



بررسی آزمایشگاهی تأثیر آهک در روند خود ترمیمی و واگرایی خاک‌های رسی (مطالعه موردی: سد گردیان)

کیومرث روشنگر*، محمد تقی اعلمی، یعقوب هوشیار

دانشکده فنی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۹-۰۷

بازنگری: ۱۳۹۷-۱۱-۰۳

پذیرش: ۱۳۹۷-۱۱-۰۹

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۱-۱۷

کلمات کلیدی:

آزمایش پین هول

آزمایش هیدرومتری مضاعف

آهک

خاک رس

خود ترمیمی و هسته

خلاصه: لایه‌های رسی مترکم از متداول ترین لایه‌های نفوذ ناپذیر به شمار می روند. واگرایی و ترک خوردگی لایه‌های رسی از جمله عواملی هستند که کارایی خاک رُس را کاهش و ضرورت تثبیت خاک رُس را اجتناب ناپذیر می نماید. خاصیت ترمیمی خاک رُس و اهمیت خودترمیمی ترک‌ها در لایه‌های رسی به عنوان یکی از شاخص‌ها و ویژگی‌های مثبت رُس در چند سال اخیر مورد توجه محققین بوده است. در این تحقیق عملکرد خودترمیمی و واگرایی لایه‌های رسی در اثر افزودن آهک بر روی خاک رُس مصالح قرصه گرگر در سد گردیان مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است. بدین منظور برای دو نمونه خاک واگرا با افزودن آهک ساختمانی به میزان ۰/۵، ۱ و ۲ درصد و انجام آزمایش‌های هیدرومتری مضاعف، حدود اتربرگ و پین هول روند واگرایی و خودترمیمی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله نشان داد که با افزودن ۱ درصد آهک به خاک رس، دامنه خمیری افزایش یافته و دبی خروجی آزمایش پین هول برای هر دو نمونه ۲۸ درصد و قطر نهایی نمونه برای هر دو خاک ۶۷ درصد کاهش پیدا کرده که این حاکی از بهبود روند خودترمیمی و کاهش واگرایی و تبدیل شدن به خاک غیر واگرا می‌باشد.

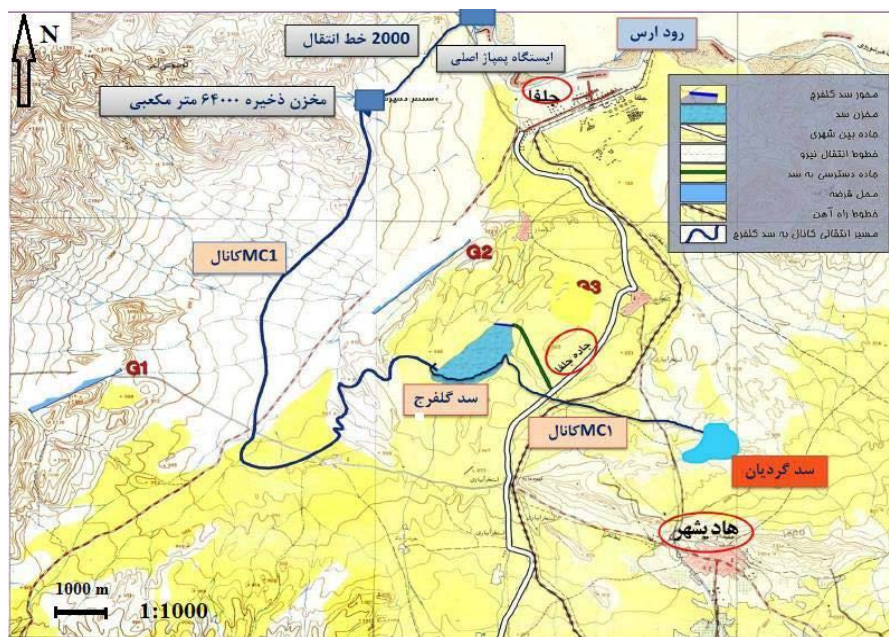
۱- مقدمه

نفوذپذیری خاک یکی از ویژگی‌های مهم آن‌هاست که نقش اساسی در مسایل مربوط به جریان آب داخل خاک ایفا می‌کند تعیین ویژگی‌های دقیق مصالح با نفوذ پذیری پایین مثل خاک رُس اهمیت دو چندان در سازه‌های مهم دارد چون این نوع خاک نقش مهمی در جلوگیری از نشست و فرسایش درونی در سازه‌های هیدرولیکی دارد. این مصالح باید نفوذ پذیری خیلی کم و انعطاف پذیری مناسب و استحکام کافی در برابر جریان آب و مقابله با فرسایش داشته باشند سدهای زیادی در اثر فرسایش یا ترک‌های که در هسته ایجاد می‌شوند دچار شکست می‌شوند. بررسی تحلیلی موضوع شکست که متأثر از عوامل متعدد، از جمله شاخص‌های مختلف خاک‌های ریزدانه که به عنوان معیار سنجش ترک خوردگی و نفوذپذیری می‌باشد، سبب شناخت و ارزیابی اثرات واگرایی و خود ترمیمی خاک‌ها در کنترل و افزایش کارایی لایه نفوذناپذیر خواهد شد.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: kroshangar@yahoo.com

