونه که پیشتر گفته شد، در این آزمایش تمام نمونه‌ها، غیرواگرا تعیین شدند. نتایج این آزمایش‌ها با نتایج مشاهدات صحرایی کاملاً سازگاری دارد، چون هیچگونه فرسایشی که نماد تیپیک واگرایی (نظیر فرسایش آب‌کندی و فروچاله‌ها) باشد، در دشت مشاهده نشد.

نمونه‌های مورد آزمایش حاوی درصد فراوانی املاح سدیم هستند. کانی‌های رسی موجود، عمدتاً کلریت و ایلیت می‌باشند و با توجه به فعالیت بسیار ضعیف آن‌ها، واگرا بودن نمونه‌ها قطعی نیست. این دو کانی از نظر میزان فعالیت بین مونت‌موریلونیت و کائولینیت قرار دارند، اما خواص آن‌ها به کائولینیت نزدیک‌تر است. بدین ترتیب به نظر می‌آید در مواردی که نمونه‌ها در آزمایش شیمیایی واگرا و در آزمایش پین‌هول غیرواگرا تشخیص داده شده‌اند، به دلیل نوع و میزان کانی‌های رسی موجود در خاک، میزان گسترش لایه دوگانه در حدی نیست که منجر به از بین رفتن نیروی جاذبه میان ذرات رس شود و لذا به رغم بالا بودن میزان سدیم، ذرات رس در آزمایش پین‌هول در کنار یکدیگر باقی می‌مانند.

در آزمایش هیدرومتری دوگانه، در توضیح رفتار نمونه‌هایی که واگرا ارزیابی شدند (نمونه‌های ۸ و ۱۷) گفتنی است این ناهماهنگی‌ها در بسیاری از تحقیقات محققین دیگر نیز مشاهده شده است و علت را می‌توان فراوانی درصد سیلت دانست که شاخص واگرایی را بیش از حد معمول نشان می‌دهد. با این حال، نظر نهایی بستگی به تحلیل جمعی نتایج سایر آزمایش‌ها دارد.

آنچنانکه قبلاً نیز گفته شد، این خاک‌ها خاستگاه آذرین و یا دگرگونی دارند. چنین خاک‌هایی خاصیت واگرایی ندارند. این موضوع می‌تواند قرینه‌ای در رد واگرا بودن خاک‌های مورد مطالعه باشد.

Bell *et al.*, 1994 با توجه به اینکه ترکیب خاصی از نتایج آزمایش‌ها نتیجه دقیق‌تری جهت ارزیابی خاک‌های واگرا ارائه می‌دهند، ترکیب‌های متنوعی از نتایج آزمایش‌ها را تحت تحلیل تشخیصی (Discriminant Analysis) امتحان کردند تا مجموعه متغیرهای (آزمایش) مناسب را پیدا کنند. این مجموعه آزمایش‌ها نهایتاً گروه‌های مجزایی با بیشترین اختلاف را

معرفی کرد که عبارت بودند از: آزمایش کرام، آزمایش پین هول، مقدار SAR و نتایج نمودارهای CEC vs. ESP و TDS vs. Na.

آنها در سال ۱۹۹۴ یک سیستم رتبه‌دهی آزمایشی را ارائه کردند. این سیستم، آزمایش‌های مختلفی را استفاده می‌کرد و نتایج هر یک ارزش خاصی می‌گرفت. بل و واکر در سال ۲۰۰۰ سیستم رتبه‌دهی جدیدی را تحت عنوان سیستم رتبه‌دهی/اصلاح شده (Modified Rating System) ارائه دادند. در این سیستم بیشترین رتبه به نتایج آزمایش پین هول داده شده است. جدول (۸) مشخصات این سیستم را نمایش می‌دهد.

