اعتبارسنجی آزمایش‌های واگرایی در خاک‌های با خواص خمیری و پتانسیل واگرایی کم (مطالعه موردی بخشی از مناطق ایران)

سیّدمرتضی مرندی *[۱]، صلاح‌الدین حمیدی [۲] و علی سلاجقه [۳]

[۱] دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

[۲] دانشجوی دکتری عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

[۳] دانشجوی کاشناسی ارشد عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان

چکیده

خاک‌های واگرا بخش‌های وسیعی از سطح زمین را به خود اختصاص داده و یکی از عوامل مهم در گسیختگی در شالوده‌های سطحی و عمیق و نیز خرابی در دیگر سازه‌های عمرانی همچون سدهای خاکی می‌باشند. بخش قابل توجهی از این نوع خاک‌ها دارای خواص خمیری و پتانسیل واگرایی کم هستند. تحقیقات گسترده‌ای در خصوص شناخت و تعیین میزان واگرایی خاک‌ها انجام شده، اما تاکنون اتفاق نظر کلی و جامع در خصوص معیارهای ارزیابی آزمایش‌های واگرایی وجود ندارد. در پژوهش حاضر بخشی از خاک‌های کشور که شواهد تجربی و تحقیقاتی مبنی بر وجود پتانسیل واگرایی در آن‌ها مشاهده شده، مورد آزمایش قرار گرفت. در همین راستا ۲۸ نمونه از خاک‌های با خواص خمیری و پتانسیل واگرایی کم از مناطق مختلف کشور جمع‌آوری و آزمایش‌های کرامب، هیدرومتری دوگانه، پین‌هول و شیمیایی روی آن‌ها انجام شد. صحت‌سنجی آزمایش‌ها بر اساس مقایسه نتایج آزمایش‌های مختلف با یکدیگر و نیز به صورت کیفی با استفاده از عکس‌های SEM انجام شد. نتایج حاصل نشان می‌دهند معیارهای واگرایی در خاک‌های رسی با خواص خمیری و پتانسیل واگرایی کم باید اصلاح گردند. همچنین دست‌خوردگی نمونه‌ها تأثیر زیادی بر نتایج آزمایش‌ها دارد. مضاعف این که معیار شیمیایی شرارد نیز در خاک‌های مورد مطالعه نیاز به اصلاحات اساسی دارد.

واژگان کلیدی: واگرایی، آزمایش کرامب، هیدرومتری دوگانه، پین هول، دست خوردگی.

۱- مقدمه

یکی از خاک‌های مسئله‌داری که جزو مخاطرات جدی در پروژه‌های ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست‌محیطی به حساب می‌آید، خاک واگرا است. خاک رس واگرا بدون هیچ‌گونه تحریک مکانیکی به آسانی و به سرعت در آب با غلظت نمک کم از یکدیگر جدا و پراکنده می‌شود [۱]. خاک‌های واگرا حاوی مقادیری کانی‌های رسی فعال می‌باشد که این خاک‌ها عموماً خاک رس با خاصیت خمیری کم (CL) یا خاک رس با خاصیت خمیری زیاد (CH) هستند [۱]. خاک‌های واگرا نفوذپذیری کمی در حالت اشباع داشته، اما هنگام خشک شدن به واسطه ترک‌های ایجاد شده در آن موجب افزایش قابل توجهی در نفوذپذیری می‌شوند و به همین دلیل در کارهای کشاورزی نیز خاک‌های حاصل‌خیزی به شمار نمی‌روند [۱]. همچنین واگرایی موجب ایجاد رگاب در سدهای خاکی و دیوارهای حایل [۲، ۳]، خرابی در راه‌ها [۴] و فرسایش خاکریزهای رسی متراکم شده و شیروانی‌ها می‌گردد [۵-۸]. اهمیت مطالعه خاک‌های واگرا از آن‌جا مشخص خواهد شد که این نوع خاک در نقاط مختلف جهان از جمله استرالیا، برزیل، نیوزیلند، ایالات متحده [۷] و نیز در بسیاری مناطق ایران همچون خوزستان، اصفهان، اردبیل، فارس [۹] سیستان و بلوچستان، قزوین، کرمان، همدان، سمنان و مرکزی مشاهده شده است [۱۰].

مطالعات زیادی در راستای بهسازی خاک‌های واگرا توسط محققین انجام شده است [۷]. نکته مهمی که لازم است مورد توجه ویژه قرار گیرد آن است که ارائه روش بهسازی مناسب برای خاک‌های واگرا و نیز تعیین بازده روش‌های بهسازی مورد استفاده، مستلزم تعیین و تشخیص درجه واگرایی قبل و بعد از بهسازی می‌باشد. محقق شدن این امر نیز مستلزم اعتبارسنجی و تعیین میزان خطاهای موجود در نتایج و معیارهای ارائه شده در آزمایش‌های متداول واگرایی می‌باشد. متداول‌ترین آزمایش‌هایی که برای تعیین پتانسیل واگرایی خاک‌ها مورد استفاده قرار گرفته است عبارت است از؛ آزمایش‌های پین‌هول[1] هیدرومتری

1- Pinhole

* نویسنده مسئول

دریافت ۹۳/۱۰/۳ پذیرش ۹۴/۳/۱۶

دوگانه [1]، کرامب [2] و آزمایش‌های شیمیایی [3].

آزمایش‌های کرامب و هیدرومتری دوگانه آزمایش‌های ساده‌ای هستند که اگر در این دو آزمایش نمونه واگرا تشخیص داده شد خاک واگرا است در غیر این صورت واگرایی آن با آزمایش‌های دیگر همچون آزمایش پین‌هول تعیین می‌شود [۱۱-۱۴] آزمایش پین‌هول قابل اعتمادترین آزمایش تعیین واگرایی است [۱۴]. آزمایش‌های شیمیایی نیز آزمایش‌هایی هستند که به درک بهتر رفتار خاک کمک می‌کنند [۱۵]. یکی از مهم‌ترین معیارهای تعیین پتانسیل واگرایی در آزمایش‌های شیمیایی، معیار شرارد است [۹].

مطالعات زیادی برای اصلاح خطاهای آزمایش‌های واگرایی انجام شده است. در همین راستا با سه روش مختلف (ASTM-D422-63، BSi-BS1377-2:1990 و TMH1-1988 (A6)) آزمایش هیدرومتری دوگانه روی نمونه خاک‌های یکسان انجام شد. مطالعات انجام شده نشان داد که به دلیل اختلافات موجود در روش آزمایش‌ها و نیز ناهمخوانی‌های موجود در معیارهای سیستم‌های طبقه‌بندی، نتایج روش‌های مختلف با یکدیگر یکسان نمی‌باشند [۱۹]. تحقیقاتی آزمایشگاهی نیز در خصوص اصلاح معیار شیمیایی شرارد انجام شده است که در آن چندین نمونه خاک طبیعی از نقاط مختلف ایران جمع‌آوری و به هر کدام از آن‌ها ۴ عنصر مختلف کلرید سدیم، کربنات سدیم، سولفات سدیم و پلی‌فسفات سدیم اضافه شد [۹]. در مطالعات انجام شده، نتایج آزمایش پین‌هول مبنای اصلی تعیین درجه واگرایی قرار گرفت. معیار شرارد با توجه نادیده گرفتن تأثیر کلریدها (که یک فاکتور فلاک کننده [4] درخاک‌ها به شمار می‌رود) قادر به تعیین پتانسیل واگرایی نبوده و نتایج آن در تناقض با نتایج آزمایش پین‌هول بودند، بنابر این معیار پیشنهادی برای اصلاح گراف شرارد (شکل (۳)) با اختصاص محور قائم به درصد کلرید سدیم به جای درصد سدیم، ارائه شد [۹]. مطالعاتی نیز در خصوص بررسی معیارهای مناسب [۱۸، ۱۹] و نیز مقایسه نتایج آزمایشگاهی و صحرایی روی آزمایش‌های مربوط به فرسایش خاک‌ها [۱۹] انجام شده است. مطالعاتی نیز در زمینه مقایسه روش‌های ساده واگرایی خاک‌ها صورت گرفته است [۲۰].