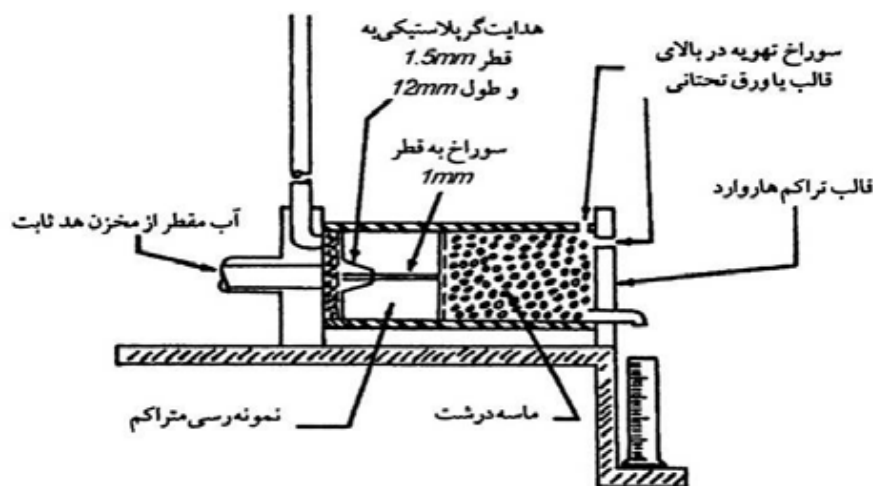
با توجه به اهمیت موضوع جلوگیری از فرسایش درونی در سدهای حاکی ضرورت دارد که مطالعات جامعی بر روند تثبیت خاک‌ها صورت گیرد که این تثبیت علاوه بر کنترل جریان واگرایی، ظرفیت و شتاب لازم را جهت قابلیت خودترمیمی در صورت وجود ترک‌ها را داشته باشد. در مواقعی که خاک رُس مورد استفاده مطلوبیت و کارایی لازم را نداشته باشد اصلاح و تثبیت خاک با افزودنی‌های متداول همچون آهک نقش مؤثری در بهبود و افزایش کارایی لایه نفوذ ناپذیر خواهد داشت. افزودن آهک به خاک رُس بر ضخامت لایه آبدار اطراف ذرات خاک رُس اثر می‌گذارد و باعث تغییرات در حدود پلاستیک می‌شود که در بعضی از مواقع سبب کاهش نشانه خمیری و در بعضی از موارد باعث افزایش نشانه خمیری می‌گردد. که این اثر بر پلاستیسته خاک رُس کم و بصورت آنی می‌باشد تغییرات پلاستیسته تا حدود زیادی به نوع کانی غالب خاک رُس بستگی دارد. کانی‌های متورم شونده مانند مونت موریلونیت به علت سطح مخصوص بزرگ ظرفیت تبادل





شکل ۱. موقعیت سد گردیان

Fig. 1. Location of Gordyan Dam



شکل ۲. شمای کلی آزمایش پین هول [۱۷]

Fig. 2. Overview of the pinhole test

در حدود پلاستیسیته خاک توسط بسیاری از محققین گزارش شده است. معمولاً حد روانی با افزایش درصد آهک کاهش یافته و نشانه خمیری کاهش می‌یابد. با این وجود در درصد‌های پایینی از آهک در بعضی مواقع نتیجه برعکس داشته و افزایش آهک سبب افزایش حد روانی و نشانه خمیری می‌گردد. این چنین افزایشی شاید به علت واکنشی است که یون‌های هیدروکسید برای اصلاح پیوستگی سطوح ذرات رُس با آب انجام می‌دهد [۳ و ۴]. حداد و همکاران (۱۳۹۵) در تحقیقی به بررسی تأثیر افزودن سیمان، آهک و آلومینیوم نترات

یونی بالای از خود نشان می‌دهند در حالیکه کانی‌های غیر متورم شونده مانند کائولینیت قابلیت یونی نسبتاً کمی دارد. درک ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک در ساختار مهندسی بسیار مهم است. مطالعه خواص مهندسی خاک، محققین را به دلیل فراوانی نسبی خاک و مناسب بودن برای اهداف متنوع و اصلاح و تثبیت خاک به خود جذب کرده است [۱ و ۲]. پژوهش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که آهک برای اختلاط با خاک‌های رُسی به خصوص با خاک‌های با پلاستیسیته متوسط و زیاد ($PI < 15$) مناسب تر است. قابلیت آهک در ایجاد تغییرات

جدول ۱. کلاس بندی خاکها در آزمایش پین هول [۱۷]

Table 1. Soil classification in the pinhole test (D4647-93, 98)

