

## بررسی نقش آنیون‌های موجود در عصاره اشباع در پتانسیل واگرایی خاک‌های رسی

نادر عباسی\*

\* نگارنده مسئول، نشانی: کرج، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، تلفن: ۰۲۷۰۵۳۲۰، پیام نگار:

nader\_iaeri@yahoo.com

\* استادیار موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

تاریخ دریافت: ۸۹/۸/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۴/۱۲

### چکیده

واگرایی خاک پدیده‌ای است که طی آن ذرات خاک در اثر تماس با آب به صورت شناور در می‌آیند و بر اثر نیروی حاصل از جریان آب از محیط خارج می‌شوند. برای شناسایی پتانسیل واگرایی، روش‌های آزمایشگاهی متعددی شامل هیدرومتری دوگانه، پین هول، و روش املاح آب منفذی به کار گرفته شده‌اند. با اینکه ماهیت واگرایی خاک‌های رسی شیمیایی است نتایج حاصل از روش‌های شناسایی مبتنی بر خصوصیات شیمیایی خاک‌ها دقیق نیست و با نتایج حاصل از سایر روش‌ها مطابقت ندارد. این پژوهش به منظور ارزیابی و شناخت چگونگی تأثیر برخی از آنیون‌های غالب موجود در عصاره اشباع خاک‌ها در پتانسیل واگرایی به اجرا درآمده است. به این منظور، ابتدا نمونه‌های خاک با مقادیر مختلف کاتیون و آنیون تهیه و آزمایش‌های مختلف شناسایی روی آنها اجرا شد. سپس آزمایش‌های واگرایی به دو روش؛ پین هول و روش املاح محلول در آب منفذی (شرارد) روی کلیه نمونه‌های طبیعی و مصنوعی اجرا شد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها و بررسی‌ها نشان داد که واگرایی خاک پدیده‌ای فیزیکوشیمیایی است که در اثر ترکیب‌هایی خاص از نوع و میزان آنیون‌ها و کاتیون‌های موجود در خاک به وجود می‌آید و برای ارزیابی پتانسیل واگرایی، علاوه بر میزان و نوع کاتیون‌ها، لازم است به میزان و نوع آنیون‌های موجود در عصاره اشباع خاک نیز توجه شود.

### واژه‌های کلیدی

پین هول، روش شیمیائی شرارد، واگرایی خاک

### مقدمه

می‌شوند و به عبارتی دیگر، واگرایی باعث ایجاد فرسایش درونی و بیرونی در خاک و نهایتاً منجر به تخریب سازه‌های مجاور خاک می‌شود. شناسایی و تشخیص صحیح واگرایی یکی از اقدامات اساسی جهت جلوگیری از تخریب زود هنگام سازه‌های آبی است. روش‌های متعددی برای شناسایی خاک‌های واگرا ارائه شده‌اند، ولی بی‌دقتی در اجرای این آزمایش‌ها و یا تفسیر نامناسب نتایج به دست آمده ممکن است همراه‌کننده باشد و شرایط نیز به شکلی

خاک‌های واگرا از جمله خاک‌های مشکل‌آفرین بوده و در سازه‌های آبی نظیر سدهای خاکی و کانال‌های آبیاری باعث ایجاد صدمات و تخریب‌های موضعی بسیاری می‌شوند. در خاک‌های رسی واگرا به علت ماهیت شیمیایی خاص آنها از جمله تجمع یون‌های تک ظرفیتی سدیم، ذرات در اثر مجاورت با آب از یکدیگر جدا و در اثر جریان آب ناشی از نشت و یا بارندگی به خارج از محیط منتقل

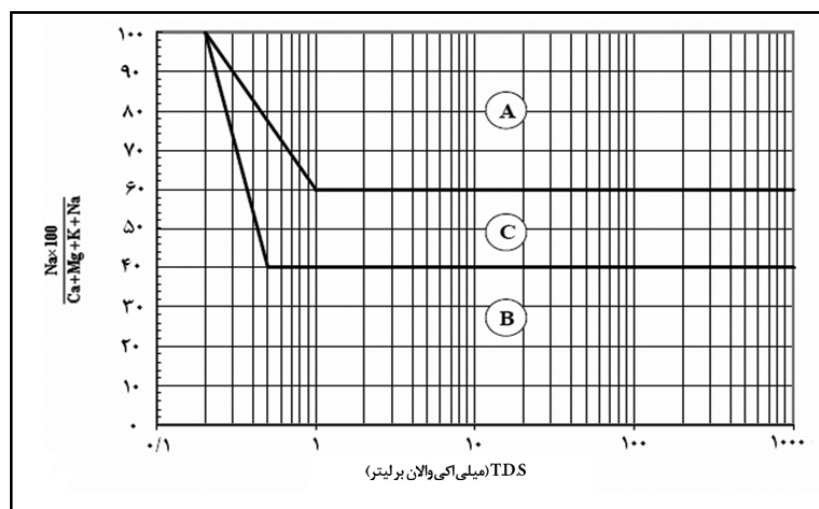
روش املاح محلول در آب منفذی را در قالب یک نمودار مطابق شکل ۱ برای تشخیص خاک‌های واگرا ارائه کردند. در این روش، پتانسیل واگرایی خاک‌ها با توجه به عناصر شیمیایی موجود در آب منفذی نمونه خاک ارزیابی می‌شود. بدین ترتیب که از نمونه مورد بررسی عصاره اشباع تهیه می‌شود؛ سپس مقادیر چهار کاتیون اصلی نمونه یعنی کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم تعیین و با محاسبه کل املاح محلول (TDS) و درصد سدیم (PS) مطابق رابطه شماره ۱، پتانسیل واگرایی خاک با استفاده از شکل (۱) ارزیابی می‌شود.

$$TDS = Na + Ca + Mg + K$$

$$P.S = \frac{Na}{Na + Ca + Mg + K} \times 100 \quad (1)$$

در رابطه مذکور، کلیه کاتیون‌ها برحسب میلی اکی والان بر لیتر هستند. بر اساس این نمودار و مقادیر کاتیون‌های موجود در خاک، نمونه‌ها در سه گروه؛ واگرا (A)، ناواگرا (B)، و منطقه بینابین (C) طبقه‌بندی می‌شوند.

ناصحیح تفسیر شود. آزمایش‌های کرامب (امرسون)، هیدرومتری مضاعف<sup>۱</sup>، پین هول<sup>۲</sup> و روش آنالیز شیمیایی<sup>۳</sup> از جمله روش‌های آزمایشگاهی تعیین پتانسیل واگرایی خاک‌ها هستند که هر یک مزایا و معایب خاص خود را دارد (Knodel, 1991). ماهیت واگرایی شیمیایی است و از این رو تمایل به فرسایش در آن متأثر از خواص شیمیایی خاک از جمله نوع کانی‌های رسی، نوع و میزان آنیون‌ها و کاتیون‌های موجود در آب منفذی، و کیفیت شیمیایی آب جاری است. بدین ترتیب در صورت تحلیل و تفسیر صحیح، روش‌های شیمیایی می‌توانند کارآیی و قابلیت بیشتری در شناسایی پتانسیل واگرایی داشته باشند. با اینکه روش‌های شیمیایی متعددی برای ارزیابی واگرایی خاک‌ها ارائه شده‌اند، اغلب ناکارآمد هستند و استفاده از آنها در تشخیص واگرایی خاک‌ها عمدتاً مورد تردید جدی است. اینگل و ایکسان (Ingles & Aitchison, 1969) نتایج بررسی‌های خود را در زمینه نحوه تأثیر شیمی آب و خاک در پدیده واگرایی و همچنین حدود سدیم تبادل را در خاک‌های واگرا و ناواگرا تعیین کردند. شرارد و همکاران (Sherard et al., 1976) روش شیمیایی موسوم به



شکل ۱- نمودار روش شیمیایی شرارد

1-Double hydrometer test  
3- Sherard chemical method

2- Pinhole test

دادند که نمودار شرارد برای خاک‌هایی که مقدار املاح محلول آنها بیشتر از ۵۰ میلی‌اکی‌والانت در لیتر است دقت کافی ندارد و به‌ویژه در خاک‌های حاوی مقادیر TDS بیشتر از ۱۰۰ میلی‌اکی‌والانت در لیتر با خطای قابل توجه همراه است. بر این اساس و با توجه به ویژگی‌های خاک‌های ایران نموداری جدید برای ارزیابی پتانسیل واگرایی پیشنهاد و دقت آن بر اساس آزمایش تعداد زیادی نمونه از خاک‌های مناطق خوزستان، سیستان و بلوچستان، و استان‌های مرکزی کشور تأیید شد. در این روش از سه معیار شیمیایی EC، pH و SAR استفاده شده است. فرزانه و همکاران (Farzaneh *et al.*, 2001) علت مطابقت نداشتن نتایج آزمایش‌های شیمیایی و فیزیکی را این طور می‌گویند که در معیار شرارد توصیه شده است که عصاره-گیری باید در رطوبتی معادل حد روانی انجام شود، در حالی که به‌طور معمول عصاره‌گیری در رطوبت اشباع صورت می‌گیرد که این رطوبت عموماً بسیار بیشتر از رطوبت حد روانی است. اوحدی و گودرزی (Ouhadi & Goodarzi, 2006) با استفاده از مخلوط خاک بنتونیت و نمک‌های سدیم با منشا آنیونی متفاوت مجموعه‌ای از نمونه‌های مصنوعی خاک - الکترولیت را به نسبت ۱:۵۰ تهیه و سپس تغییر رفتار خاک را بررسی کردند و دریافتند که وجود کاتیون سدیم در غلظت‌های کم باعث ایجاد ساختمان پراکنده و در غلظت زیاد موجب ایجاد ساختمان به هم چسبیده (فولوکوله) می‌شود. لشکری پور و همکاران (Lashkaripour *et al.*, 2006) نشان دادند که نتایج آزمایش‌های پین‌هول و شیمیایی باهم مطابقت ندارند ولی نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه و پین‌هول هم‌پوشانی خوبی باهم دارند.