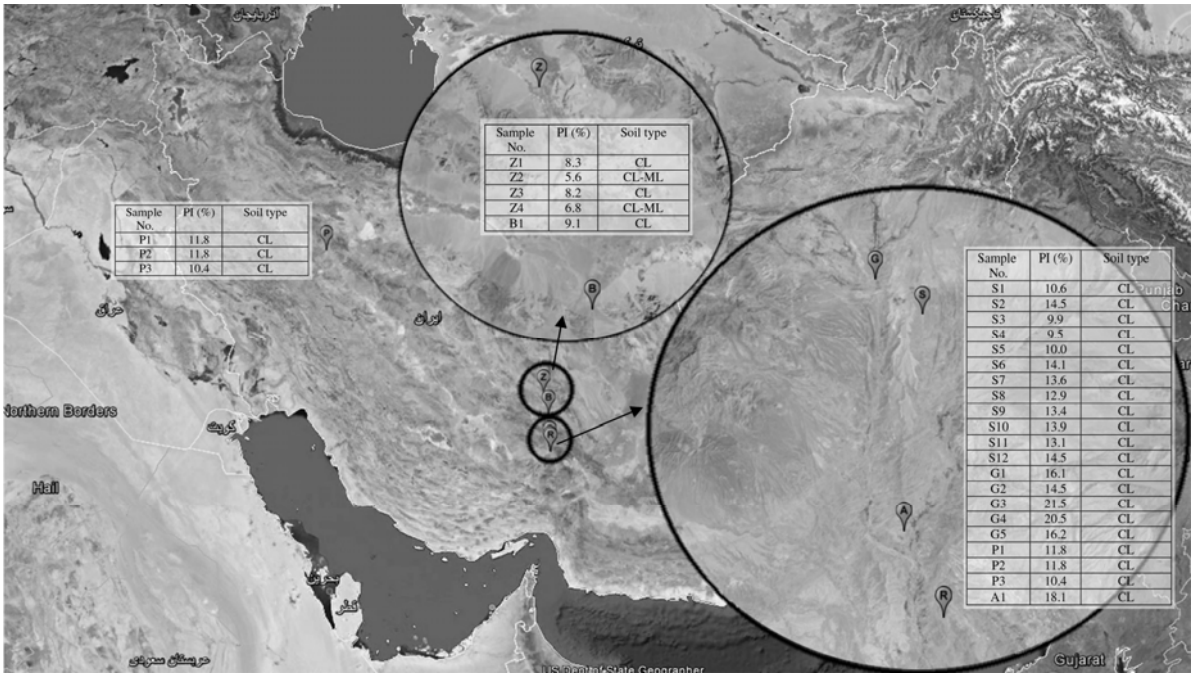
همچنان که مشاهده شد، تحقیقات گسترده‌ای در تعیین پتانسیل واگرایی خاک‌ها، عوامل مؤثر بر واگرایی و اعتبارسنجی آزمایش‌های واگرایی انجام شده است [۲۱-۲۲]. مرور مطالعات انجام شده بیانگر آن است علی‌رغم آن که گستره قابل توجهی از سطح زمین با خاک‌های با خواص خمیری و پتانسیل واگرایی کم پوشانده شده، اما تاکنون مطالعات جامعی به صورت خاص در زمینه میزان قابل اعتماد بودن نتایج آزمایش‌های واگرایی در این خاک‌ها انجام نشده است، با توجه به وسعت کشور و وجود خاک‌های واگرا، نبود مطالعات جامعی در خصوص ارزیابی میزان واگرایی خاک‌های مناطق مختلف و میزان قابل اعتماد بودن آزمایش‌های واگرایی در آن بسیار محسوس است. در همین راستا در پژوهش حاضر به منظور اعتبارسنجی آزمایش‌های متداول واگرایی در خاک‌های با خواص خمیری و پتانسیل واگرایی کم و تأثیر پارامترهای مهمی همچون دست‌خوردگی بر نتایج آزمایش‌ها و نیز پیشنهاد معیارهای مناسب در این نوع خاک‌ها، ۲۸ نمونه از خاک‌های مناطق مختلف کشور جمع‌آوری و آزمایش‌های هیدرومتری دوگانه، کرامب، پین‌هول و آزمایش‌های شیمیایی روی آن‌ها انجام شد. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهند، دست‌خوردگی تأثیر زیادی بر نتایج آزمایش‌های پین‌هول و کرامب دارد. همچنین لازم است معیار شیمیایی شرارد و معیار آزمایش هیدرومتری دوگانه در خاک‌های با خواص خمیری و پتانسیل واگرایی کم اصلاح شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ مشخصات مصالح

برای نمونه‌های مورد آزمایش در پژوهش حاضر، از قرضه سرغشک (نمونه S) و گازروئیه (نمونه G) از منابع قرضه خاک رس سد صفا در شهرستان رابر در استان کرمان، نمونه‌های اخذ شده از شهرستان دلیجان در استان مرکزی (نمونه P)، روستای گزروئیه شهرستان رابر (نمونه A)، جاده بهرامجرد کرمان (نمونه B)، نمونه دشت زحمت‌کشان زنگی آباد کرمان (نمونه Z) و نمونه روستای سیرینوئیه (نمونه R) استفاده شد. در شکل (۱) موقعیت نمونه‌گیری بر اساس مختصات مکانی (GPS)، دامنه خمیری و طبقه‌بندی نمونه‌های مورد آزمایش روی نقشه ایران ارائه شده است. لازم به ذکر است، نمونه‌های مورد آزمایش از اعماق ۰/۵تا ۳ متر و از نقاط مختلف منطقه مورد مطالعه، اخذ شد. غالب نمونه‌های مورد آزمایش، خاک رس با خاصیت خمیری کم (CL) بوده و در برخی از نمونه‌ها، خاک‌های سیلتی نیز وجود دارد. از هر نمونه خاک حدود ۴۰ کیلوگرم برای انجام آزمایش‌های واگرایی و سایر آزمایش‌های کلاسیک ژئوتکنیکی به آزمایشگاه انتقال داده شد.

1- Double hydrometer
2- Crumb
3- Chemical tests
4- Flocculating factor



شکل ۱- موقعیت نمونه‌گیری بر اساس مختصات مکانی (GPS)، دامنه خمیری و طبقه‌بندی نمونه‌های مورد آزمایش روی نقشه ایران

۲-۲- برنامه مطالعات آزمایشگاهی

در بخش مطالعات آزمایشگاهی ابتدا آزمایش‌های پایه همچون درصد رطوبت، حدود اتربرگ، چگالی دانه‌ها و طبقه-بندی خاک‌ها و سپس آزمایش‌های مهم تعیین پتانسیل واگرایی خاک شامل آزمایش‌های کرامب، پین‌هول، هیدرومتری دوگانه و آزمایش‌های شیمیایی انجام شد. در تمام نمونه‌ها درصد رطوبت بر اساس [ASTM D2216]، حدود اتربرگ بر اساس [ASTM D 4318]، چگالی دانه‌ها (G_s) بر اساس [ASTM D 854]، طبقه‌بندی خاک‌ها بر اساس [ASTM D 3282] و در ادامه آزمایش‌های واگرایی شامل کرامب بر اساس [ASTM D 6572]، آزمایش هیدرومتری دوگانه بر اساس [ASTM D 4221]، آزمایش پین‌هول بر اساس [ASTM D 4647] و آزمایش‌های شیمیایی بر اساس [ASTM D 6572] انجام شد.

۲-۳- آزمایش کرامب

در آزمایش کرامب از دو نوع نمونه استفاده شد؛ نمونه‌های طبیعی یا دست‌نخورده و نمونه‌های بازسازی شده یا دست‌خورده. برای نمونه‌های طبیعی از کلوخه‌های مکعبی طبیعی خاک محل و برای ساخت نمونه بازسازی شده، مصالح عبوری از الک ۱۰ با رطوبت و دانسیته محل بازسازی شد. با توجه به آن که بخشی از خاک‌های مورد آزمایش مربوط به خاکی است که در پروژه سد صفا مورد استفاده قرار گرفت و با عنایت به این نکته که در اجرای بخش‌های مختلف بدنه سدهای خاکی، خاک کاملاً دست-خورده شده تا به میزان درصد تراکم مورد نظر برسد، بنابر این نمونه‌های بازسازی شده با دانسیته و رطوبت در محل نیز مورد آزمایش قرار گرفت تا شرایط محل به درستی مدل گردد. آزمایش کرامب با دو بار تکرار روی نمونه طبیعی و دو بار تکرار روی نمونه بازسازی انجام شد.

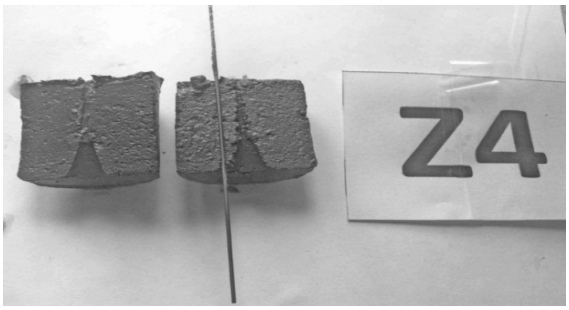
۲-۴- آزمایش پین هول

از آن‌جا که نمونه ها از اعماق ۰/۵ تا ۳ متری اخذ شد و با توجه به آن که اکثر نمونه‌ها مربوط به مناطق نسبتاً گرم و خشک کویری و با درصد نمک قابل توجه بوده که خواص خمیری و همچنین درصد رطوبت طبیعی کمی نیز داشته‌اند، بنابر این اخذ نمونه‌های دست‌نخورده به دلایل مذکور بسیار سخت و تقریباً غیر ممکن بود. بنابر این برای انجام آزمایش پین-هول، نمونه‌ها براساس دانسیته و درصد رطوبت طبیعی در محل بازسازی شده و مورد آزمایش قرار گرفت. در آزمایش پین‌هول طول نمونه آزمایش ۳۸ میلی‌متر بوده و به کمک سوزنی به قطر ۱ میلی‌متر که از هادی سوزن عبور می‌کند سوراخی در امتداد طولی نمونه ایجاد می‌شود. سپس دستگاه در وضعیتی قرار گرفته که این سوراخ افقی باشد. در این وضعیت آب مقطر تحت بارهای آبی ۵۰، ۱۸۰، ۳۸۰ و ۱۰۲۰ میلی‌متر به ترتیب، در مدت زمان

معین از سوراخ نمونه عبور داده می‌شود. این عمل جهت شبیه-سازی شرایط سازه خاکی در اثر وجود یک ترک در آن است. آزمایش پین‌هول به سه روش A، B و C انجام می‌شود. در پژوهش حاضر با توجه به پرکاربردتر بودن و متداول‌تر بودن روش A، از روش A در تعیین پتانسیل واگرایی استفاده شد. در جدول (۱) خلاصه معیارهای آزمایش پین هول بر اساس استاندارد ASTM D 4647-93 به روش A ارائه شده است. به دلیل زیاد بودن تعداد نمونه‌ها تنها تصویر نمونه Z4 پس از انجام آزمایش پین‌هول در شکل (۲) ارائه شده است.