اندازه حفره بعد از آزمایش <i>mm</i>	تیرگی جریان در پایان آزمایش		دبی عبوری از نمونه <i>ml/s</i>	زمان آزمایش <i>min</i>	بار آبی <i>mm</i>	کلاس بندی
	از کنار	از بالا				
≥ 2	خیلی کدر	کدر	1-1/4	5	50	D1
$> 1/5$	کدر	کدر متوسط	1-1/4	10	50	D2
$\leq 1/5$	کدر متوسط	اندکی کدر	0/1-8	10	50	ND4
$\geq 1/5$	اندکی کدر	کاملاً واضح	1/2-4/7	5	180	ND3
			1/3-8/2	5	380	
$< 1/5$	واضح	شفاف	> 3	5	1020	ND2
1	کاملاً شفاف	کاملاً شفاف	≤ 3	5	1020	ND1
روش B						
$\geq 1/5$	خیلی کدر به اندکی کدر	اندکی کدر به کدری	-	10	50	D
$\geq 1/5$	اندکی کدر	کاملاً واضح	-	5	380-180	SD
$< 1/5$	اندکی کدر به شفاف	شفاف	-	5	380	ND

جدول ۲. تعیین پتانسیل واگرایی در آزمایش هیدرومتری مضاعف [۱۸]

Table 2. Determination of swelling potential in double hydrometer test

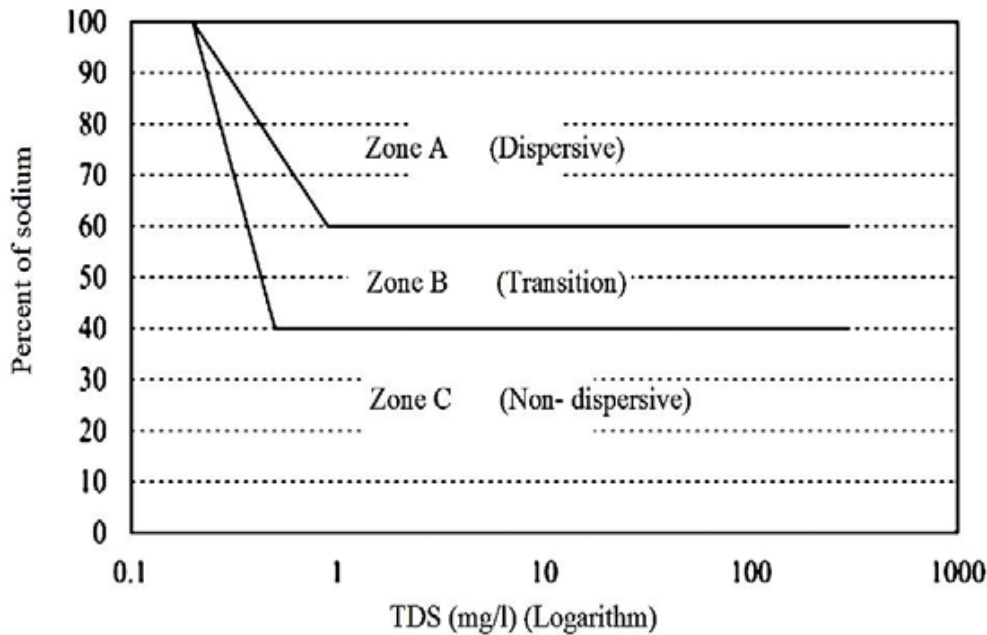
درصد واگرایی	پتانسیل واگرایی خاک
≤ 15	غیر واگرا
30-15	واگرایی ناچیز
50-30	واگرایی ملایم
≥ 50	واگرایی شدید

صفر کاهش می‌یابد. آن‌ها نتیجه گرفتند که آهک و سیمان و ترکیب آن‌ها باعث کاهش فشار تورم و درصد تورم می‌شود [۷]. لین^۲ و همکاران (۲۰۰۷) تأثیر آهک هیدراته در یک نسبت ثابت ۱:۴ برای تثبیت خاک رُس را مورد آزمایش قرار دادند و نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های تثبیت شده ۳ تا ۷ برابر نمونه‌های تثبیت نشده است [۸]. ساکر^۳ و همکاران (۲۰۰۹) تاثیر آهک بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک رُس که دارای ۱۴ درصد ماده آلی بود مورد بررسی قرار دادند با توجه به نتایج به دست آمده مشخص گردید که خاک رُس با مواد آلی بالای ۱۴ درصد می‌تواند به طور