بدین ترتیب می‌بینیم که هنوز در خصوص دقت و قابلیت اعتماد روش‌های ارزیابی خاک‌های واگرا، به‌ویژه روش‌های شیمیایی، تردید و بی‌اطمینانی قابل توجهی مطرح است. این در حالی است که استفاده از روش‌های

براساس تحقیقات کرافت و آشیاردی (Craft & Acciardi, 1984) روی ۲۲۳ نمونه از ۶ گروه مختلف خاک از مناطق مختلف ایالات متحده آمریکا، روش شیمیایی املاح محلول در آب منفذی برای تشخیص رس‌های واگرا نامناسب معرفی شده است. در این تحقیقات، نتایج آزمایش‌های فیزیکی در ۵ گروه از نمونه‌ها با نتایج آزمایش املاح محلول در آب منفذی مطابقت نداشت و به عقیده محققان، این موضوع ناشی از خاصیت کیفی آزمایش‌های فیزیکی، ناهمگنی نمونه‌های خاک، و مشکلات استفاده عصاره اشباع در روش شیمیایی است. بل و همکاران (Bell *et al.*, 1991) نشان دادند که روش املاح محلول در آب منفذی (شیمیایی شرارد) قادر به تشخیص رس‌های واگرا برای خاک‌های آفریقایی جنوبی نیست و برای تشخیص واگرایی روش شیمیایی جدیدی را بر اساس مشخصه‌های شیمیایی جدید معرفی کردند که مشتمل است بر: درجه اسیدیته عصاره اشباع خاک (pH)، درصد سدیم قابل تبادل (ESP)، درصد منیزیم قابل تبادل (EMgP)، هدایت الکتریکی عصاره اشباع (EC)، نسبت جذب سدیم (SAR). کرافت (Craft, 1998) با اجرای آزمایش‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی روی نمونه‌های تهیه شده از مناطق مختلف اکلاهما نشان داد که روش شیمیایی شرارد قادر به تشخیص رس‌های واگرا نیست. دی دیک (Didiek, 2007) با بررسی ۱۲ نمونه خاک از سد دورانگ گانگ<sup>۱</sup> اندونزی نشان داد که نتایج حاصل از ارزیابی واگرایی نمونه‌ها با استفاده از روش‌های پین‌هول، کرامب، و شیمیایی شرارد با یکدیگر مطابقت ندارد. بوانشواری و همکاران (Bhuvaneshwari *et al.*, 2007) تأثیر آهک و مخلوط آهک با خاکستر را در کنترل واگرایی بررسی و مقادیر بهینه را برای کنترل واگرایی شامل ۵ درصد آهک به تنهایی و ترکیب ۲ درصد آهک و ۱۵ درصد خاکستر را برای مخلوط آهک با خاکستر تعیین کردند. رحیمی و دلفی (Rahimi & Delfy, 1992) نشان

شدند. نمونه‌ها از نظر کیفیت شیمیایی نیز در محدوده‌ای وسیع از میزان شوری و انواع آنیون‌ها و کاتیون‌های مختلف قرار داشتند. به منظور تهیه نمونه‌هایی با شرایط و ویژگی‌های شیمیایی دلخواه و بررسی تأثیر نوع و میزان برخی املاح در پتانسیل واگرایی، در آزمایشگاه با افزودن مقادیر مختلفی از ۴ نوع ماده شیمیایی با ریشه کاتیونی سدیم و آنیون‌های مختلف (کلرید سدیم، کربنات سدیم، سولفات سدیم، و سدیم پلی فسفات) به یک خاک ناواگرا (خاک شماره ۲۷) و یک خاک واگرا (خاک شماره ۱۱)، ۱۹ نمونه تهیه شد. جدول شماره ۱ مشخصات نمونه‌های ساخته شده همراه با نوع و درصد ماده شیمیایی مورد استفاده را نشان می‌دهد. برای تهیه نمونه‌های ساختگی (نمونه‌های A1 الی A17) ابتدا مقدار ماده شیمیایی مورد نظر بر حسب وزن خاک خشک مشخص و در آب کاملاً حل شد. سپس خاک غیر واگرای شماره ۲۷ به محلول اضافه و مخلوطی به صورت دوغاب تهیه گردید. مخلوط تهیه شده در هوای آزاد نگهداری و بعد از خشک شدن کامل، کوبیده و از الک شماره ۱۰ عبور داده شد. نمونه‌های ساختگی A18 و A19 نیز با اضافه کردن به ترتیب ۱۰ و ۵ درصد نمک طعام ( $NaCl$ ) به خاک واگرایی شماره ۱۱ به دست آمد.

شیمیایی به دلیل اینکه در اغلب پروژه‌ها پارامترهای شیمیایی خاک‌ها به خاطر مقاصد دیگری تعیین می‌شوند و در دسترس هستند، می‌تواند در کاهش هزینه‌ها مؤثر باشد. ضمن اینکه آزمایش‌های شیمیایی دقت نسبتاً زیادی دارند و درصد خطای انسانی در آنها کمتر است. با توجه به دلایل عنوان شده تمایل زیادی به استفاده از روش‌های شیمیایی به‌ویژه روش شرارد که از پارامترهای سهل الوصولی استفاده می‌کند، وجود دارد که در اغلب پروژه‌ها از آن استفاده می‌شود. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی قابلیت و توانایی روش شیمیایی شرارد و تعیین تأثیر برخی از آنیون‌ها و کاتیون‌های موجود در عصاره اشباع در واگرایی خاک‌ها و ارائه پیشنهادی اصلاحی ممکن اجرا شده است.

## مواد و روش‌ها

### نمونه خاک‌های مورد بررسی

ابتدا ۲۷ نمونه خاک از مناطق مختلف کشور با مشخصات فیزیکی و شیمیایی متفاوت تهیه شد که حد روانی متنوعی از ۲۳ تا ۷۴ درصد داشتند. چهار مورد از نمونه‌ها بر اساس سیستم طبقه‌بندی یونیفاید در گروه ML، ۴ مورد در گروه CH، و بقیه در گروه CL طبقه‌بندی

جدول ۱- مشخصات نمونه‌های ساختگی تهیه شده

شماره نمونه	شماره خاک	ماده	درصد اضافه	شماره نمونه	شماره خاک	ماده شیمیایی	درصد اضافه
A0	۲۷	-	-	A10	۲۷	$Na_2SO_4$	۱۲
A1	۲۷	NaCl	۸	A11	۲۷	$Na_2SO_4$	۸
A2	۲۷	NaCl	۴	A12	۲۷	$Na_2SO_4$	۴
A3	۲۷	NaCl	۱	A13	۲۷	$Na_2SO_4$	۱
A4	۲۷	$Na_2CO_3$	۱۵	A14	۲۷	$(NaPO_3)_3$	۱۲
A5	۲۷	$Na_2CO_3$	۸	A15	۲۷	$(NaPO_3)_3$	۸
A6	۲۷	$Na_2CO_3$	۴	A16	۲۷	$(NaPO_3)_3$	۴
A7	۲۷	$Na_2CO_3$	۱	A17	۲۷	$(NaPO_3)_3$	۱
A8	۲۷	$Na_2CO_3$	۰/۵	A18	۱۱	NaCl	۱۰
A9	۲۷	$Na_2SO_4$	۲۰	A19	۱۱	NaCl	۵

### آزمایش‌های شناسایی

محلول در پتانسیل واگرایی خاک‌ها بود، ویژگی‌ها و شاخص‌های شیمیایی نمونه خاک‌های طبیعی و ساختگی نظیر مقادیر کاتیون‌ها، آنیون‌ها، میزان هدایت الکتریکی، و اسیدیته بر اساس روش‌های استاندارد تعیین شد. جدول شماره ۲ مشخصات فیزیکی نمونه‌های طبیعی و جدول‌های شماره ۳ و ۴ مشخصات شیمیایی نمونه‌های به‌ترتیب طبیعی و ساختگی مورد استفاده را نشان می‌دهد.