جدول ۱- معیارهای آزمایش پین هول بر اساس استاندارد ASTM D 4647-93 به روش A

تقسیم بندی واگرایی	بار آبی (*mm*)	زمان انجام آزمایش (*min*)	نرخ نهایی جریان در نمونه (*ml/s*)	میزان کدر بودن آب		قطر سوراخ
				از کنار	از بالا	بعد از آزمایش (*mm*)
D_1	۵۰	۵	۱ - ۱/۴	تیره	خیلی تیره	> ۲/۰
D_2	۵۰	۱۰	۱ - ۱/۴	متوسط تیره	تیره	> ۱/۵
ND_4	۵۰	۱۰	۰/۸ – ۱	تقریباً تیره	متوسط تیره	> ۱/۵
ND_3	۱۸۰	۵	۱/۴ – ۲/۷	تقریباً شفاف	تقریباً تیره	> ۱/۵
	۳۸۰	۵	۱/۸ – ۳/۲			
ND_2	۱۰۲۰	۵	> ۳/۰	تمیز	تقریباً شفاف	< ۱/۵
ND_1	۱۰۲۰	۵	< ۳/۰	کاملاً تمیز	کاملاً تمیز	۱



شکل ۲- تصویر نمونه Z4 پس از انجام آزمایش پین‌هول

۲- ۵- آزمایش هیدرومتری دوگانه

در آزمایش هیدرومتری دوگانه، روی نمونه دو بار آزمایش هیدرومتری انجام می‌شود. در مرحله اول، آزمایش هیدرومتری معمولی روی ۵۰ گرم خاک خشک براساس [ASTM D 422-63] انجام شد که در آن ماده پراکنده‌ساز هگزا متافسفات سدیم با غلظت ۴٪ و نیز همزن مکانیکی برای جداسازی دانه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در مرحله دوم، آزمایش هیدرومتری روی ۲۵ گرم خاک خشک براساس [ASTM D 4221-99] انجام شد. لازم به ذکر است در مرحله دوم (به منظور تعیین میزان پتانسیل طبیعی واگرایی خاک) آزمایش هیدرومتری بدون ماده پراکنده‌ساز (هگزا متافسفات سدیم) و نیز بدون استفاده از همزن مکانیکی انجام شد. با توجه به حساسیت رس‌ها به درصد رطوبت، آزمایش هیدرومتری دوگانه روی نمونه با رطوبت طبیعی انجام شد. جرم نمونه مرطوب معادل ۲۵ گرم خاک خشک با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود (M جرم خاک مرطوب معادل ۲۵ گرم خاک خشک).

$$M = (1+\omega)M_S \qquad M_S = 25g \qquad (۱)$$

نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش‌های هیدرومتری دوگانه در نمونه بدون ماده پراکنده‌ساز، بر اساس استاندارد ASTM حداقل ۲ تا ۴ ساعت در آب مقطر غرقاب شده، سپس توسط پمپ خلأ حباب‌های هوای آن خارج شده و پس از آن نمونه مانند آزمایش هیدرومتری معمولی مورد آزمایش قرار گرفت. درصد واگرایی [1] نمونه‌ها بر اساس رابطه (۲) محاسبه می‌شود. $F_{(0.005)1}$ نسبت درصد عبوری از قطر ۰/۰۰۵ میلی‌متر در آزمایش هیدرومتری معمولی و $F_{(0.005)2}$ درصد عبوری قطر ۰/۰۰۵ میلی‌متر در آزمایش هیدرومتری دوگانه (بدون ماده پراکنده‌ساز) است.

1 - Dispersion percentage

$$Dispersion\ Percent = F_{(0.005)2}/F_{(0.005)1} \times 100 \qquad (۲)$$

برای تعیین پتانسیل واگرایی در آزمایش هیدرومتری دوگانه از معیارهای ارائه شده در جداول (۲) و (۳) استفاده شده و در پایان معیار مناسب برای خاک‌های مورد آزمایش پیشنهاد شده است.

جدول ۲- تعیین پتانسیل واگرایی در آزمایش هیدرومتری دوگانه [۲۳]

پتانسیل واگرایی خاک (Soil Dispersion Potential)	درصد واگرایی (Dispersoin Percentage[1])
غیر واگرا (Non-Dispersive)	≤ ۱۵
متوسط (Intermediate)	۱۵ - ۳۵
واگرا (Dispersive)	≥ ۳۵

جدول ۳- تعیین پتانسیل واگرایی در آزمایش هیدرومتری دوگانه [۲۶]

پتانسیل واگرایی خاک	درصد واگرایی
غیر واگرا (Non-Dispersive)	≤ ۱۵
واگرایی ناچیز (Slightly Dispersive)	۱۵ - ۳۰
واگرایی ملایم (Moderately Dispersive)	۳۰ - ۵۰
واگرایی شدید (Highly Dispersive)	≥ ۵۰

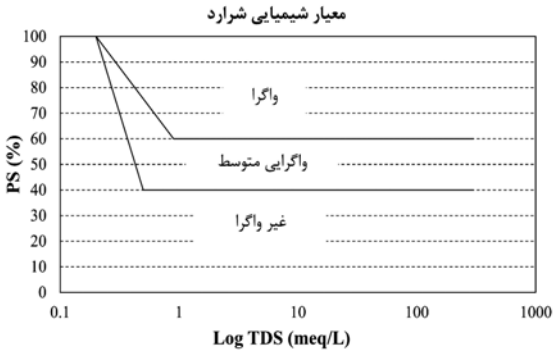
۲- ۶- آزمایش‌های شیمیایی

آزمایش‌های شیمیایی براساس تأثیر یون سدیم به عنوان عامل اصلی در واگرایی خاک‌ها بنا نهاده شده است [۲۲]. در آزمایش‌های شیمیایی با وجود آن که درصد رطوبت اولیه همان رطوبت حالت دست‌نخورده است، اما نمونه‌های مورد آزمایش نمونه‌های دست‌خورده محسوب می‌شود. برای آماده‌سازی نمونه‌ها خاک رس با رطوبت طبیعی تهیه شده و رطوبت آن با آب مقطر به حد روانی رسانده می‌شود. خمیر حاصل ۲۴ ساعت نگهداری شده تا بین نمک‌های موجود در آب منفذی و کاتیون‌های موجود در خاک تعادل برقرار شود. با ایجاد خلاء و استفاده از یک صافی حدود ۱۰ تا ۲۵ سانتی‌متر مکعب از آب منفذی خمیر حاصل برداشته می‌شود. آب منفذی اخذ شده از نمونه عصاره اشباع نامیده می‌شود. در نهایت غلظت مهم‌ترین کاتیون‌های موجود در خاک شامل سدیم (Na^{+})، پتاسیم (K^{+})، کلسیم (Ca^{+2}) و منیزیم (Mg^{+2}) تعیین شده و براساس آن نسبت جذب سدیم یا SAR [1]، مجموع کل املاح موجود یا TDS [2] و میزان درصد سدیم یا PS [3] با استفاده از معادله‌های (۳)، (۴) و (۵) تعیین شد.

$$TDS = Na^{+} + K^{+} + Ca^{+2} + Mg^{+2} \qquad (۳)$$

$$PS = \frac{Na^{+}}{TDS} \times 100 \qquad (۵)$$

آزمایش تعیین واگرایی بر اساس معیار اصلاح شده شرارد (۱۹۷۶) [۲۳] و عدد SAR انجام شد. نمودار تعیین پتانسیل واگرایی بر اساس معیار شرارد در شکل (۳) ارائه شده است.



شکل ۳- معیار شیمیایی شرارد در تعیین پتانسیل واگرایی [۲۲] (غلظت‌ها بر حسب میلی اکی والان بر لیتر (meq/L))

۳- تجزیه و تحلیل نتایج

در بخش تجزیه و تحلیل نتایج ابتدا هرکدام از آزمایش‌ها به صورت مجزا بررسی و پتانسیل واگرایی آن‌ها براساس معیارهای موجود تعیین شد. لازم به ذکر است تعیین درجه نهایی پتانسیل واگرایی در متون مهندسی و تمام مطالعات قبلی، به صورت کیفی می‌باشد. همچنین همان‌گونه که در بخش مواد و روش‌ها در جداول (۱)، (۲) و (۳) و شکل‌های (۲) و (۳) ذکر شد، در آزمایش‌های پین‌هول، هیدرومتری دوگانه و آزمایش‌های شیمیایی که در ابتدا نتایج به صورت کمی هستند، در نهایت با توجه به محدوده پارامترهای به دست آمده، پتانسیل واگرایی به صورت کیفی تعیین می‌شود.

اگر در هرکدام از آزمایش‌های کرامب، هیدرومتری دوگانه و پین‌هول نمونه واگرا تشخیص داده شد، خاک واگرا است. همچنین در صورتی که در آزمایش‌های کرامب و هیدرومتری دوگانه نمونه غیر واگرا تشخیص داده شد، لازم است با آزمایش پین‌هول صحت‌سنجی شود، اگر در آزمایش پین‌هول نمونه واگرا

1- Sodium adsorption ratio
2- Total dissolved salts
3- Percentage of sodium

تشخیص داده شد، نمونه واگرا است؛ در غیر این صورت نمونه غیر واگرا است. بنابراین همچون مطالعات قبلی، نتایج آزمایش پین‌هول مبنای اصلی تعیین درجه واگرایی است.

دو نکته مهم در پژوهش حاضر برجسته شده که نقطه قوت مقاله حاضر محسوب می‌شود و در مطالعات قبلی به صورت جامع به آن پرداخته نشده است:

۱) علاوه بر اعتبارسنجی آزمایش‌های کرامب و هیدرومتری دوگانه، مطالعه تأثیر دست‌خوردگی بر نتایج آزمایش پین‌هول در خاک‌های با خواص خمیری و درجه واگرایی کم انجام شد. اما با توجه به عدم امکان اخذ نمونه‌های دست‌نخورده برای آزمایش پین‌هول، نتایج آن با نتایج نمونه دست‌نخورده آزمایش کرامب و تفسیر کیفی عکس‌های SEM اعتبارسنجی شده و در نهایت تأثیر دست‌خوردگی در آزمایش پین‌هول مشخص شده است.