جدول ۸- سیستم رتبه‌دهی Bell and Walker (2000) برای شناسایی خاکهای واگرا

| | | | | | | | | | |
|----------------|----------|------------|-------------|--------------|---|------------|---|-------------|---|
| آزمایش پین هول | رده رتبه | ۵ | واگرا | بینابین | ۳ | کمی واگرا | ۱ | غیرواگرا | ۰ |
| CEC vs. ESP | رده رتبه | ۴ | بسیار واگرا | واگرا | ۳ | حاشیه‌ای | ۱ | غیرواگرا | ۰ |
| آزمایش کرام | رده رتبه | ۳ | واکنش شدید | واکنش ملایم | ۲ | واکنش ضعیف | ۱ | کمتر از ۱/۵ | ۰ |
| SAR | رده رتبه | ۲ | بیش از ۲ | ۱/۵ - ۲ | ۱ | ۱ | ۱ | غیرواگرا | ۰ |
| TDS vs. %Na | رده رتبه | ۲ | واگرا | بینابین | ۱ | ۱ | ۱ | غیرواگرا | ۰ |
| | کل رتبه | ۱۲ به بالا | بسیار واگرا | نسبتاً واگرا | ۳ | کمی واگرا | ۱ | غیرواگرا | ۰ |
| | | | | | | | | ۴ یا کمتر | |

در تحقیق حاضر، بنا به محدودیت امکان تعیین CEC vs. ESP نمونه‌ها فراهم نشد، اما جهت استفاده در این سیستم رتبه ۳ (بیشتر از حالت بینابین و نزدیک به حالت واگرا با توجه به نتایج آزمایش‌های واگرایی انجام شده) برای تمامی نمونه‌ها فرض گرفته شد. آنگونه که از جدول (۹) برمی‌آید، نهایتاً با فرض فوق که نمونه‌ها بر اساس آن تقریباً واگرا در نظر گرفته شد، تمامی نمونه‌ها رتبه ۵ تا ۷ را شامل می‌شوند و بنابراین در محدوده خاک‌های کمی واگرا قرار می‌گیرند. این محدوده به حالت غیرواگرا (تا به حالت واگرا) نزدیک‌تر است. با توجه به فرض صورت گرفته (اختصاص رتبه ۳) و نتیجه نهایی، عدم واگرایی منطقی به نظر می‌رسد. بنابراین، می‌توان این خاک‌ها را تحت عنوان رس‌های سدیم بالای غیرواگرا (High Sodium Nondispersive Clay) نام‌گذاری کرد.

جدول ۹- ارزیابی نمونه‌ها براساس سیستم پیشنهادی بل و واکر

| شماره‌ی نمونه | SAR | پین هول | CEC vs. ESP | گرام | TDS vs. Na% | مجموع | نتیجه |
|---------------|-----|---------|-------------|------|-------------|-------|-----------|
| ۲ | ۲ | ۰-۱ | ۳ | ۰ | ۱ | ۶-۷ | کمی واگرا |
| ۳ | ۲ | ۰ | ۳ | ۰ | ۲ | ۷ | کمی واگرا |
| ۴ | ۲ | ۰ | ۳ | ۰ | ۱ | ۶ | کمی واگرا |
| ۵ | ۲ | ۰ | ۳ | ۰ | ۱ | ۶ | کمی واگرا |
| ۶ | ۲ | ۰ | ۳ | ۰ | ۲ | ۷ | کمی واگرا |
| ۸ | ۲ | ۰ | ۳ | ۰ | ۲ | ۷ | کمی واگرا |
| ۹ | ۲ | ۰ | ۳ | ۰ | ۲ | ۷ | کمی واگرا |
| ۱۳ | ۲ | ۰ | ۳ | ۰ | ۲ | ۷ | کمی واگرا |
| ۱۵ | ۲ | ۰-۱ | ۳ | ۰ | ۱ | ۶-۷ | کمی واگرا |
| ۱۶ | ۲ | ۰ | ۳ | ۰ | ۲ | ۷ | کمی واگرا |
| ۱۷ | ۲ | ۰-۱ | ۳ | ۰ | ۱ | ۶-۷ | کمی واگرا |
| ۱۸ | ۲ | ۰ | ۳ | ۰ | ۲ | ۷ | کمی واگرا |
| ۱۹ | ۲ | ۰ | ۳ | ۰ | ۲ | ۷ | کمی واگرا |
| ۲۰ | ۲ | ۰-۱ | ۳ | ۰ | ۰ | ۵-۶ | کمی واگرا |

علل تخریب سیلاب‌بندها (گوره‌ها)