به‌منظور شناسایی اولیه نمونه خاک‌های طبیعی، ابتدا مطابق استاندارد ASTM آزمایش‌های فیزیکی شامل این موارد اجرا شد: دانه‌بندی (ASTM-D422)، تعیین حدود آتربرگ (ASTM-D4318)، تراکم (ASTM-D698)، و طبقه‌بندی (Anon,2000). با توجه به اینکه هدف اصلی این پژوهش بررسی و تعیین تأثیر میزان و نوع املاح

جدول ۲- مشخصات نمونه‌های خاک طبیعی مورد بررسی

شماره نمونه	مشخصات تراکمی			حدود اتربرگ		بافت		
	دانسیتته خشک	رطوبت	حد خمیری	حد روانی	ماسه	سیلت	رس	
								ماکزیمم
ML	۱/۷۵	۱۷	۲۴	۳۱	۲۴	۴۸	۲۸	۱
CL	۱/۸۱	۱۷/۵	۲۰	۲۹	۲۸	۴۷	۲۵	۲
CL	۱/۷۲	۱۹/۵	۲۰	۳۴/۵	۲۶	۳۹	۳۵	۳
CL	۱/۷۴	۱۹/۶	۲۳/۵	۳۶	۳۲	۳۸	۳۰	۴
CL	۱/۸۴	۱۵	۲۱	۲۲/۵	۳۰	۵۴	۱۶	۵
CL	۱/۷۵	۱۸/۵	۲۲	۳۲/۵	۲۴	۴۸	۲۸	۶
CL	۱/۷۴	۱۹/۷۵	۱۹/۷	۳۱	۱۵	۶۷	۱۸	۷
CH	۱/۵۵	۲۵/۵	۲۸	۷۰	۱۶	۳۵	۴۹	۸
CL	۱/۶۶	۲۱/۲	۲۵	۴۶	۶	۶۱	۳۳	۹
CL	۱/۶	۲۴	۲۳	۵۴	۸	۴۲	۵۰	۱۰
CH	۱/۴۸	۲۵/۵	۳۱	۶۴	۱۱	۴۳	۴۶	۱۱
CH	۱/۵۳	۲۵/۷	۲۶	۵۷	۷	۴۵	۴۸	۱۲
CL	۱/۶۷	۲۱/۴	۲۶	۳۸	۱۲	۵۰	۳۸	۱۳
CL	۱/۷۱	۱۹	۲۲/۵	۳۵	۲۵	۴۱	۳۴	۱۴
CH	۱/۶۴	۲۲	۲۷	۵۶	۲	۴۹	۴۹	۱۵
CL	۱/۷۶	۱۸	۲۰/۲	۳۴	۱	۶۳	۳۶	۱۶
CL	۱/۶۸	۲۰	۲۵	۳۷	۱۲	۶۲	۲۶	۱۷
CL	۱/۸۱	۱۷/۵	۱۸	۳۰	۱۶	۵۲	۳۲	۱۸
CL	۱/۶۴	۲۲/۲۵	۲۳	۴۰	۰	۵۶	۴۴	۱۹
CL	۱/۷	۱۹	۲۲	۳۱	۴	۷۲	۲۴	۲۰
ML	۱/۶۲	۲۲/۲	۲۶/۵	۴۱/۵	۱۱	۶۶	۲۳	۲۱
CL-ML	۱/۸۲	۱۵	۲۳	۲۴/۵	۷	۷۶	۱۷	۲۲
CL	۱/۶۷	۱۹	۲۲	۴۰	۰	۵۲	۴۸	۲۳
CL	۱/۷۳	۱۷	۲۰	۳۱	۷	۶۷	۲۶	۲۴
CL	۱/۷۹	۱۷	۲۰/۲	۳۰	۱۳	۶۲	۲۵	۲۵
CL	۱/۶۷	۲۰	۲۳	۳۴	۱۵	۵۷	۲۸	۲۶
CL	۱/۶۳	۲۰/۳	۲۰/۶	۳۰/۵	۱۰	۵۵	۳۵	۲۷

جدول ۳- نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌های طبیعی

شماره نمونه	آنیون‌ها (میلی‌اکی والان بر لیتر)				کاتیون‌ها (میلی‌اکی والان بر لیتر)			pH	EC (دسی‌زیمنس بر متر)
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>		
۱	۳/۸	۸/۲۱	۹	۰	۱۲	۴	۸/۶۲	۷/۰۳	۲/۶۱
۲	۴/۲	۳/۰۶	۱	۰	۴	۴	۶/۵۹	۷/۱۲	۱/۱۲
۳	۳	۱۲/۹	۴۵	۰	۲۸	۲۲	۲۳/۶۱	۷/۱۲	۷/۱۵
۴	۲/۴	۳۸/۸۵	۶۵	۰	۱۶	۸	۱۵۴/۵۴	۶/۹	۱۴/۵۳
۵	۶	۳/۰۹	۰	۰	۴	۱۰	۲/۷۱	۷/۲۸	۱/۶۶
۶	۳/۴	۷/۵۴	۰	۰	۴	۴	۱۳/۰۷	۶/۳۶	۱/۷۳
۷	۳/۲	۵۵/۶۷	۲۲	۰	۳۰	۱۰	۱۲۷/۳۷	۶/۸۳	۱۲/۱۷
۸	۲/۸	۴۳/۶۵	۲۸	۰	۱۴	۳۴	۱۴۱/۶۷	۷/۱۹	۱۱/۹۳
۹	۲/۲	۴۰/۷۹	۵۳	۰	۳۰	۲۲	۱۵۰	۶/۶۵	۱۴/۱۹
۱۰	۲/۶	۴/۱۷	۶	۰	۲	۱۰	۱۰/۲۳	۷/۳۹	۱/۸۵
۱۱	۳/۶	۳۵/۵۵	۳۳	۰	۱۰	۱۲	۷۷/۲۷	۶/۵۷	۱۰
۱۲	۳/۴	۷/۹۴	۰	۰	۴	۰	۱۸/۲۵	۶/۸۱	۱/۹۳
۱۳	۲/۴	۴۰/۴۴	۴۶	۰	۱۲	۳۶	۱۲۹/۱۷	۷/۵۴	۱۲/۱۹
۱۴	۴/۲	۱۸/۴۵	۷	۰	۱۴	۳۰	۲۶/۱۴	۷/۱۳	۴/۳۴
۱۵	۳	۸۸/۷۷	۱۱۱	۰	۳۴	۱۶	۱۵۰	۶/۹۴	۱۶/۷
۱۶	۲/۶	۳۰/۹۱	۱۳۱۱	۰	۹۴	۱۴۲	۱۵۶۲/۵	۶/۴۵	۸۸/۴
۱۷	۲/۴	۳۷	۳۷۸	۰	۶۴	۱۲	۳۳۵/۶۵	۶/۸	۳۸/۴
۱۸	۳/۸	۲۴/۸	۱۲۵	۰	۴۰	۲۴	۱۷۲/۷۳	۷/۱۲	۱۶/۴۱
۱۹	۲/۴	۱۸/۸۵	۲۱۶۳	۰	۱۲۸	۲۳۸	۲۰۵۰	۶/۹۵	۱۲۹/۸
۲۰	۳/۲	۱۷/۹	۹۰	۰	۴۰	۳۴	۶۱	۷/۲	۱۰/۲۷
۲۱	۲/۸	۱۳	۲۲۳	۰	۱۳۰	۶۶	۲۲۸	۶/۹۸	۲۱/۸
۲۲	۳/۶	۳۶/۹۴	۱۳۴۵	۰	۹۶	۱۳۴	۸۸۷/۵	۶/۸۷	۸۷/۹
۲۳	۲/۴	۲۷/۲۲	۳۳۱	۰	۶۲	۵۸	۳۰۰	۷	۳۰/۹
۲۴	۲/۴	۲۹/۳۶	۵۰	۰	۲۶	۲۰	۱۲۳	۶/۸۴	۱۰/۵
۲۵	۲/۲	۱۷/۱	۲۱	۰	۲۴	۱۶	۴۷/۷۳	۷/۱۵	۵/۹۲
۲۶	۱/۴	۱۹/۵۶	۳۴۰	۰	۵۸	۸۰	۳۴۱/۶۷	۶/۲	۳۱/۶
۲۷	۴	۱۹/۶۵	۲۶۲	۰	۴۲	۲۵	۱۳۵/۲۹	۶/۷۹	۲۲/۹