۲) براساس معیارهای شیمیایی موجود، درجه واگرایی نمونه تعیین شد. اما با توجه به کاستی‌های معیارهای شیمیایی که مقبول‌ترین و قوی‌ترین آن معیار شیمیایی شرارد (شکل (۳)) است، نتایج آزمایش‌های شیمیایی و به صورت خاص نتایج تعیین پتانسیل واگرایی بر اساس معیار شرارد با دیگر نتایج آزمایش‌های واگرایی مقایسه شد و استفاده از آن در خاک‌های با خواص خمیری و درجه واگرایی کم، اعتبارسنجی گردید.

۳-۱- تجزیه و تحلیل آزمایش‌های کرامب و پین‌هول

۳-۱- تجزیه و تحلیل آزمایش‌های کرامب

نتایج حاصل از آزمایش‌های کرامب بر روی نمونه‌های طبیعی و دست‌خورده و نتایج آزمایش پین‌هول در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴- نتایج آزمایش کرامب و پین‌هول روی تمام نمونه‌های مورد آزمایش

نمونه	توصیف واگرایی نمونه‌ها در آزمایش پین‌هول	توصیف واگرایی نمونه‌ها در آزمایش کرامب	
	نمونه‌های بازسازی شده	نمونه بازسازی شده (دست‌خورده)	نمونه طبیعی (دست‌نخورده)
S1	غیر واگرا	واگرایی متوسط	واگرایی متوسط
S2	غیر واگرا	غیر واگرا	واگرایی متوسط
S3	غیر واگرا	غیر واگرا	واگرایی متوسط
S4	کمی تا نسبتاً واگرا	غیر واگرا	واگرایی متوسط
S5	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
S6	کمی تا نسبتاً واگرا	واگرایی متوسط	واگرا
S7	غیر واگرا	غیر واگرا	واگرا
S8	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
S9	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
S10	کمی تا نسبتاً واگرا	غیر واگرا	واگرا
S11	کمی تا نسبتاً واگرا	واگرا	واگرا
S12	واگرا	واگرا	واگرا
G1	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
G2	کمی تا نسبتاً واگرا	غیر واگرا	واگرا
G3	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
G4	غیر واگرا	غیر واگرا	واگرایی متوسط
G5	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
P1	غیر واگرا	غیر واگرا	واگرا
P2	غیر واگرا	غیر واگرا	واگرا
P3	غیر واگرا	غیر واگرا	واگرا
A1	کمی تا نسبتاً واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
B1	غیر واگرا	واگرایی متوسط	واگرا
Z1	کمی تا نسبتاً واگرا	غیر واگرا	واگرایی متوسط
Z2	کمی تا نسبتاً واگرا	غیر واگرا	واگرایی متوسط
Z3	غیر واگرا	غیر واگرا	واگرایی شدید
Z4	غیر واگرا	غیر واگرا	واگرا
R1	کمی تا نسبتاً واگرا	غیر واگرا	واگرایی متوسط
R2	کمی تا نسبتاً واگرا	غیر واگرا	واگرا

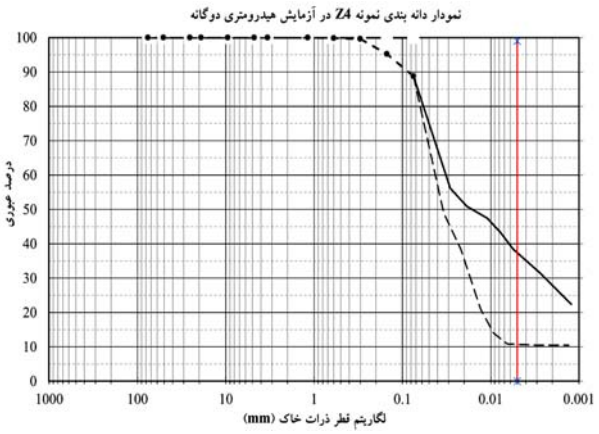
نتایج آزمایش‌های کرامب در جدول (۴) نشان می‌دهد در نمونه‌های مورد آزمایش پتانسیل واگرایی نمونه‌های طبیعی بزرگ‌تر یا مساوی پتانسیل واگرایی نمونه‌های بازسازی شده است. نتایج جدول (۴) بیانگر آن هستند که در آزمایش‌های کرامب نمونه‌های دست‌خورده تقریباً فاقد پتانسیل واگرایی بوده‌اند، اما حدود ۴۵٪ از نمونه‌های دست‌نخورده واگرا می‌باشند. بنابر این در خاک‌های با خواص خمیری و پتانسیل واگرایی کم، دست‌خوردگی عامل بسیار مهمی در تعیین پتانسیل واگرایی در آزمایش کرامب است. همچنین در پروژه‌هایی که خاک رس در حین اجرا و بهره‌برداری دست‌نخورده باقی می‌ماند، برای تعیین پتانسیل واگرایی در آزمایش کرامب، نمونه‌های دست‌نخورده باید مورد آزمایش قرار گیرد. با توجه به نتایج جدول (۴) می‌توان استدلال نمود، درصورت استفاده از نتایج نمونه‌های دست‌نخورده جهت تعیین پتانسیل واگرایی، در شرایطی که خاک در حین اجرا دست‌خورده می‌شود حاشیه اطمینان مناسبی از لحاظ مشکل واگرایی وجود خواهد داشت.

۳-۲- آزمایش‌های پین‌هول

در جدول (۴) نتایج آزمایش پین‌هول انجام شده روی نمونه‌های بازسازی شده ارائه شده است. با توجه به نتایج جدول (۴) مشاهده می‌شود به استثنای نمونه S12، تقریباً تمام نمونه‌ها یا غیر واگرا بوده یا در رده خاک‌های با پتانسیل واگرایی متوسط قرار دارد. همان گونه که در مقدمه پژوهش حاضر ذکر شد اگر در آزمایش کرامب، نمونه واگرا تشخیص داده شد، خاک واگرا است، اما با توجه به نتایج آزمایش‌های کرامب روی نمونه‌های دست‌نخورده در جدول (۴) مشاهده می‌شود که حدود ۴۵٪ از نمونه‌ها دارای پتانسیل واگرایی هستند. بنابر این عدم مشاهده واگرایی در نتایج آزمایش پین‌هول، تأمل‌برانگیز است. احتمال آن می‌رود عامل اصلی کاهش پتانسیل واگرایی در نمونه‌های بازسازی شده در آزمایش پین‌هول دست‌خوردگی نمونه‌ها باشد. بنابر این در این خصوص لازم است تأثیر دست‌خوردگی در کاهش پتانسیل واگرایی مورد بررسی قرار گیرد.

۳-۳- آزمایش‌های هیدرومتری دوگانه

در شکل (۴) نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه روی نمونه Z4 ارائه شده است. با توجه شکل (۴) درصد واگرایی نمونه Z4 ۲۸/۷٪ است، بنابراین براساس معیار جدول (۲) نمونه Z4 جزو خاک‌های با پتانسیل واگرایی متوسط و با توجه به معیار جدول (۳) جزو خاک‌های با پتانسیل واگرایی کم محسوب می‌شود. بر اساس معیار شرارد [۱] خاک‌هایی که درصد واگرایی ۱۵٪ تا ۳۰٪ است، باید پتانسیل واگرایی آن‌ها با آزمایش پین‌هول راستی‌آزمایی گردد. با رجوع به جدول (۴) مشاهده می‌شود نمونه Z4 در آزمایش پین‌هول در رده ND2 یعنی خاک غیر واگرا قرار دارد. بنابراین مجدداً مشاهده می‌شود آزمایش پین‌هول در نمونه‌های مورد آزمایش پتانسیل واگرایی خاک‌ها را کمتر نشان می‌دهد. تحقیقات دکر و دانیگان [۲۳] در خاک‌های رسی لاغر (CL) نشان داد جدول (۲) معیار مناسب‌تری در خاک‌های CL است. با مقایسه نتایج آزمایش کرامب نمونه دست‌نخورده در جدول (۴) و نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه در جدول (۵) مشاهده می‌شود که آزمایش هیدرومتری دوگانه پتانسیل واگرایی خاک را کمتر نشان داده است. بنابر این به نظر می‌رسد معیارهای ارائه شده در آزمایش هیدرومتری دوگانه برای خاک‌های مورد مطالعه پتانسیل واگرایی را کمتر از حالت واقعی نشان می‌دهد و لازم است معیارهای ارائه شده اصلاح گردد. نتایج آزمایش‌های هیدرومتری دوگانه انجام شده روی تمام نمونه‌های مورد آزمایش در جدول (۵) ارائه شده و پتانسیل واگرایی آن‌ها براساس معیارهای ارائه شده در جداول (۲) و (۳) و معیار کمیته احیای اراضی ایالات متحده [1] ارائه شده است. براساس معیار کمیته احیای اراضی ایالات متحده، به جز نمونه S3 دیگر نمونه‌ها غیر واگرا هستند و معیار جدول (۳) پتانسیل واگرایی خاک‌ها را کم‌تر از معیار جدول (۲) نشان می‌دهد، اما پتانسیل واگرایی را از معیار کمیته احیای اراضی ایالات متحده شدیدتر نشان می‌دهد، بنابراین در جهت اطمینان بوده و لذا محتاطانه‌تر است.