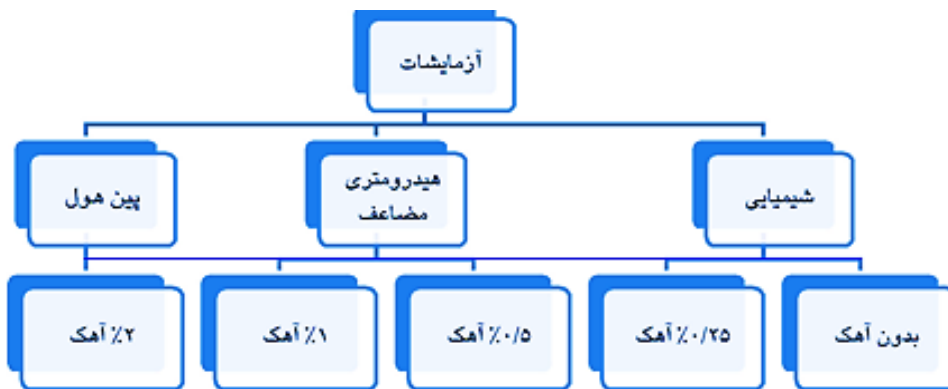
بر کاهش واگرایی نمونه‌های خاک پرداختند [۵]. زمردیان و وکیلی (۱۳۹۱) به ارزیابی واگرایی و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک رُس واگرای تثبیت شده با آهک و پوزولان پرداختند. نتایج نشان می‌دهند که هر چند افزودن آهک یا پوزولان تنها همراه با زمان عمل آوری باعث کاهش پتانسیل واگرایی خاک می‌شوند، اما نمونه‌های ساخته شده با ترکیب همزمان آهک و پوزولان دارای مقاومت بیشتری در برابر آبشستگی می‌باشند [۶]. الرواس^۱ و همکاران (۲۰۰۵) رفتار تورمی خاک عمان را با افزودن درصد‌های مختلف آهک، سیمان، بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که با اضافه کردن ۳ و ۶ درصد آهک، فشار تورمی خاک از ۲۴۹ کیلوپاسکال به ۱۵۸ کیلوپاسکال و

2 Lin et al.
3 Sakr et al.

1 Al-Rawas et al.



شکل ۳. معیار شیمیایی شرارد در تعیین پتانسیل واگرایی [۱۶]
Fig. 3. Sherard's chemical criterion in determining swelling potential



شکل ۴. آزمایش‌های مورد استفاده و ترکیب نمونه‌ها
Fig. 4. Experiments and composition of samples

آزمایشگاهی قابلیت آهک در ایجاد تغییرات حدود پلاستیک خاک‌ها به ارزیابی شاخص‌های مختلف از ویژگی‌های خاک‌های ریزدانه که به عنوان معیاری برای سنجش نحوه ترک خوردگی و نفوذپذیری مطرح هستند، پرداخته و تاثیر آهک بر روند خود ترمیمی و واگرایی خاک‌های رسی و ارزیابی کارایی لایه‌های نفوذناپذیر، مصالح قرصه گرگر سد گردیان مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

ساختمان سد مخزنی گردیان در مختصات جغرافیایی 39° - 45° طول شرقی و $53'$ - 38° عرض شمالی در ۵ کیلومتری شمال هادی شهر

رضایت بخشی با افزودن آهک ۷ درصد تثبیت شود [۹]. ابوسیف^۱ (۲۰۱۵) تحقیقی در مورد تاثیر آهک بر پتانسیل تورم خاک‌های متورم شونده انجام داده و بیان کرد در صورتی که محیط واکنش دارای سولفات باشد افزودن آهک بیشتر از ۳ درصد به دلیل تشکیل کانی‌های متورم شونده درصد تورم و فشار تورم را افزایش می‌دهد [۱۰]. همچنين ديف و بلومل^۲ (۱۹۹۱)، الهمود^۳ و همکاران (۱۹۹۵)، کوکا^۴ (۲۰۰۱) و پژون و زکوئه^۵ (۲۰۰۲) تحقیقاتی در این خصوص انجام داده‌اند [۱۱-۱۴]. در این تحقیق با بررسی

- 1 Abu Seif
- 2 Dif and Bluemel
- 3 Al-hamoud
- 4 Cokca
- 5 Pejnon and Zuquette

جدول ۳. نتایج شناسایی اولیه خاک

Table 3. Results of initial soil identification

نمونه	حدود اتربرگ			هیدرومتری		شیمیایی			
	LL	pL	pl	$\frac{A}{B} \times 100\%$	واگرایی	P.S	واگرایی	پین هول	واگرایی
1	38	20	18	42/5	به شدت واگرا	53/9	متوسط واگرا	NP ₄	متوسط واگرا
2	41	21	20	46/5	به شدت واگرا	67/6	واگرا	NP ₄	متوسط واگرا
3	41	21	20	50	به شدت واگرا	65/3	واگرا	NP ₄	متوسط واگرا
4	37	20	17	46/4	به شدت واگرا	68	واگرا	NP ₃	اندکی واگرا
5	39	21	18	47/1	به شدت واگرا	39	متوسط واگرا	NP ₄	متوسط واگرا
6	38	20	18	41/7	به شدت واگرا	66	واگرا	NP ₃	اندکی واگرا