جدول ۴- نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌های ساختگی

SAR	آنیون‌ها (میلی‌اکی والان بر لیتر)				کاتیون‌ها (میلی‌اکی والان بر لیتر)		pH	EC (دسی‌زیمنس بر متر)	شماره نمونه
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Mg <sup>2+</sup> +Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>			
۱۵۵	۱/۴	۷/۷۷	۲۷۶۳	-	۲۱۶	۲۲۷۵	۶/۸۶	۱۴۲/۷	A1
۹۱	۲/۲	۶/۷	۱۵۵۰	-	۱۹۸	۱۲۸۰	۶/۶۹	۱۰۰	A2
۲۸	۲/۸	۱۰/۶۳	۵۶۷	-	۱۳۳	۳۲۰	۷/۲۴	۴۸/۵	A3
۱۹۸۲	۸۰۰	۱۰/۷۱	۳۱۱	۱۴۰۰	۵	۴۴۳۱	۱۰/۸۳	۹۶/۲	A4
۹۴۵	۴۰۵	۲۶/۶۶	۲۴۱	۸۲۵	۷	۲۵۰۰	۱۰/۴۸	۸۵	A5
۵۵۸	۱۵۵/۸	۱۶/۵۴	۲۶۵	۲۶۶	۳	۹۶۵/۹	۱۰/۲۴	۶۰	A6
۵۳	۴/۴	۹/۳۲	۲۷۷	-	۲۰	۲۳۵/۲۹	۷/۳	۲۸/۸	A7
۳۳	۱۰/۲	۸/۳۷	۳۳۸	-	۶۷	۲۷۰/۸۳	۷/۵۹	۳۳/۶	A8
۶۰۲	۹/۸	۶۷/۴۶	۳۰۵	-	۵۷	۴۵۴۵/۴۵	۷/۶۱	۱۰۹	A9
۴۶۴	۱۱/۶	۱۵/۵۹	۲۷۸	-	۴۷	۳۱۸۱/۸۱	۷/۷۳	۹۷	A10
۲۴۱	۵/۲	۹۱/۱۱	۲۸۰	-	۴۸	۱۶۶۶/۷	۷/۳۷	۸۳/۳	A11
۱۲۸	۵	۹۱/۹۴	۲۷۳	-	۳۶	۷۶۷/۰۴	۷/۲۲	۵۵/۱	A12
۴۱	۳/۴	۳۲/۹۳	۳۰۱	-	۴۹	۲۸۴/۱	۷/۷۴	۳۲/۴	A13
۴۸	۲۰۲	۹/۹۲	۵۱۰	-	۳۹۳	۹۵۴/۵۴	۵/۶۸	۶۵/۵	A14
۴۰	۳۳/۴	۳۴/۷۲	۳۲۶	-	۴۹۸	۸۸۶/۳۶	۵/۲۷	۵۲/۵	A15
۸۱	۱۱/۶	۳۵/۵۱	۳۴۵	-	۳۵	۴۷۷/۲۷	۵/۳۳	۴۰/۸	A16
۳۰	۴	۲۹/۶۸	۳۷۶	-	۸۰	۲۷۲/۷۳	۵/۹	۳۶/۶	A17
۲۵۳	۳/۲	۲۰/۳۹	۳۱۷۵	-	۱۴۲	۳۰۱۱/۳۶	۶/۹۴	۱۵۱/۷	A18
۱۲۶	۱/۲	۹/۶۸	۱۴۷۵	-	۱۱۳	۱۳۳۵/۲۲	۶/۹۴	۹۴/۷	A19

## آزمایش‌های واگرایی

برای تعیین پتانسیل واگرایی نمونه‌ها از دو روش آزمایشگاهی شامل روش املاح محلول در آب منفذی (شرارد) و آزمایش پین هول استفاده شد. نظر به اینکه روش پین هول مدل فیزیکی واقعی‌تری از مسئله را ارائه می‌کند و با توجه به نتایج تحقیقات قبلی مبنی بر اینکه اگر تمام شرایط و استانداردهای مورد نیاز اعم از ساخت نمونه، عمل آوری و اجرای آزمایش رعایت شود از دقت و قابلیت اعتماد بیشتری برخوردار است، در این پژوهش نتایج حاصل از روش پین هول، به عنوان مرجع تلقی و نتایج روش‌های دیگر بر اساس آن ارزیابی شد.

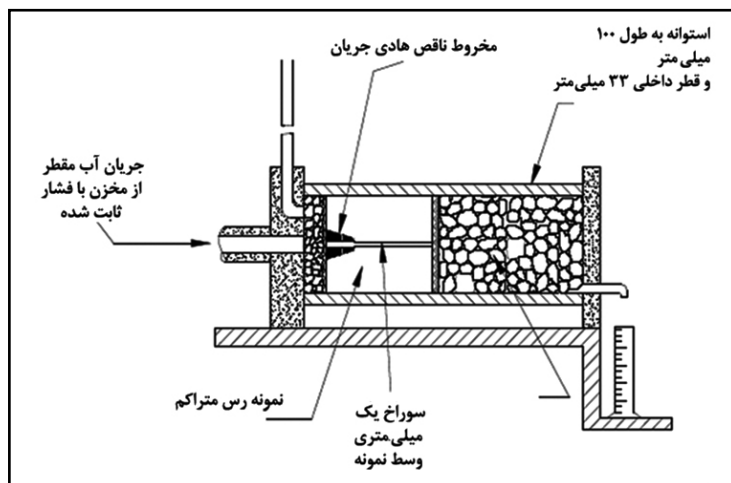
## آزمایش تعیین واگرایی به روش پین هول

بر اساس این آزمایش، رس‌ها از نظر فرسایش‌پذیری با توجه به شدت و میزان واگرایی به‌ترتیب به شش گروه D1، D2، ND4، ND3، ND2 و ND1 طبقه‌بندی می‌شوند که در این طبقه‌بندی خاک D1 بسیار واگرا و ND1 بسیار مقاوم به واگرایی است. مقدار آب و شفافیت آب خروجی در زمان معین و قطر نهائی سوراخ تعبیه شده در پایان آزمایش، معیارهای به‌کار گرفته شده در این روش برای ارزیابی شدت واگرایی نمونه‌های خاک هستند. شکل ۲ قسمت‌های مختلف دستگاه پین هول را به‌صورت شماتیک

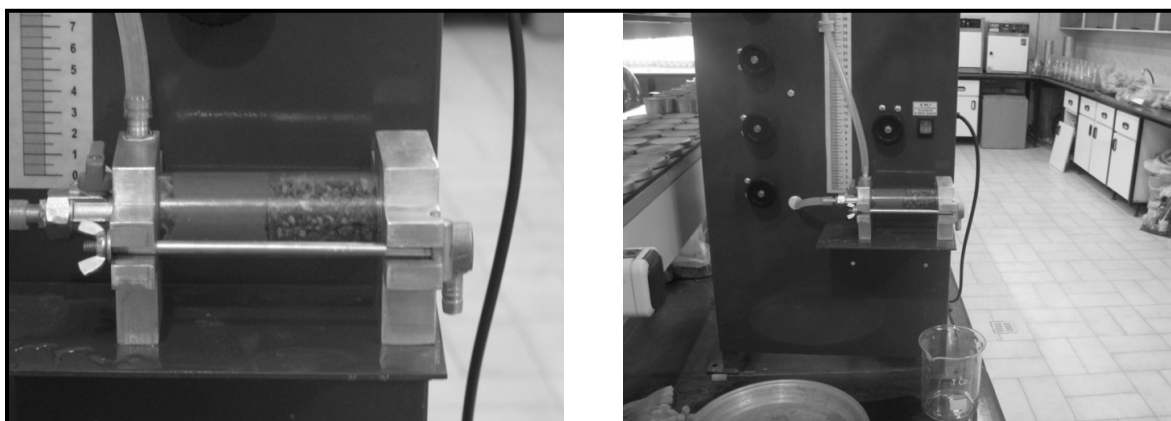
و شکل ۳ دستگاه پین هول مورد استفاده در این تحقیق را به همراه نمونه در حال آزمایش نشان می‌دهند. نمونه خاک مورد استفاده در این آزمایش ابتدا تا حدود ۲ درصد بیشتر از رطوبت بهینه حاصل از تراکم استاندارد مرطوب می‌شود و پس از آن با استفاده از استاندارد تراکم هاروارد، در قالب استوانه‌ای در ۵ لایه و هر لایه با اعمال ۱۶ ضربه با چکش فنری متراکم می‌گردد. طول نهائی و مفید نمونه آزمایشی متراکم شده بدون احتساب فیلتر شنی قبل و بعد از آن ۳۸ میلی‌متر است. پس از استقرار نمونه در قالب آزمایش، یک مخروط ناقص فلزی یا پلاستیکی که در وسط آن سوراخی به قطر ۱/۵ میلی‌متر تعبیه شده، در ابتدای جریان و مرکز نمونه نصب می‌شود. سپس به‌وسیله یک سوزن به قطر یک میلی‌متر سوراخی از میان مخروط ناقص در وسط نمونه ایجاد می‌شود.