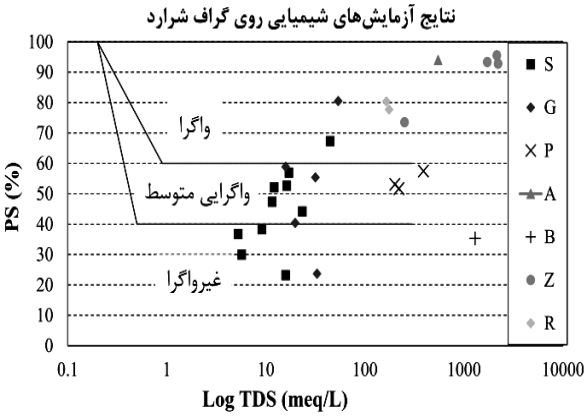
شکل ۴- نمودار دانه‌بندی نمونه Z4 در آزمایش هیدرومتری دوگانه

1- United States Bureau of Reclamation

با توجه به مشاهده پتانسیل واگرایی در دیگر آزمایش‌های واگرایی معیار دکر و دانیگان [۲۳] معیار مناسب‌تری است. علاوه بر مطالعات قبلی [۱۶-۱۸] در پژوهش حاضر، در آزمایش هیدرومتری دوگانه در جدول (۷) معیار مناسب‌تری برای تعیین پتانسیل واگرایی پیشنهاد شده است.

۳-۴- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش های شیمیایی

در جدول (۶) مقدار SAR و در شکل (۵) مقادیر TDS و PS و پتانسیل واگرایی نمونه‌ها براساس معیار شرارد ارائه شده است.



شکل ۵- نتایج آزمایش‌های شیمیایی روی گراف شرارد

با توجه به اعداد SAR در جدول (۶) و شکل (۵) مشاهده می‌شود به استثنای نمونه‌های A، Z و R، براساس معیار شیمیایی شرارد اکثر نمونه‌ها در رده خاک‌های غیر واگرا یا پتانسیل واگرایی متوسط قرار دارد. براساس نتایج SAR در جدول (۶) نمونه‌هایی که در آن ها SAR≤7 غیر واگرا، نمونه-هایی که 7≤SAR≤14 دارای واگرایی متوسط و نمونه‌هایی که SAR≥14، واگرا می‌باشند. از نکات قابل تأمل در جدول (۶) آن است که در برخی از نمونه‌ها همچون B و P که عدد SAR آن-ها در محدوده خاک‌های سدیمی (SAR≥14) واقع است، بر اساس معیار شرارد در رده خاک‌های غیر واگرا یا واگرایی متوسط قرار گرفته که در تناسب با نتایج آزمایش پین‌هول و هیدرومتری دوگانه نیز می‌باشد. بنابر این در خاک‌های رسی با خواص خمیری و پتانسیل واگرایی کم، عدد SAR معیار جامعی در تعیین پتانسیل واگرایی خاک نبوده و باید با نتایج آزمایش‌های دیگر صحت‌سنجی شود. همچنین در نمونه‌های گروه R و تعدادی از نمونه‌های گروه Z به واسطه وجود غلظت زیاد سدیم رفتار خاک از حالت رس خمیری به سیلت غیر خمیری متمایل شده و بنابر این با وجود آن که براساس معیار شرارد در رده خاک‌های با واگرایی شدید واقع شده، اما نتایج پتانسیل واگرایی آن‌ها در آزمایش‌های دیگر واگرایی قابل توجهی از خود نشان نداده است. بنابر این با افزایش غلظت نمک و کاهش خصوصیات خمیری خاک‌های رسی و تمایل رفتار رسی به سمت رفتار سیلتی، معیار شیمیایی شرارد معیار کاملی در توصیف پتانسیل واگرایی نمونه‌ها نیست.

در شکل (۵) نمونه‌های A، R و Z شدیدترین واگرایی را از خود نشان داده‌اند. در نمونه‌های Z و R به واسطه افزایش غلظت نمک و متعاقباً افزایش غلظت کاتیون‌ها مقدار TDS و PS به میزان قابل توجهی افزایش یافته و براساس معیار شیمیایی شرارد در ناحیه با پتانسیل واگرایی شدید قرار گرفته است. با رجوع به شکل (۱) و جدول (۶) و دقت در نوع خاک‌های R و Z مشاهده می‌شود در نمونه‌های Z به واسطه وجود درصد نمک بالا، خواص خمیری خاک علی‌الخصوص دامنه خمیری به میزان قابل توجهی کاهش یافته (PI≤8.3) و رفتار خاک از حالت رسی به سمت رفتار سیلتی متمایل شده است. در نمونه‌های R نیز نمونه‌های مورد آزمایش در گروه خاک‌های سیلتی (ML و MH) قرار می-گیرد. بنابر این همچنان که نتایج آزمایش‌های کرامب، پین‌هول و هیدرومتری دوگانه نشان دادند، پتانسیل واگرایی خاک‌های مذکور به شدت پتانسیل واگرایی حاصل از نتایج آزمایش‌های شیمیایی بر اساس معیار شرارد نیست و نتایج آزمایش‌های شیمیایی بر اساس معیار شرارد در این خاک‌ها اغراق‌آمیز است. در نمونه‌های Z به واسطه نشانه خمیری کم (PI≤8.3) مسئله واگرایی مورد توجه نیست. بنابر این به نظر می‌رسد لازم است معیار شرارد در تعیین پتانسیل واگرایی در غلظت بالای نمک در خاک‌های با خواص خمیری و پتانسیل واگرایی کم اصلاح شود.

۵- اعتبارسنجی آزمایش‌های متداول واگرایی، بررسی عکس‌های SEM و ارائه معیار پتانسیل واگرایی مناسب در آزمایش هیدرومتری دوگانه

به منظور صحت‌سنجی آزمایش‌های واگرایی نتایج آزمایش-های انجام شده در جدول (۶) خلاصه و نتایج آن با یکدیگر مقایسه شده و از عکس‌های SEM در تفسیر کیفی نتایج استفاده شده است. اصولاً از عکس‌های SEM در مقالات علمی به عنوان ابزار تفسیری کیفی مکمل استفاده شده است [۷، ۲۴، ۲۵].

جدول ۵- نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه و تعیین پتانسیل واگرایی براساس معیارهای مختلف

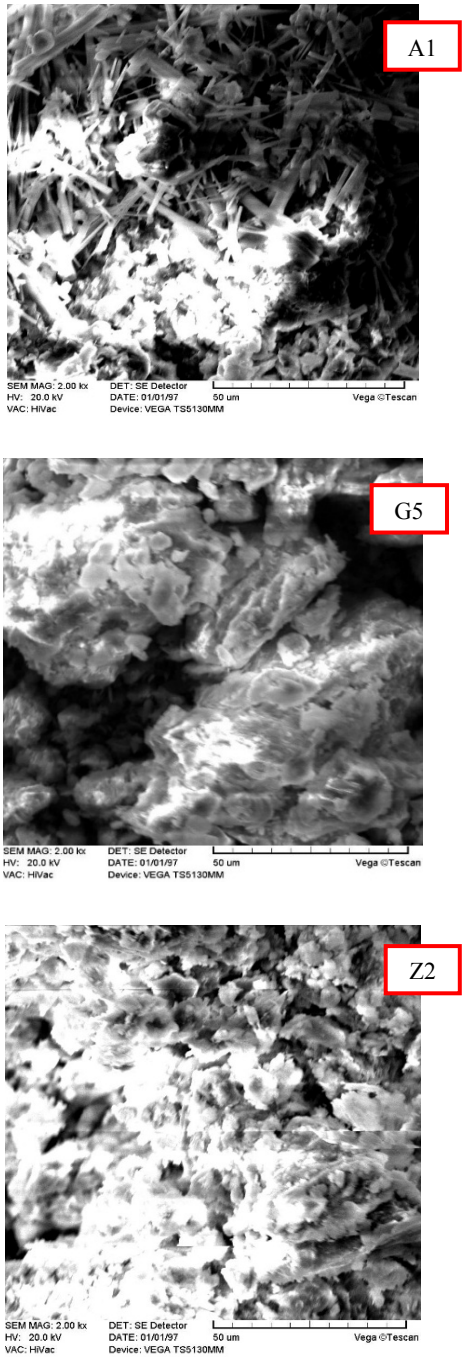
نمونه	ذرات کوچک‌تر از ۵ میکرون (٪)		درصد واگرایی	وضعیت واگرایی		
	هیدرومتری معمولی	هیدرومتری دوگانه		دکر و دانیگان [۲۳]	بل و ماود [۲۶]	معیار کمیته احیای اراضی ایالات متحده [۱۷]
S1	۳۲/۰	۷/۰	۲۱/۹	متوسط	کمی واگرا	غیر واگرا
S2	۴۱/۰	۸/۰	۱۹/۵	متوسط	کمی واگرا	غیر واگرا
S3	۲۷/۰	۹/۰	۳۳/۳	متوسط	نسبتاً واگرا	متوسط
S4	۳۷/۰	۶/۰	۱۶/۲	متوسط	کمی واگرا	غیر واگرا
S5	۳۶/۰	۵/۰	۱۳/۹	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
S6	۴۶/۰	۷/۰	۱۵/۲	متوسط	کمی واگرا	غیر واگرا
S7	۴۲/۰	۳/۰	۷/۱	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
S8	۳۹/۰	۲/۰	۵/۱	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
S9	۳۷/۰	۳/۰	۸/۱	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
S10	۶۲/۰	۱۲/۰	۱۹/۴	متوسط	کمی واگرا	غیر واگرا
S11	۴۵/۹	۷/۱	۱۵/۵	متوسط	کمی واگرا	غیر واگرا
S12	۴۶/۳	۷/۰	۱۵/۱	متوسط	کمی واگرا	غیر واگرا
G1	۲۵/۹	۳/۰	۱۱/۶	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
G2	۴۵/۹	۵/۷	۱۲/۴	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
G3	۴۴/۱	۳/۸	۸/۶	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
G4	۶۵/۸	۳/۹	۶/۰	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
G5	۴۴/۵	۳/۸	۸/۶	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
P1	۳۰/۳	۲/۶	۸/۷	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
P2	۲۸/۸	۲/۶	۹/۱	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
P3	۳۱/۷	۲/۷	۸/۵	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
A1	۴۰/۹	۶/۷	۱۶/۴	متوسط	کمی واگرا	غیر واگرا
B1	۱۵/۲	۳/۱	۲۰/۴	متوسط	کمی واگرا	غیر واگرا
Z1	۴۸/۹	۱۰/۷	۲۱/۹	متوسط	کمی واگرا	غیر واگرا
Z2	۴۸/۰	۱۰/۵	۲۱/۹	متوسط	کمی واگرا	غیر واگرا
Z3	۴۷/۶	۷/۶	۱۶/۰	متوسط	کمی واگرا	غیر واگرا
Z4	۳۷/۴	۱۰/۷	۲۸/۶	متوسط	کمی واگرا	غیر واگرا
R1	۳۴/۷	۳/۸	۱۰/۹	غیر واگرا	کمی واگرا	غیر واگرا
R2	۴۱/۹	۵/۱	۱۲/۲	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا

به دلیل تعداد زیاد نمونه‌ها، عکس‌های SEM سه نمونه با درجات مختلف واگرایی با بزرگ‌نمایی ۲۰۰۰ در شکل (۶) ارائه شده است. با توجه به نتایج جدول (۶) مشاهده می‌شود آزمایش کرامب در نمونه‌های بازسازی شده پتانسیل واگرایی را به میزان قابل توجهی کمتر از حالت دست‌نخورده نشان می‌دهد. با توجه به آن که پتانسیل واگرایی نمونه‌های مورد آزمایش به نسبت خاک‌های با پتانسیل واگرایی شدید کمتر است، بنابر این در خاک‌های مورد مطالعه نتایج آزمایش کرامب روی نمونه‌های دست‌خورده از قابلیت اعتماد مناسبی برخوردار نیست. با مقایسه نتایج نمونه‌های دست‌نخورده در آزمایش کرامب با نتایج آزمایش پین‌هول و آزمایش‌های شیمیایی و عکس‌های SEM مشاهده می‌شود پتانسیل واگرایی حاصل در نمونه‌های دست‌نخورده نتایج قابل اعتمادتری دارد. با مقایسه نتایج آزمایش‌های هیدرومتری دوگانه با دیگر نتایج جدول (۶) مشاهده می‌شود بر اساس معیارهای موجود، آزمایش هیدرومتری دوگانه پتانسیل واگرایی نمونه‌ها را کمتر از مقدار واقعی نشان می‌دهد. در آزمایش هیدرومتری دوگانه به طور کلی معیار جدول (۲) معیار مناسب-تری است، اما همچنان پتانسیل واگرایی نمونه‌ها را کم‌تر نشان داده است.

با مقایسه نتایج آزمایش پین‌هول با دیگر نتایج جدول (۶) و عکس‌های SEM مشاهده می‌شود علی‌رغم آن که نتایج آزمایش پین‌هول قابل اعتمادترین آزمایش واگرایی است، اما با توجه به نتایج آزمایش‌های شیمیایی و عکس‌های SEM به نظر می‌رسد که پتانسیل واگرایی حاصل از آزمایش پین‌هول کمتر از حالت واقعی است. یکی از عوامل اصلی در کاهش پتانسیل واگرایی در آزمایش پین‌هول دست‌خوردگی نمونه‌ها است. این مسئله را بدین صورت می‌توان توجیه نمود که خاک‌های رسی به واسطه مشخصه‌های کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده خود و خصوصیات سیال منفذی، به دست‌خوردگی نمونه و شرایط محیطی بسیار حساس هستند [۷، ۱۵، ۲۴، ۲۵]. این حساسیت به شرایط محیطی و دست‌خوردگی موجب تغییر در اندرکنش خاک رس و آب عبوری از میان نمونه مورد آزمایش در آزمایش پین‌هول شده و لذا موجب تغییر نتایج آزمایش پین‌هول خواهد شد.

جدول ۶- مقایسه نتایج آزمایش‌های مختلف انجام شده برای تعیین پتانسیل واگرایی

نمونه	ذرات کوچک‌تر از ۵ میکرون (٪)		درصد واگرایی	وضعیت واگرایی		
	هیدرومتری معمولی	هیدرومتری دوگانه		دکر و دانیگان [۲۳]	بل و ماود [۲۶]	معیار کمیته احیای اراضی ایالات متحده [۱۷]
S1	۳۲/۰	۷/۰	۲۱/۹	متوسط	کمی واگرا	غیر واگرا
S2	۴۱/۰	۸/۰	۱۹/۵	متوسط	کمی واگرا	غیر واگرا
S3	۲۷/۰	۹/۰	۳۳/۳	متوسط	نسبتاً واگرا	متوسط
S4	۳۷/۰	۶/۰	۱۶/۲	متوسط	کمی واگرا	غیر واگرا
S5	۳۶/۰	۵/۰	۱۳/۹	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
S6	۴۶/۰	۷/۰	۱۵/۲	متوسط	کمی واگرا	غیر واگرا
S7	۴۲/۰	۳/۰	۷/۱	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
S8	۳۹/۰	۲/۰	۵/۱	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
S9	۳۷/۰	۳/۰	۸/۱	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
S10	۶۲/۰	۱۲/۰	۱۹/۴	متوسط	کمی واگرا	غیر واگرا
S11	۴۵/۹	۷/۱	۱۵/۵	متوسط	کمی واگرا	غیر واگرا
S12	۴۶/۳	۷/۰	۱۵/۱	متوسط	کمی واگرا	غیر واگرا
G1	۲۵/۹	۳/۰	۱۱/۶	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
G2	۴۵/۹	۵/۷	۱۲/۴	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
G3	۴۴/۱	۳/۸	۸/۶	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
G4	۶۵/۸	۳/۹	۶/۰	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
G5	۴۴/۵	۳/۸	۸/۶	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
P1	۳۰/۳	۲/۶	۸/۷	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
P2	۲۸/۸	۲/۶	۹/۱	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
P3	۳۱/۷	۲/۷	۸/۵	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا
A1	۴۰/۹	۶/۷	۱۶/۴	متوسط	کمی واگرا	غیر واگرا
B1	۱۵/۲	۳/۱	۲۰/۴	متوسط	کمی واگرا	غیر واگرا
Z1	۴۸/۹	۱۰/۷	۲۱/۹	متوسط	کمی واگرا	غیر واگرا
Z2	۴۸/۰	۱۰/۵	۲۱/۹	متوسط	کمی واگرا	غیر واگرا
Z3	۴۷/۶	۷/۶	۱۶/۰	متوسط	کمی واگرا	غیر واگرا
Z4	۳۷/۴	۱۰/۷	۲۸/۶	متوسط	کمی واگرا	غیر واگرا
R1	۳۴/۷	۳/۸	۱۰/۹	غیر واگرا	کمی واگرا	غیر واگرا
R2	۴۱/۹	۵/۱	۱۲/۲	غیر واگرا	غیر واگرا	غیر واگرا



شکل ۶- عکس‌های میکروسکوپ الکترون پویشی (SEM) نمونه A1، G5 و Z2 با بزرگ‌نمایی ۲۰۰۰

نتایج حاصل از آزمایش‌های شیمیایی در جدول (۶) بیانگر آن هستند که در نمونه‌های رسی با خاصیت خمیری کم (CL) و نمونه‌های سیلتی، با افزایش درصد سدیم و متعاقباً افزایش SAR معیار شیمیایی شرارد معیار جامعی در تعیین پتانسیل واگرایی خاک‌ها نیست، زیرا با افزایش درصد نمک رفتار خاک رسی به سمت رفتار خاک دانه‌ای و سیلتی متمایل شده (نمونه‌های R1 و R2) و در این نوع خاک‌ها فرسایش فیزیکی ناشی از سرعت جریان سیال بیشتر از واگرایی شیمیایی مطرح است در حالی که معیار شرارد واگرایی شدید نشان داده است. بنابر این در نمونه-های مذکور معیار شرارد پتانسیل واگرایی را بیشتر پیش‌بینی کرده و باید با آزمایش‌های دیگر اعتبار سنجی شود. همچنین با توجه به جدول (۶) مشاهده می‌شود درصد نمونه‌های غیر واگرا از ۲۵٪ در حالت دست‌نخورده در آزمایش کرامب در نمونه‌های دست‌خورده آزمایش کرامب به ۸۲٪ و در آزمایش پین‌هول به ۶۱٪ افزایش یافته است. همچنین درصد نمونه‌های دارای پتانسیل واگرایی متوسط و بالاتر از ۷۵٪ در حالت دست‌نخورده در آزمایش کرامب در نمونه‌های دست‌خورده در آزمایش کرامب به ۱۸٪ و در آزمایش پین‌هول به ۴٪ کاهش یافته است.