یکی از عواملی که نقش آن در فرسایش خاک‌های دشت سیستان تأیید شده است، وجود لایه‌های ماسه‌ی ریزدانه و فاقد چسبندگی در زیر لایه‌های رسی و سیلتی می‌باشد (لشکری‌پور و غفوری، ۱۳۷۷). این نوع فرسایش در سرپنجه‌های رودخانه‌ی شילה بخوبی مشاهده می‌شود. این فرسایش عمدتاً ریزشی است که خود تحت تأثیر توالی رسوبی منطقه قرار دارد. در زیر لایه‌ی سطحی سیلتی - رسی منطقه، لایه‌ای از ماسه‌ی ریزدانه وجود دارد که فاقد چسبندگی است. در مجاورت آب، بویژه در طی رخداد سیلاب، مقداری از این لایه ریزش کرده، سبب می‌شود تا قسمت‌های فوقانی فرو بریزد. این عمل باعث سهولت فرسایش و پیشروی سرپنجه‌های رودخانه‌ی شילה می‌گردد. افزون بر آن، زهکش آب داخل لایه‌ی ماسه‌ای باعث روان شدن و آب‌شستگی آن می‌گردد، که این پدیده نیز فرسایش را تسهیل می‌کند.

در مورد تخریب سیلاب‌بندها نیز تقریباً چنین سازوکاری متصور است و آن‌گونه که در آزمایش تکمیلی پین هول (آزمایش در تراکم کمتر خاک) گفته شد، عدم تراکم صحیح سازه‌ها این پدیده را کمک می‌کند. بنابراین، فرسایش‌های رخ داده از نوع مکانیکی ارزیابی شده، در آستانه‌ی خاصی از سرعت آب رخ می‌دهد.

این شکل فرسایش را می‌توان از دیدگاه دیگری به پدیده‌ی ناپایداری خاک‌های ماسه‌ای ارتباط داد. در یک طبقه‌بندی کلی، این خاک‌ها را می‌توان نوعی خاک واگرا با ماهیت فیزیکی قلمداد

نمود، چراکه فرسایش و مهاجرت ذرات خاک صرفاً بر اثر عدم چسبندگی و ریز بودن ذرات انجام می‌شود. این خاک‌ها دارای طبقه‌بندی نسبتاً محدودی می‌باشند و بر اساس طبقه‌بندی یونیفاید شامل ماسه تمیز متوسط تا ریز با دانه‌بندی یکنواخت (SM و SP) می‌باشند که در اصطلاح متداول عموماً ماسه بادی نامیده می‌شوند (رحیمی، ۱۳۷۹). تخریب‌های دیده شده در گوره‌ها عمدتاً در نقاطی رخ داده که دارای چنین دانه‌بندی هستند (شکل ۴).



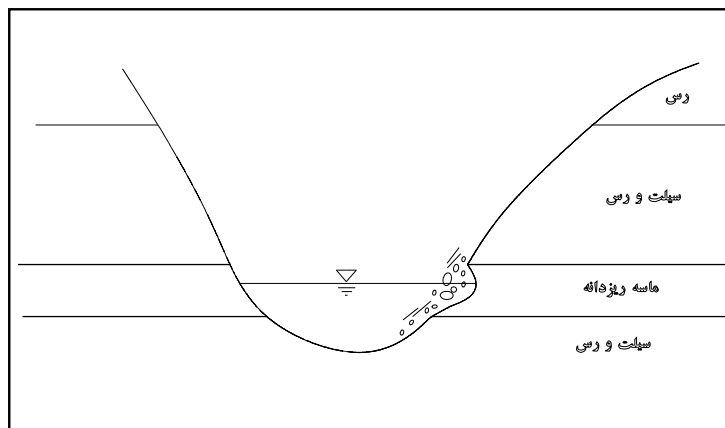
شکل ۴- قسمتی از بدنه در حال تخریب یک گوره

وجود مواد انحلال‌پذیر نظیر نمک طعام و گچ نیز موجب می‌شود تا بر اثر تماس این خاک‌ها با آب، مواد مذکور در آب حل شده، قسمتی از ذرات جامد موجود در توده خاک ضمن انحلال خارج شوند. این پدیده در نهایت می‌تواند موجب افزایش تخلخل و پوک شدن خاک شده، با ایجاد نشست‌های قابل ملاحظه موجب تخریب ساختمان خاک شود (رحیمی، ۱۳۷۹). در این تحقیق وجود چنین موادی در خاک‌ها بررسی نشد، لیکن برخی شواهد نظیر رگه‌های سفید رنگ (احتمالاً گچ یا نمک) و همچنین وجود سوراخ‌ها و حفرات ریز درون خاک، شاید گواهی بر امکان رخداد چنین پدیده‌ای باشد. به هر حال، برای رسیدن به جزئیات موضوع، نیاز به انجام مطالعات بیشتری است.