با جریان یافتن آب مقطر تحت ارتفاع یا بارهای هیدرولیکی ۵۰، ۱۸۰، ۳۸۰، و ۱۰۲۰ میلی‌متر از سوراخ وسط نمونه در زمان‌های معین آزمایش شروع می‌شود. فرسایش‌پذیری نمونه با اندازه‌گیری شفافیت و مقدار حجم آب خروجی و قطر نهائی سوراخ تعبیه شده ارزیابی می‌شود.

سایر جزئیات مربوط به تهیه نمونه آزمایشی و مراحل آزمایش مطابق استاندارد (ASTM-D4647) بود.



شکل ۲- طرح شماتیک دستگاه پین هول (STM D4647-2000)



نمونه در حین انجام آزمایش بین هول

دستگاه بین هول مورد استفاده در پژوهش

شکل ۳- دستگاه بین هول مورد استفاده در این پژوهش

شیمیائی در رده  $DI$  (کاملاً واگرا) ولی بر اساس آزمایش بین هول در رده  $NDI$  (کاملاً مقاوم به واگرایی) ارزیابی شده‌اند.

بدین صورت که تمام نمونه‌هایی که دارای درصد سدیم زیادی هستند، از نظر معیار شیمیایی شرارد واگرا تشخیص داده شدند ولی برخی از این نمونه‌ها علی‌رغم میزان زیاد نسبت سدیم، در آزمایش بین هول ناواگرا طبقه‌بندی شدند.

## نتایج و بحث

### مقایسه نتایج روش‌های مختلف تعیین واگرایی

جدول ۵ نتایج حاصل از ارزیابی پتانسیل واگرایی نمونه‌های طبیعی را با استفاده از دو روش شیمیایی شرارد و بین هول نشان می‌دهد. در جدول پیداست که، در ۲۱ مورد از ۲۶ نمونه خاک (بیش از ۸۰ درصد موارد) نتایج حاصل از دو روش یاد شده با یکدیگر مطابقت ندارند، به طوری که در برخی موارد نمونه‌ها بر اساس روش

جدول ۵- نتایج آزمون‌های واگرایی نمونه‌های طبیعی

پتانسیل واگرایی		شماره نمونه	پتانسیل واگرایی		شماره نمونه
بین هول	روش شیمیایی		بین هول	روش شیمیایی	
ND1 (کاملاً ناواگرا)	ناواگرا	۱۴	ND2 (ناواگرا)	ناواگرا	۱
ND2 (ناواگرا)	واگرا	۱۵	ND1 (کاملاً ناواگرا)	بینابین	۲
ND1 (کاملاً ناواگرا)	واگرا	۱۶	ND2 (ناواگرا)	ناواگرا	۳
ND1 (کاملاً ناواگرا)	واگرا	۱۷	ND4 (متماثل به واگرا)	واگرا	۴
ND1 (کاملاً ناواگرا)	واگرا	۱۸	ND3 (متماثل به ناواگرا)	ناواگرا	۵
ND1 (کاملاً ناواگرا)	واگرا	۱۹	ND1 (کاملاً ناواگرا)	بینابین	۶
ND1 (کاملاً ناواگرا)	بینابین	۲۰	ND1 (کاملاً ناواگرا)	واگرا	۷
ND1 (کاملاً ناواگرا)	بینابین	۲۱	ND4 (متماثل به واگرا)	واگرا	۸
ND4 (متماثل به واگرا)	واگرا	۲۲	ND2 (ناواگرا)	واگرا	۹
ND1 (کاملاً ناواگرا)	واگرا	۲۳	ND1 (کاملاً ناواگرا)	بینابین	۱۰
ND1 (کاملاً ناواگرا)	واگرا	۲۴	D2 (واگرا)	واگرا	۱۱
ND1 (کاملاً ناواگرا)	بینابین	۲۵	D2 (واگرا)	واگرا	۱۲
ND1 (کاملاً ناواگرا)	واگرا	۲۶	ND1 (کاملاً ناواگرا)	واگرا	۱۳



با بررسی دقیق مشخصات شیمیایی نمونه‌هایی که در روش شیمیایی شرارد واگرا ولی در روش پین هول ناواگرا تشخیص داده شده بودند و مقایسه آنها با نمونه‌هایی که در هر دو روش واگرا معرفی شدند مشخص گردید که به رغم زیاد بودن درصد سدیم در این دو گروه، تفاوت‌هایی در نوع و میزان آنیون‌های آنها وجود دارد. لذا این فرضیه که واگرایی خاک تنها به نوع و میزان کاتیون‌ها و درصد سدیم (که معیار اصلی در روش شیمیایی شرارد هستند) بستگی ندارند و آنیون‌های موجود در خاک نیز در ایجاد شرایط واگرایی مؤثر هستند، بیش از پیش تقویت شد. برای بررسی دقیق تر و جامع تر این فرضیه، نمونه‌های

ساختگی با مشخصات ذکر شده در قبل تهیه و مورد آزمایش‌های تعیین پتانسیل واگرایی با روش‌های مورد نظر قرار گرفتند. نتایج به دست آمده از این بررسی‌ها در جدول شماره ۶ ارائه شده است.

مطابق جدول ۶ با توجه به اینکه نمک‌های مورد استفاده برای تهیه نمونه‌های ساختگی دارای ریشه کاتیونی سدیم بودند، مقدار درصد سدیم نسبت به سایر کاتیون‌ها در آنها زیاد بود و بر اساس معیار شیمیایی شرارد همه نمونه‌ها واگرا هستند ولی برخی از آنها علی‌رغم میزان زیاد نسبت سدیم، در آزمایش پین هول ناواگرا طبقه‌بندی شدند.

جدول ۶- نتایج آزمون‌های واگرایی نمونه‌های ساختگی

پتانسیل واگرایی		شماره نمونه	پتانسیل واگرایی		شماره نمونه
پین هول	روش شیمیایی شرارد		پین هول	روش شیمیایی شرارد	
ND3 (متمایل به ناواگرا)	واگرا	A10	ND1 (کاملاً ناواگرا)	واگرا	۲۷
ND3 (متمایل به ناواگرا)	واگرا	A11	D2 (واگرا)	واگرا	۱۱
ND3 (متمایل به ناواگرا)	واگرا	A12	ND1 (کاملاً ناواگرا)	واگرا	A1
ND1 (کاملاً ناواگرا)	واگرا	A13	ND1 (کاملاً ناواگرا)	واگرا	A2
D1 (به شدت واگرا)	واگرا	A14	ND1 (کاملاً ناواگرا)	واگرا	A3
D2 (واگرا)	واگرا	A15	ND4 (متمایل به واگرا)	واگرا	A4
D2 (واگرا)	واگرا	A16	D1 (به شدت واگرا)	واگرا	A5
ND3 (متمایل به ناواگرا)	واگرا	A17	D2 (واگرا)	واگرا	A6
ND2 (ناواگرا)	واگرا	A18	ND4 (متمایل به واگرا)	واگرا	A7
ND3 (متمایل به ناواگرا)	واگرا	A19	ND1 (کاملاً ناواگرا)	واگرا	A8
			ND4 (متمایل به واگرا)	واگرا	A9

از نمونه‌ها، نوع آنیون‌های آنها متفاوت است. بدین ترتیب نقش آنیون‌ها در پتانسیل واگرایی خاک‌ها به اثبات می‌رسد. بدین ترتیب نتیجه می‌شود که نمودار شیمیایی شرارد به دلیل لحاظ شدن میزان و نوع آنیون‌ها در روش ارزیابی دقت کافی ندارد و در برخی موارد می‌تواند گمراه‌کننده نیز باشد.

همانند موارد ذکر شده، برای نمونه‌های طبیعی با بررسی دقیق مشخصات شیمیایی و مقایسه آنها نمونه‌هایی که در روش شیمیایی شرارد واگرا ولی در روش پین هول ناواگرا تشخیص داده شده بودند و مقایسه آنها با نمونه‌هایی که در هر دو روش واگرا معرفی شدند، مشخص گردید که به رغم زیاد بودن درصد سدیم در این دو گروه

### تأثیر میزان و نوع آنیون‌ها در واگرایی

اشاره شد که آنیون‌ها نقش مؤثری در واگرایی و یا ناواگرایی خاک دارند. در این بخش چگونگی تأثیر نمک‌ها و آنیون‌های مختلف بر میزان واگرایی یک نمونه خاک رسی ناواگرا به تفکیک ارائه می‌شود:

#### - اثر یون کلر

یون کلر یکی از متداول‌ترین آنیون‌های موجود در

خاک است که همراه با یون سدیم و به صورت نمک NaCl در خاک یافت می‌شود. به منظور بررسی تأثیر این یون، مقادیر مختلفی از نمک NaCl به خاک ناواگرا (خاک شماره ۲۷) و واگرا (خاک شماره ۱۱) اضافه و پتانسیل واگرایی آنها تعیین شد. پتانسیل واگرایی نمونه‌های ساختگی حاوی نمک طعام در جدول شماره ۷ ارائه شده است.