جدول ۴. نتایج آزمایش اتربرگ و هیدرومتری و تراکم بر روی نمونه ها

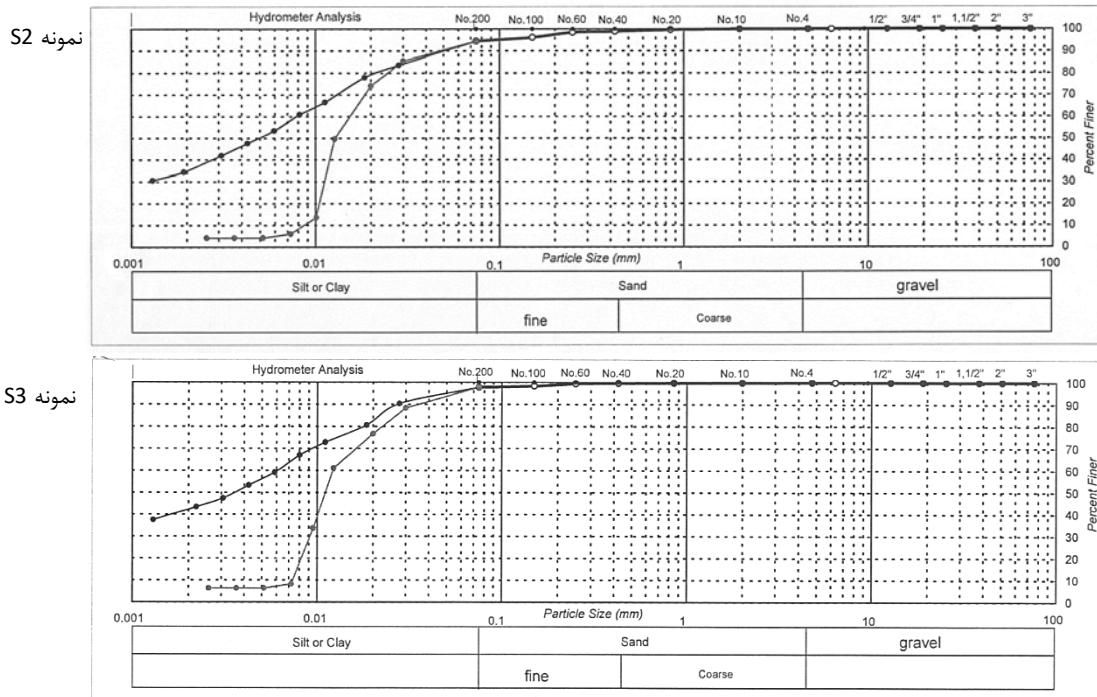
Table 4. Results of Atterberg test and hydrometer test and compaction test on samples

تراکم		هیدرومتری		حدود اتربرگ			نمونه
وزن مخصوص خشک	رطوبت بهینه	واگرایی	$F_2/F_1 \times 100$	PI	PL	LL	
1/643	19/36	بشدت واگرا	42/51	22	23	45	S2
1/636	19/56	اندکی واگرا	14/63	25	24	49	S2 با 0/25 درصد آهک
1/623	20/27	اندکی واگرا	14/38	27	24	51	S2 با 0/5 درصد آهک
1/608	20/81	غیر واگرا	11/15	25	29	54	S2 با 1 درصد آهک
1/586	22/32	غیر واگرا	4/18	17	34	51	S2 با 2 درصد آهک
1/626	18/51	متوسط واگرا	35/8	21	21	42	S3
1/622	18/95	اندکی واگرا	15/44	22	23	45	S3 با 0/25 درصد آهک
1/614	20/51	غیر واگرا	11/99	24	24	48	S3 با 0/5 درصد آهک
1/628	21/32	غیر واگرا	8/24	23	28	51	S3 با 1 درصد آهک
1/621	20/9	غیر واگرا	8/4	15	34	49	S3 با 2 درصد آهک

درآیند. سپس هر نمونه به سرعت در کیسه‌های پلاستیکی مربوط به خود ریخته شد و دوباره در این حالت، کیسه‌های پلاستیکی توسط دست برای مدت زمان دو دقیقه تکان داده می‌شوند و در نهایت نیز با خارج کردن هوای درون پلاستیک، کیسه‌های پلاستیکی را گره زده تا رطوبت آن‌ها حفظ شوند. پس از آن، کیسه‌های پلاستیکی برای مدت زمان ۲۴ ساعت در دمای طبیعی اتاق نگهداری شدند. بعد از زمان ۲۴ ساعت، نمونه‌های موجود در کیسه‌های پلاستیکی را قبل از استفاده در آزمایش‌های مورد نظر با عمل لرزش توسط دست تکان داده تا به صورت کامل ترکیب شوند.

به منظور تعیین مشخصات فیزیکی خاک‌های مورد بررسی، آزمایش‌های

واقع گردیده است (شکل ۱). در این تحقیق برای بررسی خودترمیمی از منابع قرضه ریزدانه گرگر این سد استفاده شده است. بدین منظور نمونه‌هایی از دو محل مختلف از دپوی مصالح ریزدانه گرگر (S1) (S2) تهیه گردید و آزمایش‌های دانه‌بندی، حدود اتربرگ، پین هول و هیدرومتری دوبل بر روی آن‌ها انجام شد و با اضافه کردن ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی آهک به نمونه‌های خاک مورد آزمایش قرار گرفتند. ابتدا خاک رُس با مقادیر از پیش تعیین شده آهک خشک، به صورت کامل ترکیب شده و با اضافه کردن آب و رساندن به رطوبت بهینه خاک مورد بررسی، برای مدت زمان دو دقیقه، نمونه‌ها با دست ترکیب شدند تا به صورت همگن