بنابر این دست‌خوردگی در این دو آزمایش به صورت قابل توجهی بر نتایج آزمایش‌ها تأثیر گذاشته و موجب کاهش پتانسیل واگرایی شده است. این مسئله که از مهم‌ترین نتایج پژوهش حاضر در خاک‌های مورد مطالعه محسوب می‌شود، در آزمایش پین‌هول بیشتر نمایان است. بنابر این در آزمایش‌های پین‌هول و کرامب مسئله دست‌خوردگی پارامتر بسیار مهمی است که بر نتایج تأثیرگذار است. اما در آزمایش هیدرومتری دوگانه معیارهای ارائه شده توسط محققین و خطاهای آزمایش مانع تعیین صحیح پتانسیل واگرایی است. بنابراین در پژوهش حاضر جدول (۷) که معیار مناسب‌تری است، برای تخمین پتانسیل واگرایی با استفاده از آزمایش هیدرومتری دوگانه در خاک‌های با خواص خمیری و پتانسیل واگرایی کم کشور پیشنهاد شده است. همان گونه که اشاره شد؛ عکس‌های SEM یک مکمل تفسیری کیفی است که در تفسیر کیفی نتایج آزمایش‌های واگرایی و سایر خصوصیات ریزساختاری خاک‌های رسی کاربرد دارد.

جدول ۷- معیار پیشنهادی درجه واگرایی در خاک‌های با خواص خمیری و پتانسیل واگرایی کم در آزمایش هیدرومتری دوگانه

پتانسل واگرایی	درصد واگرایی
غیر واگرا	≤ ۱۰
متوسط	۱۰ - ۳۰
واگرا	≥ ۳۰

۵- نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایج پژوهش حاضر به شرح ذیل هستند:

۱) دست‌خوردگی در خاک‌های با خواص خمیری و پتانسیل واگرایی کم موجب کاهش قابل توجه پتانسیل واگرایی خاک‌ها در آزمایش‌های کرامب و پین‌هول می‌گردد.

۲) آزمایش پین‌هول حالت واقعی تراوش آب در ترک در ساختار خاک را هم بعد از ساخت و هم در طول عمر سازه بهتر مدل می‌کند؛ اما استفاده از نمونه‌های دست‌خورده موجب افزایش خطا در تعیین پتانسیل واگرایی می‌شود.

۳) در آزمایش پین‌هول در پروژه‌هایی که خاک در حین اجرا دست‌خورده می‌شود، نتایج نمونه‌های بازسازی شده و در پروژه-هایی که خاک دست‌نخورده می‌ماند، نتایج نمونه‌های دست-نخورده نماینده پتانسیل واگرایی واقعی خاک محل می‌باشند.

۴) معیارهای ارائه شده در تعیین پتانسیل واگرایی خاک‌ها در آزمایش هیدرومتری دوگانه در خاک‌های با پتانسیل واگرایی و خواص خمیری کم پتانسیل واگرایی را کمتر از حالت واقعی نشان می‌دهد، بنابر این معیار اصلاح شده‌ای پیشنهاد شد که به حالت واقعی نزدیک‌تر است.

۵) در خاک‌های با خواص خمیری و پتانسیل واگرایی کم معیار شیمیایی شرارد در غلظت‌های زیاد نمک پتانسیل واگرایی را بیش‌تر از حالت واقعی نشان داده و نیاز به اصلاح دارد.

۶) در خاک‌های رسی با خواص خمیری و پتانسیل واگرایی کم عدد SAR معیار جامعی در تعیین پتانسیل واگرایی خاک نخواهد بود و لازم است با انجام آزمایش‌های دیگر صحت‌سنجی شود.

۷) عکس‌های SEM در ارزیابی کیفی نتایج آزمایش‌های واگرایی کاربرد دارد.

۶- مراجع

[1] Sherard, J. L., Ryker, N. L., Decker, R. S., "Piping in Earth Dams of Dispersive Clay", The ASCE Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures, 1972, Vol. 1, pp 589-626.

[2] Bonelli, S., Benahmed, N., "Piping Flow Erosion in Water Retaining Structures", International Journal on Hydropower and Dams, 2011, 18 (3), 94-99.

[3] Fell, R., Mac Gregor, P., Stapledon, D., "Geotechnical Engineering of Embankment Dams", A. A. Balkema Publishers, 1992.

[4] Nevels, J. B., "Dispersive Clay Embankment Erosion: A Case History", National Academy Press, Washington DC, 1993, pp 50-57.

[5] Ismail, F., Mohamed, Z., Mukri, M., "A Study on the Mechanism of Internal Erosion Resistance to Soil Slope Instability", Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 13, Bund. A.

[6] Al-Kiki, I. M., "Erosion and Dispersion of Sandy Soil With Addition of Fine Materials", Journal of Engineering and Technology, 2013, 31 (3).

[7] Ouhadi, V. R., Goodarzi, A. R., "Assessment of the Stability of a Dispersive Soil Treated by Alum", Journal of Engineering Geology, 2006, 85, 91-101.

[8] Verachtert, E., Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Decker, J., "Factors Controlling the Spatial Distribution of Soil Piping Erosion on Loess-Derived Soils: A Case Study From Central Belgium", Geomorphology, 2010, 118, 339-348.

[9] Abbasi, N., Nazifi, M. H., "Assessment and Modification of Sherard Chemical Method for Evaluation of Dispersion Potential of Soils", Geotechnical and Geological Engineering, 2013, 31, 337-346.

[۱۰] عسکری، ف. ا.، فاخر، ا.، "تورم و واگرایی خاک‌ها از دید مهندسی ژئوتکنیک"، دانشگاه تهران، ۱۳۷۲.

[11] Emerson, W. W., "A Classification of Soil Aggregates Based on Their Coherence in Water" Australian Journal of Soil Research, 1964, 2, 211-217.

[12] Haghighi, I., Martin, T., Reiffsteck, P., Chevalier, C., "An Enhanced Crumb Test for Better Characterizing Water Sensitivity of Soils", 6th International Conference on Scour and Erosion, 2012, pp 1049-1056.

[13] Maharaj, A., "The Use of the Crumb Test as a Preliminary Indicator of Dispersive Soils", The 15th African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2011, pp 299-306.

[14] Craft, D., Acciardi, R. G., "Failure of Pore-Water Analyses for Dispersion", ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division, 1984, 110 (4), 459-472.

[15] Craft, D., "Chemical Test for Dispersive Soil-Problems and Recent Research", the 4th Annual USCOLD Lecture Dam Safety and Rehabilitation, Denver, 1984.
[16] Maharaj, A., Paige-Green, P., "The SCS Double Hydrometer Test in Dispersive Soil Identification", The 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, France, 2-6 September, 2013.
[17] Decker, R. S., Dunnigan, L. P., "Development and Use of the Soil Conservation Service Dispersion Test. In: Sherard, J. L. & Decker, R. S. (Eds) Proceedings Symposium on Dispersive Clays, Related Piping and Erosion in Geotechnical Projects", ASTM Special Publication, 1977, 623, 94-109.
[18] Elges, H. F. W. K., "Problem Soils in South Africa- State of the Art", The Civil Engineering in South Africa, 1985, 27 (7), 347-353.
[19] Li, M. H., McFalls, J., "Comparing Erosion Control Products' Performance Results from Field and Large-Scale Laboratory Testing", Indian Geotechnical Journal, 2013, 43 (4), 382-387.
[20] Villa, A., Djodjic, F., Bergström, L., Wallin, M., "Assessing Soil Erodibility of Swedish Clay Soils-Comparison of Two Simple Soil Dispersion Methods", Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science, 2012, 62, 260-269.
[21] Sherard, J. L., Decker, R. S., "Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Projects", American Society for Testing and Materials, 1977.
[22] Sherard, J. L., Dunnigan, L. P., Decker, R. S., "Pinhole Test for Identifying Dispersive Soils", ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 1976, 102, 69-85.
[23] Sherard, L., Dunnigan, L. P., Decker, R. S., "Identification and Nature of Dispersive Soils", ASCE Journal of Geotechnical Division, 1976, 102 (GT4), 69-85.
[24] Mitchell, J. K., "Fundamentals of Soil Behaviour", John Wiley & Sons Inc., US, 1993.
[25] Ouhadi, V. R., Bayesteh, H., "Fundamental Factors Impacting on the Dispersivity Performance of Kaolinite and Illite", The First International Conference on Environmental Engineering, Ain-Shams University, Egypt, 2005, pp 940-947.
[26] Bell, F. G., Maud R. R., "Dispersive Soils: A Review from a South African Perspective", Quarterly Journal of Engineering Geology, 1994, 11, 195-21.

Journal of Civil and Environmental Engineering
Volume 45, Issue 3, Autumn 2015

EXTENDED ABSTRACT

Validation of Dispersion Tests in Soils with Low Plasticity and Low Dispersion Potential (A Case Study on Parts of Iran Regions)

Seyed Morteza Marandi [a,*], Salaheddin Hamidi [a], Ali Salajegheh [b]

[a] *Department of Civil Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran*
[b] *Azad University of Estahban, Shiraz , Iran*

Received: 24 December 2014; **Accepted:** 06 June 2015

Keywords:
Dispersion, Crumb test, Pinhole test, Double hydrometer Test, Chemical tests, Sample disturbance.

1. Introduction

Dispersive clay soils are easily separated and scattered without any mechanical stimulation in water with low salt concentration [1]. Dispersive soils are observed in different parts of the world including Australia, Brazil, New Zealand, the United States and many areas of Iran [2-4]. The Common laboratory dispersion tests are Crumb test, double hydrometer test, pinhole test and chemical test. Many studies are conducted on soil dispersion for correcting the problems and errors of double hydrometer test [5], evaluation of appropriate criteria [6-7] and comparing the results of laboratory and field experiments [8]. Although, extensive researches carried out to determine the dispersion potential of the soils, affecting factors on dispersion phenomenon and validation of the soil dispersion tests, no comprehensive studies have been performed on the reliability of the results of dispersion tests in soils with low plasticity and low dispersion potential. In this study, 28 soil samples with low plasticity and low dispersion potential were gathered from different regions of Iran, and various tests such as Crumb test, double hydrometer test, pinhole test and chemical test were performed. The results indicated that the dispersion criterion suggested by Sherard for determining the dispersion potential should be modified. Also, the soil sample disturbance has a great impact on the test results, especially in the pinhole and Crumb test results.