جدول ۷- نتایج آزمون‌های واگرایی نمونه‌های ساختگی حاوی کلرید سدیم

شماره نمونه	ترکیبات	پتانسیل واگرایی بین هول	چگونگی تأثیر بر واگرایی
A3	NaCl ۱ درصد + خاک ناواگرا	ND1 (کاملاً ناواگرا)	کاهش واگرایی
A2	NaCl ۴ درصد + خاک ناواگرا	ND1 (کاملاً ناواگرا)	کاهش واگرایی
A1	NaCl ۸ درصد + خاک ناواگرا	ND1 (کاملاً ناواگرا)	کاهش واگرایی
A19	NaCl ۵ درصد + خاک واگرا	ND3 (متمایل به ناواگرا)	کاهش واگرایی
A18	NaCl ۱۰ درصد + خاک واگرا	ND2 (ناواگرا)	کاهش واگرایی

مطابق جدول (۷)، نمونه‌های A1، A2 و A3 که به ترتیب از اضافه کردن ۸، ۴، و ۱ درصد وزنی NaCl به خاک ناواگرایی شماره ۲۷ تهیه شده‌اند، با اینکه درصد سدیم بسیار زیادی دارند و بر اساس معیار نمودار شرارد واگرا طبقه‌بندی شده‌اند، هر سه با توجه به معیارهای آزمایش پین هول کاملاً غیرواگرا تشخیص داده شدند. معنای این موضوع این است که یون کلر اثر واگرا کنندگی سدیم را خنثی و از واگرایی خاک جلوگیری می‌کند. جهت بررسی صحت این موضوع، به یک خاک کاملاً واگرا (خاک شماره ۱۱) به میزان ۵ و ۱۰ درصد نمک NaCl اضافه شد و نمونه‌های ساختگی A19 و A18 تهیه و مورد آزمایش تعیین واگرایی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار این نمک، خاک به سمت فولکوله شدن میل می‌کند به طوری که نمونه A19 با داشتن ۵ درصد کلرید سدیم به رده ND3 (متمایل به ناواگرا) و نمونه A18 با ۱۰ درصد از این نمک به رده ND2 (کاملاً ناواگرا) بهبود یافته

است. بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که با افزودن نمک NaCl با وجود اینکه مقدار سدیم زیادی به خاک وارد می‌شود ولی به دلیل افزایش همزمان سطح آنیون کلر در خاک، نه تنها باعث افزایش واگرایی خاک نمی‌شود، بلکه بسته به میزان آنیون کلر، موجب کاهش واگرایی نیز خواهد شد.

#### - اثر یون کربنات بر واگرایی

مطابق جدول ۸، نمونه‌های ساختگی A4 تا A8 به ترتیب با افزودن ۱۵، ۸، ۴، ۱ و ۰/۵ درصد نمک کربنات سدیم ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) به خاک ناواگرا تهیه شده‌اند. همان طوری که ملاحظه می‌شود نمونه A8 با ۰/۵ درصد نمک کاملاً ناواگرا است.

یعنی اینکه افزایش ۰/۵ درصد نمک کربنات سدیم تأثیری در واگرایی خاک نداشته است. ولی با افزایش مقدار نمک به میزان ۱ درصد (نمونه A7)، واگرایی نمونه

در رده متمایل به واگرا (ND4) طبقه‌بندی می‌شود. در رده متمایل به واگرا (ND4) ارزیابی شده است. با توجه به همین‌طور وضعیت واگرایی نمونه‌های A4 و A5، A6 به ترتیب در رده واگرا (D2)، به شدت واگرا (D1)، و باعث افزایش واگرایی خاک می‌شود. نتایج فوق مشخص است که افزایش نمک کربنات سدیم

جدول ۸- نتایج آزمون‌های واگرایی نمونه‌های ساختگی حاوی کربنات سدیم

شماره نمونه	ترکیبات	پتانسیل واگرایی پین هول	چگونگی تأثیر بر واگرایی
A4	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ۱۵ درصد + خاک ناواگرا	ND4 (متمایل به واگرا)	افزایش واگرایی
A5	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ۸ درصد + خاک ناواگرا	D1 (به شدت واگرا)	افزایش واگرایی
A6	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ۴ درصد + خاک ناواگرا	D2 (واگرا)	افزایش واگرایی
A7	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ۱ درصد + خاک ناواگرا	ND4 (متمایل به واگرا)	افزایش واگرایی
A8	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ۰/۵ درصد + خاک ناواگرا	ND1 (کاملاً ناواگرا)	بدون اثر
A0	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ۰ درصد + خاک ناواگرا	ND1 (کاملاً ناواگرا)	بدون اثر

#### - اثر یون سولفات بر واگرایی

قرار دارند و خاک A13 با ۱ درصد نمک در رده (ND1) کاملاً ناواگرا ارزیابی شده است. لذا در خصوص تأثیر نمک سولفات سدیم یا یون سولفات در پتانسیل واگرایی با توجه به نتایج آزمایش‌ها، تنها می‌توان گفت که اثر این یون خیلی کم و در جهت افزایش واگرایی است و تحلیل دقیق تر موضوع نیاز به بررسی بیشتر دارد.

جدول شماره ۹ چگونگی تأثیر نمک سولفات سدیم بر پتانسیل واگرایی را نشان می‌دهد. در جدول می‌بینیم که نمونه A9 با ۲۰ درصد نمک در رده متمایل به واگرا (ND4) و نمونه‌های A10، A11، A12 و A13 به ترتیب با ۸، ۴ و ۱ درصد نمک هر سه در رده متمایل به ناواگرا (ND3)

جدول ۹- نتایج آزمون‌های واگرایی نمونه‌های ساختگی حاوی نمک سولفات سدیم

شماره نمونه	ترکیبات	پتانسیل واگرایی (پین هول)	چگونگی تأثیر بر واگرایی
A9	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ۲۰ درصد + خاک ناواگرا	ND4 (متمایل به واگرا)	افزایش واگرایی
A10	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ۱۲ درصد + خاک ناواگرا	ND3 (متمایل به ناواگرا)	افزایش واگرایی
A11	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ۸ درصد + خاک ناواگرا	ND3 (متمایل به ناواگرا)	افزایش واگرایی
A12	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ۴ درصد + خاک ناواگرا	ND3 (متمایل به ناواگرا)	افزایش واگرایی
A13	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ۱ درصد + خاک ناواگرا	ND1 (کاملاً ناواگرا)	بدون اثر

#### - اثر یون پلی فسفات بر واگرایی

است. مطابق جدول شماره ۱۰، نتایج آزمایش‌ها و بررسی‌ها نشان می‌دهند که با افزایش میزان این ماده شدت واگرایی نیز افزایش می‌یابد به طوری که نمونه A14 با ۱۲ درصد نمک پلی فسفات در رده به شدت واگرا (D1) و نمونه‌های A15، A16 و A17 به ترتیب

تأثیر نمک سدیم پلی فسفات بر واگرایی خاک مشخص است؛ از این واگراکننده در آزمایش هیدرومتری استاندارد به عنوان ماده پراکنده‌ساز استفاده می‌شود. در این پژوهش از این نمک به عنوان شاهد استفاده شده

با ۸، ۴، و ۱ درصد از این نمک در رده‌های D2 (واگرا) نمونه‌ها حدود ۵/۵ بوده است در حالی که در منابع می‌بینیم که pH خاک‌های واگرا بالا و شده‌اند. نکته دیگر این است که میزان pH

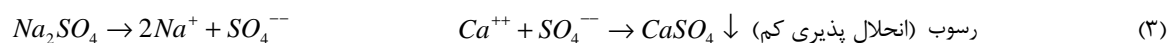
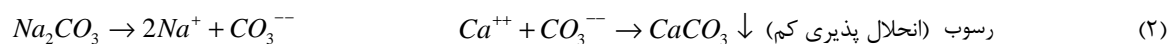
جدول ۱۰- نتایج آزمون‌های واگرایی نمونه‌های ساختگی حاوی سدیم پلی فسفات

شماره نمونه	ترکیبات	پتانسیل واگرایی	چگونگی تأثیر بر واگرایی
A14	(NaPO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ۱۲ درصد + خاک ناواگرا	D1 (به شدت واگرا)	افزایش واگرایی
A15	(NaPO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ۸ درصد + خاک ناواگرا	D2 (واگرا)	افزایش واگرایی
A16	(NaPO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ۴ درصد + خاک ناواگرا	D2 (واگرا)	افزایش واگرایی
A17	(NaPO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ۱ درصد + خاک واگرا	ND3 (متمایل به ناواگرا)	افزایش واگرایی

سدیم (SAR) محلول خاک از مهمترین عوامل مؤثر در ضخامت لایه دوگانه و در نتیجه واگرایی خاک هستند. ضخامت لایه دوگانه با افزایش غلظت محلول کمتر ولی با افزایش نسبت جذب سدیم بیشتر می‌شود. Mojallai (Sparks, 2000 & 1994). بدین ترتیب وقتی یک نمک سدیمی با آنیون متفاوت به خاک اضافه می‌شود کاتیون سدیم با کاتیون کلسیم موجود در خاک تبادل و نمک جدیدی حاصل می‌شود. در شرایط جدید، بسته به میزان انحلال پذیری مواد حاصل از واکنش، مقادیر متفاوتی از غلظت محلول و نسبت جذب سدیم در فاز محلول خاک ایجاد و ضخامت لایه دوگانه نیز متفاوت خواهد بود. در خصوص نمک‌های کربنات سدیم و سولفات سدیم، به علت اینکه مواد حاصل از واکنش (کربنات کلسیم و سولفات کلسیم) انحلال پذیری کمی دارند مطابق روابط ۲ و ۳ به صورت رسوب از فاز محلول خارج می‌شوند.