شکل ۵. آزمایش هیدرومتری، ۱ درصد آهک مخلوط شده برای نمونه S۲ و S۳
Fig. 5. Hydrometer test, 1% mixed lime for samples S2 and S3

این حال، آب مقطر را به ترتیب تحت بارهای آبی ۵۰ و ۱۸۰ و ۳۸۰ و ۱۰۲۰ میلیمتر در مدت زمانی معین از سوراخ نمونه عبور می‌دهند. بصورت طبیعی در اثر حل شدن، ذرات نمونه تحت بار هیدرولیکی از میان رس‌های واگرا و غیرواگرای مختلف خارج می‌شوند. نتایج آزمایش نمونه‌ها، بر اساس میزان حل‌شدگی خارج شده از نمونه و سرعت جاری شدن و اندازه نهایی سوراخ نمونه و بر اساس مشاهده‌های انجام گرفته، قابل بررسی و طبقه‌بندی است (جدول ۱). کلاس‌بندی نمونه‌های خاک در رده‌های واگرایی در آزمایش پین هول شرح زیر می‌باشد:

۱-۲-۱-۱ روش A

$D1$ و $D2$ رس‌های واگرایی که تحت بار آبی 50 mm سریعاً وارفته و شکست پیدا می‌کنند. $ND3$ و $ND4$ رس‌ها با واگرایی متوسط و کم که تحت بار آبی ۵۰ یا ۱۸۰ میلی‌متر به آهستگی فرسوده می‌شوند. $ND1$ و $ND2$ رس‌های غیر واگرا که تحت بار آبی ۳۸۰ یا ۱۰۲۰ میلی‌متر بصورت غیر کلوییدی و خیلی آهسته فرسوده می‌شوند.

۱-۲-۱-۲ روش B

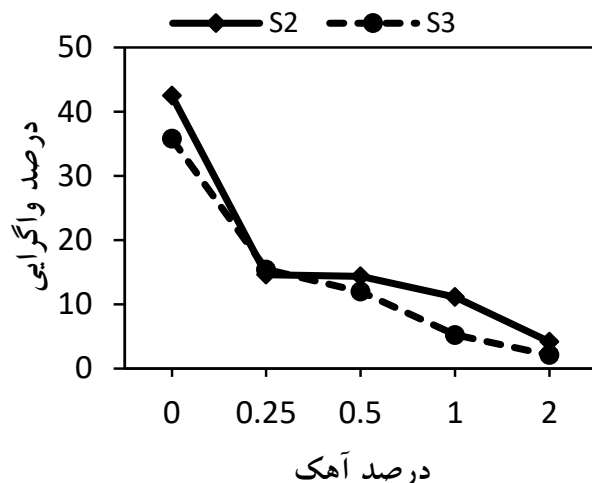
D رس‌های واگرایی که تحت بار آبی 50 mm سریعاً شکسته

فیزیکی و شیمیایی بر اساس استانداردهای *ASTM* از جمله آزمایش‌های دانه‌بندی، هیدرومتری مضاعف و حدود اتربرگ انجام شد [۱۵].

۱-۲-۱-۲ آزمایش پین هول

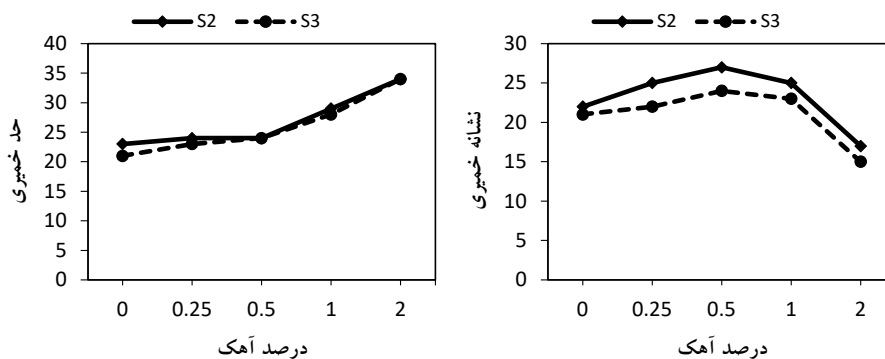
آزمایش اندازه‌گیری فرسایش خاک را پین هول شرارد^۱ و همکارانش (۱۹۷۶) در سال ۱۹۷۳ ابداع و نتایج آن را طی مقاله‌ای ارائه کردند. در این آزمایش میزان واگرایی خاک‌های ریزدانه مستقیماً با عبور جریان افقی آب مقطر با بار عمودی آبی 50 mm از مسیر سوراخ ایجاد شده به قطر 1 mm در نمونه شروع می‌شود و تحت این بار، کیفیت آب خارج شده از نمونه، مبنای تفکیک رس‌های واگرا و غیر واگرا است [۱۶]. نمونه خاک در استوانه‌ای به قطر دلخواه بر روی ماسه درشت دانه و توری سیمی با چشمه‌های کوچکتر از 2 mm که قبلاً در سلول آزمایش قرار داده شده‌اند، متراکم می‌گردد. ارتفاع نمونه مورد آزمایش باید 38 mm باشد. به کمک سوزنی به قطر 1 mm سوراخی در امتداد محور طولی نمونه ایجاد می‌شود. سپس دستگاه در وضعیتی قرار داده می‌شود که این سوراخ در راستای افق باشد. در