نتیجه‌گیری

علیرغم بالا بودن میزان نمک‌های محلول خاک و بویژه سدیم، خاک‌های دشت سیستان واگرا نیستند، بنابراین، می‌توان خاک‌های ریزدانه دشت را رس‌های سدیم بالای غیرواگرا (High Sodium Nondispersive Clay) نام نهاد.

فرسایش در این دشت از نوع مکانیکی و به شکل ریزشی ناشی از شسته شدن ذرات درشت‌تر فاقد چسبندگی (SM و SP) می‌باشد که در آستانه‌ی خاصی از سرعت جریان آب رخ می‌دهد. پدیده‌ی ناپایداری خاک‌های ماسه‌ای در این نوع فرسایش نقش مهمی دارد (شکل ۵).



شکل ۵- تصویری شماتیک از فرسایش لایه‌های رسوبی در دشت

نتایج این تحقیق می‌تواند دلیل دیگری بر این موضوع باشد که نمودار شرارد جهت استفاده در خاک‌های با محتوای نمک بالا (TDS بیش از ۱۰۰ میلی‌اکی‌والان در لیتر)، لاقبل برای خاک‌های ایران جواب صحیحی نمی‌دهد و احتیاج به اصلاح دارد. این نکته در نتایج محققین دیگر نیز آمده است. از طرفی شاید شیوه‌ی عصاره‌گیری رایج باید اصلاح شود. سیستم پیشنهادی بل و واکر (۲۰۰۰) در تفسیر نتایج آزمایش‌های مختلف واگرایی جواب‌های قابل قبولی ارائه می‌دهد و از تحلیل و تفسیرهایی که بیشتر جنبه‌ی شخصی دارد، جلوگیری می‌کند.

References

- Bell, F. G., Maud, R. R., and Jermy, C. A., (1994) *Dispersive Soil in South Africa and Earth Dams*, Proceedings 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, **3**, 1003-1008, New Delhi.
- Bell, F. G. & Walker, D. J. H., (2000) *A Further Examination Of The Nature of Dispersive Soils in Natal, South Africa*, Quarterly Journal of Engineering and Hydrogeology, **33**, 187-199.
- Craft, D. C., and Acciardi, R. G., (1984) *Failure of Pore Water Analysis for Dispersion*, Proceedings American Society Civil Engineers, Journal Geotechnical Engineering Division, **110**, 459-472.

- Elges, H. F. W.K., (1985) *Dispersive Soil*, The Civil Engineer in South Africa, **27**, 347-355.
- Rahimi, H. & Delfi, M. (1993) *New Chemical Method for Evaluation of Dispersive Soil*, Proceedings of the Second International Seminar on Soil Mechanics and Foundation Engineering of Iran, 199-218.
- Sherard, J. L., Dunnigan, L. P. and Decker, R.S., (1976a). *Identification and Nature of Dispersive Soils*, Proceedings American Society Civil Engineers, Journal Geotechnical Engineering Division, **102** 287-301.

خامه‌چیان، م.، رحیمی، ح.، سلوکی، ح.، (۱۳۷۹) بررسی روش‌های شناسایی خاک‌های واگرا در ارتباط با شرایط زمین‌شناسی در استان خوزستان، مجله‌ی علوم زمین، ۳۶-۳۵، ۴۴-۵۹.

رحیمی، ح. (۱۳۷۹) مسائل احداث کانال‌های آبیاری در خاک‌های نامتعارف (مشکل‌آفرین)، کارگاه فنی - آموزشی ساخت کانال‌های آبیاری-محدودیت‌ها و راه‌حل‌ها، ۱۶۳-۱۲۸.

فرزانه، ا. و عسکری، ف.، (۱۳۷۲) بررسی پتانسیل واگرایی خاک هسته‌ ناتراوای یک سد خاکی، مجموعه مقالات دومین سمینار بین‌المللی مکانیک خاک و مهندسی پی ایران.

لشکری پور، غ. و غفوری، م.، (۱۳۷۷) فرسایش و پیشروی رودخانه‌ی شسلیه و نابودی دریاچه‌ی هامون، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ۴۹، ۲۴۳-۲۵۵.