با عنایت به آنچه گفته شد از بین نمک‌های مورد بررسی، تنها کلرید سدیم باعث ایجاد ساختمان منعقد (فولوکوله) در خاک و از بین رفتن پتانسیل واگرایی می‌شود و سایر نمک‌ها کم و بیش باعث واگرایی خاک می‌شوند. به عبارت دیگر، آنیون کلر در خاک به رغم زیاد بودن درصد کاتیون سدیم، از خاصیت واگرایی آن می‌کاهد. میزان این تأثیر نیز بسته به مقدار کلر موجود در خاک، در مقایسه با مقدار کاتیون سدیم، متفاوت است. به طوری که هرچه مقدار کاتیون سدیم نسبت به آنیون کلر بیشتر باشد، رفتار خاک به سمت واگرایی میل می‌کند. نتیجه گیری فوق با مفاهیم مربوط به تئوری لایه دوگانه پخشیده<sup>۱</sup> مطابقت دارد و قابل تفسیر است. بدین صورت که هرچه ضخامت لایه دوگانه بیشتر شود ذرات رس از هم دورتر و نهایتاً خاک واگرا می‌شود.

دو عامل، یکی غلظت سدیم و دیگری نسبت جذب



توجه به اینکه هر دو عمل یعنی افزایش نسبت جذب سدیم و کاهش غلظت محلول باعث افزایش ضخامت لایه دوگانه پخشیده می‌شوند، واگرایی خاک را به دنبال خواهند داشت. ولی در مورد کلرید سدیم (NaCl) وضعیت متفاوت است. NaCl خود بسیار انحلال پذیر

بنابراین، افزایش سدیم در فاز محلول و کاهش کاتیون‌هایی نظیر کلسیم در فاز محلول باعث افزایش نسبت جذب سدیم در محلول خاک می‌شود. از طرف دیگر، به علت خروج محصولات واکنش به صورت رسوب از فاز محلول، غلظت محلول خاک نیز کاهش می‌یابد. لذا با

به نام درصد سدیم مازاد بر کلر (P.S.C) مطابق رابطه شماره ۴ به جای درصد سدیم (رابطه شماره ۱) برای محور قائم منحنی شرارد مطابق شکل ۴ معرفی گردید.

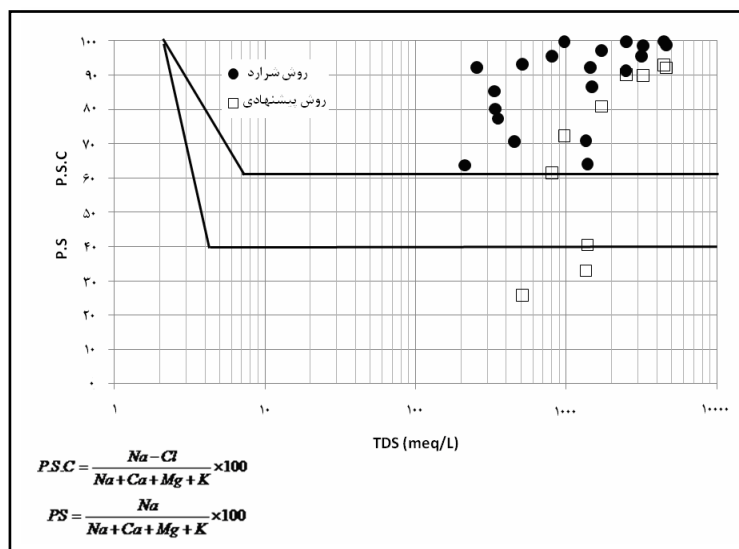
$$P.S.C = \frac{Na - Cl}{Na + Ca + Mg + K} \times 100 \quad (۴)$$

به منظور ارزیابی کارایی روش پیشنهادی، موقعیت نمونه‌های ساختگی مورد استفاده در این تحقیق، در دو حالت استفاده از درصد سدیم مازاد بر کلر (روش پیشنهادی) و استفاده از درصد سدیم (روش مرسوم شرارد) برای محور قائم، روی منحنی نشان داده شده‌اند. از شکل ۴ به وضوح قابل مشاهده است که بر اساس روش شرارد تمامی نمونه‌ها به دلیل درصد سدیم زیاد در ناحیه واگرا قرار گرفته‌اند. در حالی که با توجه به مطالب ذکر شده در بخش‌های قبلی و بر اساس روش پین هول، بیشتر نمونه‌های ساختگی ناواگرا و یا متمایل به ناواگرا هستند. این موضوع قبل از هر مطلبی ناکارآمدی روش شیمیایی شرارد را در ارزیابی پتانسیل واگرایی خاک‌ها به اثبات می‌رساند. نظر به اینکه موارد تناقض مشاهده در نتیجه ارزیابی، مربوط به نمونه‌هایی است که دارای آنیون کلر هستند، می‌توان نتیجه گرفت که ضعف اصلی و اساسی روش شرارد لحاظ نکردن نقش آنیون‌ها، به ویژه آنیون کلر، در ارزیابی واگرایی است.

است و در خاک به سرعت هیدرولیز می‌شود و یون‌های  $Na^+$  و  $Cl^-$  ایجاد می‌کند. یون کلر با کلسیم موجود در محلول خاک ترکیب می‌شود و نمک بسیار حل پذیر کلرید کلسیم ( $CaCl_2$ ) را به وجود می‌آورد. با افزایش کلرید سدیم به خاک، نمک حاصل از واکنش کلرید کلسیم خواهد بود که انحلال پذیری آن بالا است، سریعاً هیدرولیز می‌شود و به فاز محلول باز می‌گردد. به علت باقی ماندن محصولات واکنش در فاز محلول، از یک سو نسبت سدیم به سایر کاتیون‌ها و در نتیجه نسبت جذب سدیم (SAR) کاهش می‌یابد و از سوی دیگر غلظت محلول خاک افزایش خواهد یافت. این عوامل سرانجام باعث کاهش ضخامت لایه دو گانه پخشیده و ناواگرا شدن خاک می‌شود (Mojallai, 1994).

#### پیشنهادی برای اصلاح روش شیمیایی شرارد

بیشتر اشاره شد که آنیون‌ها به ویژه آنیون کلر، نقش بسیار مهم و غیر قابل انکاری در ارزیابی پتانسیل واگرایی خاک دارند. در حالی که در اغلب روش‌های پیشنهادی و به ویژه در روش مرسوم شرارد، این موضوع به کلی مغفول مانده است. در این پژوهش با در نظر گرفتن نقش آنیون کلر در پتانسیل واگرایی خاک، روشی برای اصلاح نمودار شرارد پیشنهاد شد. بدین ترتیب که شاخص جدیدی



شکل ۴- مقایسه کارایی روش شرارد و روش پیشنهادی این تحقیق

کمیت P.S.C (بیشتر بودن مقدار کلر نسبت به سدیم) در منحنی نشان داده نشده‌اند.

علاوه بر نمونه‌های ساختگی، پتانسیل واگرایی ۸ مورد از نمونه‌های طبیعی نیز بر اساس روش‌های شیمیایی شرارد، پین هول، و روش پیشنهادی تعیین و در جدول ۱۱ مقایسه شده است. دیده می‌شود که نتایج روش پیشنهادی تا حد بسیار زیادی با نتایج آزمایش پین هول مطابقت دارد.