1 Sherard et al.



شکل ۶. تاثیر افزایش درصد آهک بر میزان کاهش واگرایی خاک

Fig. 6. The effect of increasing the percentage of lime on reducing the swelling of soil



شکل ۷. نتایج آزمایش اتبریگ با در نظر گرفتن درصد آهک متفاوت

Fig. 7. Atterberg test results with considering different lime percentages

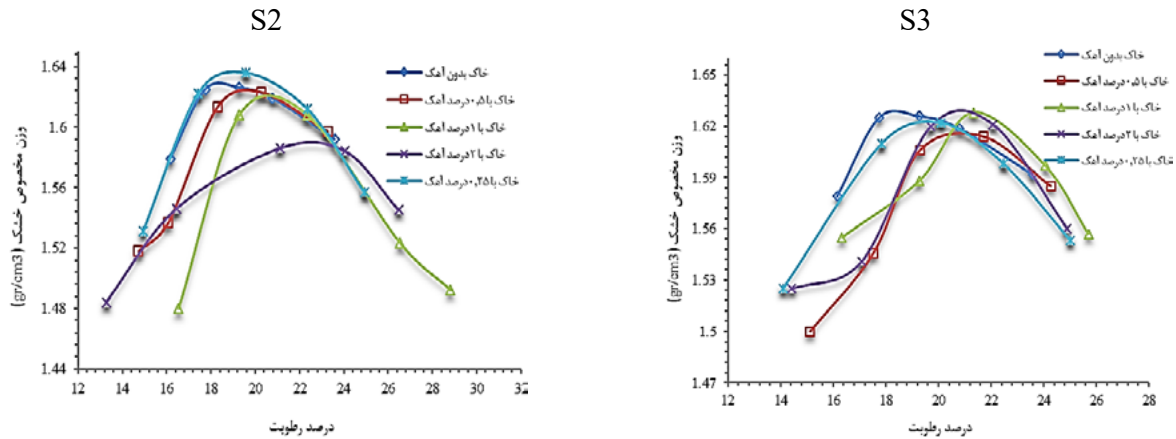
۲-۲- آزمایش هیدرومتری مضاعف

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 پراکنده ساز هگزا متافسفات سدیم با غلظت ۴ درصد و نیز همزن مکانیکی برای جداسازی دانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گردد. در مرحله دوم، آزمایش هیدرومتری روی ۲۵ گرم خاک خشک بر اساس ASTM D 4221-99 انجام شد [۱۸]. لازم به ذکر است در مرحله دوم (به منظور تعیین میزان پتانسیل طبیعی واگرایی خاک) آزمایش هیدرومتری بدون ماده پراکنده ساز (هگزا متافسفات سدیم) و نیز بدون استفاده از همزن مکانیکی انجام شد. با توجه به حساسیت رُس‌ها به درصد رطوبت، آزمایش هیدرومتری دوگانه

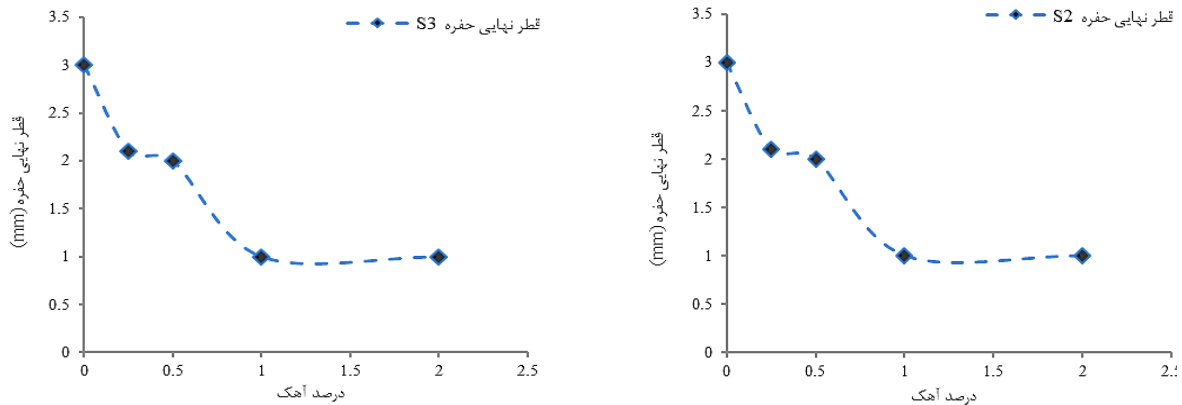
می‌شوند. SD رُس‌ها با واگرایی متوسط و کم که تحت بار آبی ۱۸۰ میلی‌متر به آرامی فرسوده می‌شوند. ND رُس‌های غیر واگرا که بصورت غیرکلوئیدی تحت بار آبی ۳۸۰ میلی‌متر فرسوده می‌شوند.