2. Material and method

In this research soil samples were collected from different parts of Iran. The Global Positioning System (GPS) and some engineering properties of soil samples are shown in Fig. 1.

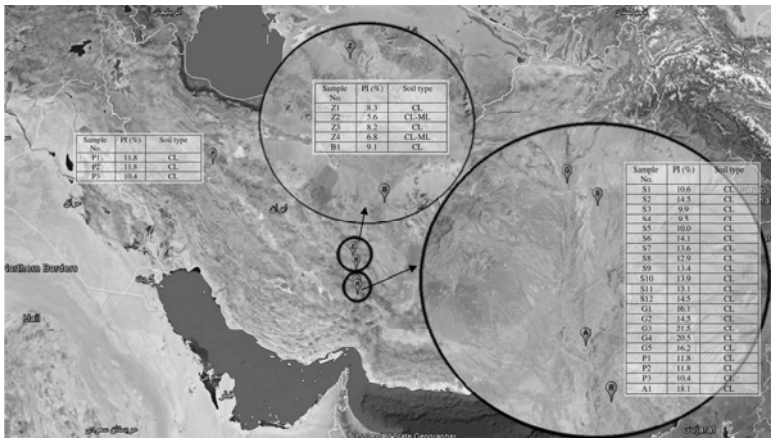


Fig. 1. Location of the soil samples and their engineering properties on Iran map

* Corresponding Author
E-mail addresses: marandi@uk.ac.ir (Seyed Morteza Marandi), s.hamidi@eng.uk.ac.ir (Salaheddin Hamidi), ali.salajegheh@yahoo.com (Ali Salajegheh).

It should be noted that the depth of soil sampling was 0.5 to 3 meters. Then Crumb test, double hydrometer test, pinhole test and chemical tests were performed on the soil samples according to ASTM standards.

Table 1. Results of common dispersion tests on soil samples

	Dispersion Grade – Crumb		Double Hydrometer			Chemical Test	
Sample	Remolded Specimen	Natural Specimen	Decker and Dunnigan, [6]	Bell and Maud, [9]	Dispersion Grade Pinhole	SAR	Sherard's chemical criterion, [10]
S1	Intermediate	Intermediate	Intermediate	Slightly Dispersive	Non-dispersive	7.0	Intermediate
S2	Non-dispersive	Intermediate	Intermediate	Slightly Dispersive	Non-dispersive	9.8	Intermediate
S3	Non-dispersive	Intermediate	Intermediate	Moderately Dispersive	Non-dispersive	24.9	Dispersive
S4	Non-dispersive	Intermediate	Intermediate	Slightly Dispersive	Slightly to moderately dispersive	11.4	Intermediate
S5	Non-dispersive	Non-dispersive	Non-dispersive	Non-dispersive	Non-dispersive	2.8	Nondispersive
S6	Intermediate	Dispersive	Intermediate	Slightly Dispersive	Slightly to moderately dispersive	8.4	Intermediate
S7	Non-dispersive	Dispersive	Non-dispersive	Non-dispersive	Non-dispersive	4.7	Nondispersive
S8	Non-dispersive	Non-dispersive	Non-dispersive	Non-dispersive	Non-dispersive	3.4	Nondispersive
S9	Non-dispersive	Non-dispersive	Non-dispersive	Non-dispersive	Non-dispersive	3.4	Nondispersive
S10	Non-dispersive	Dispersive	Intermediate	Slightly Dispersive	Slightly to moderately dispersive	9.1	Intermediate
S11	Dispersive	Dispersive	Intermediate	Slightly Dispersive	Slightly to moderately dispersive	8.1	Intermediate
S12	Dispersive	Dispersive	Intermediate	Slightly Dispersive	Dispersive	9.7	Intermediate
G1	Non-dispersive	Non-dispersive	Non-dispersive	Non-dispersive	Non-dispersive	42.3	Dispersive
G2	Non-dispersive	Dispersive	Non-dispersive	Non-dispersive	Slightly to moderately dispersive	7.4	Intermediate
G3	Non-dispersive	Non-dispersive	Non-dispersive	Non-dispersive	Non-dispersive	15.0	Intermediate
G4	Non-dispersive	Intermediate	Non-dispersive	Non-dispersive	Non-dispersive	11.6	Intermediate
G5	Non-dispersive	Non-dispersive	Non-dispersive	Non-dispersive	Non-dispersive	4.9	Nondispersive
P1	Non-dispersive	Dispersive	Non-dispersive	Non-dispersive	Non-dispersive	55.2	Intermediate
P2	Non-dispersive	Dispersive	Non-dispersive	Non-dispersive	Non-dispersive	34.7	Intermediate
S1	Non-dispersive	Dispersive	Non-dispersive	Non-dispersive	Non-dispersive	34.9	Intermediate
S2	Non-dispersive	Non-dispersive	Intermediate	Slightly Dispersive	Slightly to moderately dispersive	291.7	Dispersive
S3	Intermediate	Dispersive	Intermediate	Slightly Dispersive	Non-dispersive	49.9	Nondispersive
S4	Non-dispersive	Intermediate	Intermediate	Slightly Dispersive	Slightly to moderately dispersive	515.1	Dispersive
S5	Non-dispersive	Intermediate	Intermediate	Slightly Dispersive	Slightly to moderately dispersive	699.5	Dispersive
S6	Non-dispersive	Highly-dispersive	Intermediate	Slightly Dispersive	Non-dispersive	73.0	Dispersive
S7	Non-dispersive	Dispersive	Intermediate	Slightly Dispersive	Non-dispersive	540.6	Dispersive
S8	Non-dispersive	Intermediate	Non-dispersive	Slightly Dispersive	Slightly to moderately dispersive	73.9	Dispersive
S9	Non-dispersive	Dispersive	Non-dispersive	Non-dispersive	Slightly to moderately dispersive	69.5	Dispersive

3. Results and discussion

The results of experiments are summarized in Table 1. The Crumb test results made on remolded or disturbed samples showed that the dispersion potential is less than what was found for natural or undisturbed samples. Hence, the reliability of Crumb test results made on disturbed samples are not reliable. Comparing the experimental results

of undisturbed samples in Crumb tests with pinhole and chemical tests shows that the dispersion potential of undisturbed samples are more reliable than disturbed samples. Also, based on existing criteria, and by comparing the double hydrometer test results with other results in Table 1 indicate that, double hydrometer test shows underestimated dispersion potential for soil samples. Despite of that, the pinhole test results are the most reliable dispersion test, however the dispersion potential obtained from pinhole tests, are less than real dispersion potential in Crumb tests. One of the main factors that reducing the dispersion potential in pinhole test samples should be sensitivity of the clays to sample disturbance. In the soil samples with high percentage of sodium, the results of chemical analysis indicates that the Sherard's chemical criterion figure is more than it's real dispersion potential.

In double hydrometer test, the conventional criteria and test procedure prevent accurate determination of dispersion potential. Therefore, in this study a new criterion for determination of the dispersion potential for soils with low plasticity and low dispersion potential is proposed for zonation of Iran (Table 2).

Table 2. The proposed criterion for soils with low plasticity and low dispersion potential in double hydrometer test

Dispersion Percent	Soil Classification
≤ 10	Non-Dispersive
10 - 30	Intermediate
≥ 30	Dispersive

4. Conclusions

The main results of this paper are summarized as follows:

1) Soil sample disturbance is an important factor that can affect the results in pinhole and Crumb test.

2) In double hydrometer test, the conventional criteria and test procedure prevent accurate determination of dispersion potential. Therefore, a new criterion for the determination of the dispersion potential for soils with low plasticity and low dispersion potential is proposed for zonation of Iran.

3) Sherard's chemical criterion in soils with low plasticity and low dispersion potential should be modified.

5. References

[1] Sherard, J. L., Ryker, N. L., Decker, R. S., "Piping in Earth Dams of Dispersive Cla", The ASCE Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures, 1972, Vol. 1, pp 589-626.

[2] Ouhadi, V. R., Goodarzi, A. R., "Assessment of the Stability of a Dispersive Soil Treated by Alum", Journal of Engineering Geology, 2006, 85, 91-101.

[3] Abbasi, N., Nazifi, M. H., "Assessment and Modification of Sherard Chemical Method for Evaluation of Dispersion Potential of Soils", Geotechnical and Geological Engineering, 2013, 31, 337-346.

[4] Asgari, F. A., Fakher, A., "Soil Swelling and Dispersion from a Geotechnical Engineers Point of View", Jahad Daneshgahi Publication, Tehran University, 1994.

[5] Maharaj, A., Paige-Green, P., "The SCS Double Hydrometer Test in Dispersive Soil Identification", The 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, France, 2-6 September, 2013.

[6] Decker, R. S., Dunnigan, L. P. "Development and Use of the Soil Conservation Service Dispersion Test. In: Sherard, J. L. & Decker, R. S. (Eds) Proceedings Symposium on Dispersive Clays, Related Piping and Erosion in Geotechnical Projects", ASTM Special Publication, 1977, 623, 94-109.

[7] Elges, H. F. W. K., "Problem Soils in South Africa - State of the Art", The Civil Engineering in South Africa, 1985, 27 (7), 347-353.

[8] Li, M. H., McFalls, J., "Comparing Erosion Control Products' Performance Results from Field and Large-Scale Laboratory Testing", Indian Geotechnical Journal, 2013, 43 (4), 382-387.

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

[10] Sherard, L., Dunnigan, L. P., Decker, R. S., "Identification and Nature of Dispersive Soils", ASCE Journal of Geotechnical Division, 1976, 102 (GT4), 69-85.