شکل ۴ نشان می‌دهد که بر اساس روش پیشنهادی این پژوهش (استفاده از درصد سدیم مازاد بر کلر برای محور قائم یعنی P.S.C)، تنها بخشی از نمونه‌های ساختگی که بر اساس روش پین هول نیز واگرا تشخیص داده شده بودند، واگرا ارزیابی شده است و بخش دیگر نمونه‌های ساختگی که بر اساس روش پین هول ناواگرا بودند بر اساس روش پیشنهادی نیز ناواگرا تشخیص داده شده‌اند که البته بخشی از این نمونه‌ها به دلیل منفی بودن

جدول ۱۱- مقایسه نتایج روش اصلاح شده با روشهای دیگر

شماره نمونه	روش شیمیایی		نتیجه آزمایش پین هول
	شرارد	روش پیشنهادی شده	
۱	ناواگرا	ناواگرا	ND2 (ناواگرا)
۲	بینابین	ناواگرا	ND1 (کاملاً ناواگرا)
۵	ناواگرا	ناواگرا	ND3 (متمايل ناواگرا)
۶	بینابین	ناواگرا	ND1 (کاملاً ناواگرا)
۷	واگرا	ناواگرا	ND1 (کاملاً ناواگرا)
۱۰	بینابین	ناواگرا	ND1 (کاملاً ناواگرا)
۱۶	واگرا	ناواگرا	ND1 (کاملاً ناواگرا)
۱۷	واگرا	ناواگرا	ND1 (کاملاً ناواگرا)

و میزان آنیون‌های موجود در خاک نیز می‌توانند در ایجاد شرایط واگرایی مؤثر باشند که این موضوع در روش شیمیایی شرارد مغفول مانده است.

۲- روش شیمیایی شرارد قادر به تشخیص صحیح پتانسیل واگرایی نیست و نتایج حاصل از این روش که تنها مبتنی بر میزان و نوع کاتیون‌های موجود در خاک است، در مقایسه با روش پین هول، تناقض و خطای فراوان دارد.

در ارزیابی نقش آنیون‌های مختلف در پدیده واگرایی مشخص شد که آنیون کلر، بر خلاف کاتیون سدیم، عاملی است در جهت ناواگرا کردن خاک، بدین صورت که در اثر افزایش کلرید سدیم به خاک، کلرید کلسیم که انحلال پذیری بالایی دارد به دست می‌آید و سریعاً هیدرولیز می‌شود و به فاز محلول باز می‌گردد. لذا به علت باقی ماندن محصولات واکنش در فاز محلول، نسبت سدیم به سایر کاتیون‌ها و در نتیجه نسبت جذب سدیم (SAR) کاهش و

بدین ترتیب نتیجه‌گیری می‌شود که در روش شرارد به دلیل لحاظ نشدن نقش آنیون‌ها در ارزیابی پتانسیل واگرایی ناکارآمد است و روش پیشنهادی این تحقیق به مراتب نتایج بهتری ارائه می‌دهد. یارآوری می‌شود که تعیین مرزهای دقیق محدوده بینابینی در روش پیشنهادی نیاز به تحقیق و بررسی بیشتر دارد.

### نتیجه‌گیری

بر اساس مجموعه نتایج حاصل از آزمایش‌ها و بررسی‌های این پژوهش، موارد زیر را می‌توان نتیجه‌گیری کرد:

۱- واگرایی خاک پدیده‌ای فیزیکوشیمیایی است که در اثر ترکیب‌هایی خاص از نوع و میزان آنیون‌ها و کاتیون‌های موجود در خاک حاصل می‌شود. به عبارت دیگر، واگرایی خاک تنها به نوع و میزان کاتیون‌ها بستگی ندارد، بلکه انواع

غلظت محلول خاک افزایش می‌یابد. این عوامل سرانجام باعث کاهش ضخامت لایه دو گانه پخشیده و ناواگرا شدن خاک خواهد شد.

۴- در مورد تأثیر نمک‌های مختلف اضافه شده به خاک مشخص شد که کلرید سدیم باعث از بین بردن خاصیت واگرایی خاک و سایر نمک‌های سدیم موجب واگرایی خاک می‌شود. این موضوع می‌تواند در اصلاح خاک‌های واگرایموجود در بستر سازه‌های آبی مورد توجه قرار گیرد.

۵- در این پژوهش با تعریف شاخص جدیدی به نام درصد سدیم مازاد بر کلر (P.S.C)، به جای درصد سدیم برای محور قائم نمودار شرارد، روش شیمیایی موسوم به شرارد اصلاح شد.

**قدردانی**

این مقاله برگرفته از بخشی از پروژه تحقیقاتی به شماره مصوب ۸۷۵۶۸-۱۴-۱۴-۲ مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی است. نویسنده قدردانی خود را از این مؤسسه تقدیم می‌دارد.

## مراجع

- Anon, 2000. Annual Book of ASTM Standards. Vol. 04.08, Soil and Rock, ASTM D421, D422, D4318, D5779, D4221, D4647.
- Bell, F.G., Jermy, C.A. and Mortimer, B. 1991. Dispersive soils: A brief review and some South African experiences. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dec. 9-13. Thailand.
- Bhuvaneshwari, S., Soundra, B., Robinson, R.G. and Gandhi, S.R. 2007. Stabilization and microstructural modification of dispersive clayey soils. First International Conference on Soil and Rock Engineering, Aug. 5-11. Columbo, Srilanka.
- Craft, D. 1988. Evaluation of chemical test for engineering soils using discriminant analysis. Chemometr. Intell. Lab. 3: 111-118.
- Craft, D. and Acciardi, R.G. 1984. Failure of pore water pressure analyses for dispersion. J. Geotech. Eng-ASCE. 110(4): 459-472.
- Didiek, D. 2007. Dispersivity test of Duriangkang Dam filling Material. dinamika Teknik Sipil. 7(1): 11-19.
- Farzaneh, O., Rezvan, A. and Bicheranloo, R. 2001. The effect of extraction moisture on dispersivity potential of sample using Sherard Method. J. University College of Engineering. Tehran University. 35(4): 513-52. (in Farsi)
- Ingles, O.G. and Aitchison, G.D., 1969. Soil- water disequilibrium as a cause of subsidence in natural soils and earth embankments. International symposium on Land Subsidence. Tokyo. AIHS Pub. # 89. 2, 342-353.
- Knodel, P.C. 1991. Characteristica and problems of dispersive clay soils. U.S. Department of the Interior. Bureau of Reclamation. Denver Office. R-91-09.
- Lashkaripour G.R, Khamehchiyan M, Soloki, H.R. and Rahimi, E. 2006. The characteristics of dispersive soils in Sistan plain, eastern Iran. J. Appl. Geol. 3(1): 75-80. (in Farsi)
- Mojallali, H. 1994. Soil Chemistry. Tehran University Press.
- Ouhadi, V.R. and Goodarzi, A.R. 2006. Assesment of the stability of a dispersive soil treated by alum. Eng. Geol. 85(1-2): 91-101.
- Rahimi, H. and Delfy, M. 1992. Recognition of dispersive clay in Khuzestan province. M.Sc. Thesis. University of Tehran. Karaj. Iran. (in Farsi).
- Sherard, J.L., Dunnigan, L.P, and Decker, R.S, 1976. Identification and natures of dispersive soils. J. Geotech. Eng-ASCE. 102(4): 287-301.
- Sparks, D.L.(Ed.). 1998. Soil Physical Chemistry. 2<sup>nd</sup> Ed. CRC Press Inc. Florida. USA. 432 p.



## **The Role of Anions in the Dispersion Potential of Clayey Soil**

**N. Abbasi\***

\* Corresponding Author: Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Institute, P.O. Box: 31585-845, Karaj, Iran. E-Mail: nader\_iaeri@yahoo.com

Received: 21 November 2010, Accepted: 3 July 2011

Soil dispersion is a phenomenon where soil particles float when they are exposed to water and are carried away by the force of seepage. Various laboratory methods, including double hydrometer, Emerson, and pinhole tests and the Sherard chemical method have been used to evaluate soil dispersion potential. Despite the fact that soil dispersion is caused by its chemical composition, the results obtained from the chemical methods, especially from the Sherard method, do not match the results of the pinhole test. In this study, the role of existing anions in the dispersion potential of clayey soils was studied. Natural soil samples were collected from different regions of Iran and artificial soil samples were created by adding different percentages of sodium chloride, sodium carbonate, sodium sulfate, and sodium polyphosphate to a non-dispersive soil. The physical, chemical, and index properties of all samples were determined and the Sherard method and pinhole test were employed to determine the dispersion potential. The results obtained from the tests showed that soil dispersion, which is a physico-chemical phenomenon, was caused by a combination of existing anions and cations in the soil, both in type and quantity. It was also found that the Sherard chemical method did not determine soil dispersion correctly since the role of some anions, especially chloride, was neglected. Among the existing anions in the soil, chloride, as opposed to sodium, acted as a flocculating factor.

**Keywords:** Dispersivity , Pinhole test, Sherard chemical method, soil dispersion