۲-۱-۳- روش C

$D1$ و $D2$ رُس‌های واگرایی که تحت بار آبی ۵۰ میلی‌متر سریعاً وار رفته و شکست پیدا می‌کنند. $ND3$ و $ND4$ رُس‌ها با واگرایی متوسط و کم که تحت بار آبی ۵۰، ۱۸۰ و یا ۳۸۰ میلی‌متر به آرامی فرسوده می‌شوند. $ND1$ و $ND2$ رُس‌های غیر واگرا که تحت بار آبی ۳۸۰ میلی‌متر بصورت غیرکلوئیدی و خیلی آرام فرسوده می‌شوند.



شکل ۸. آزمایش تراکم استاندارد برای نمونه ها
Fig. 8. Standard compaction test for samples



شکل ۹. اندازه نهایی حفره در آزمایش پین هول با اضافه کردن آهک برای نمونه ها
Fig. 9. The final hole size in the pinhole test by adding lime to the samples

معیارهای ارائه شده در جدول ۲ استفاده شده و در پایان معیار مناسب برای خاک‌های مورد آزمایش پیشنهاد شده است.

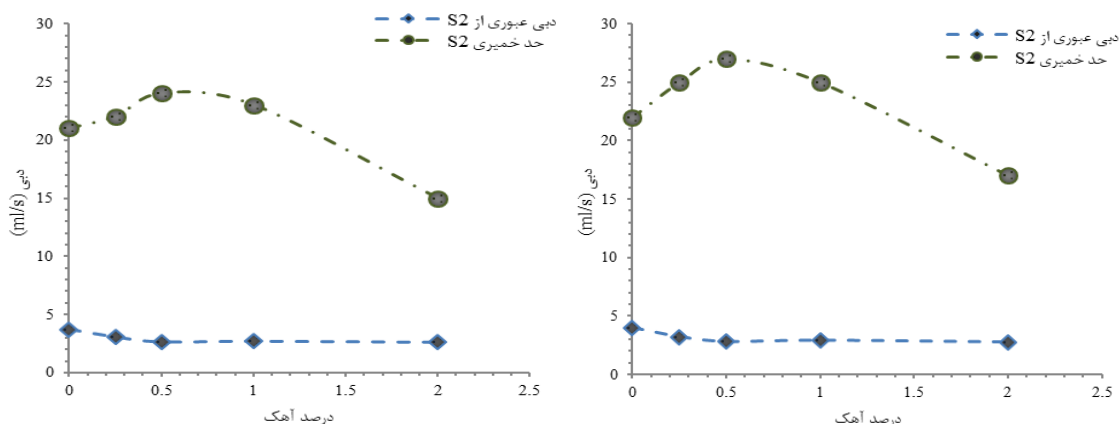
۳-۳- آزمایش‌های شیمیایی

آزمایش‌های شیمیایی براساس تأثیر یون سدیم به عنوان عامل اصلی در واگرایی خاکها بنا نهاده شده است. در آزمایش‌های شیمیایی با وجود آن که درصد رطوبت اولیه همان رطوبت حالت دست نخورده است، اما نمونه‌های مورد آزمایش نمونه‌های دست خورده محسوب می‌شود. برای آماده‌سازی نمونه‌ها خاک رُس 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

روی نمونه با رطوبت طبیعی انجام شد. نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش‌های هیدرومتری دوگانه ASTM در نمونه بدون ماده پراکنده‌ساز، بر اساس استاندارد 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 نمونه‌ها بر اساس رابطه ۱ محاسبه می‌شود. $F(0.005)1$ نسبت درصد عبوری از قطر 0.075 در آزمایش هیدرومتری معمولی و $F(0.005)2$ درصد عبوری قطر 0.075 میلی‌متر در آزمایش هیدرومتری دوگانه (بدون ماده پراکنده‌ساز) است.

$$\text{Dispersion Percent} = F(0.005)2 / F(0.005)1 \times 100 \quad (1)$$

برای تعیین پتانسیل واگرایی در آزمایش هیدرومتری دوگانه از



شکل ۱۰. دبی عبوری در آزمایش پین هول با اضافه کردن آهک برای نمونه‌ها
 Fig. 10. Discharge rate in pinhole test by adding lime to the samples

واگرایی خاک می‌باشد. تغییرات انجام گرفته در مشخصات خاک سبب کاهش یا افزایش جریان خودترمیمی و واگرایی خواهد بود. با انجام آزمایش‌های مربوطه بدنبال حالت بهینه برای حداکثر خودترمیمی و حداقل واگرایی هستیم. جهت شناسایی اولیه خاک از این قرصه از موقعیت‌های مختلف نمونه برداری و آزمایش‌های لازم انجام گرفت که نتایج طبق جدول ۳ ارائه گردید. با توجه به نتایج مصالح عمدتاً مشکوک به واگرایی بودند، بنابراین از موقعیت‌های مختلف مصالح برداشت و در دو محل مختلف دپو گردیدند (S1, S2) و نمونه‌هایی از این دو محل تهیه و آزمایش‌های دانه‌بندی، حدود اتربرگ، پین هول و هیدرومتری دابل بر روی آن‌ها انجام گردید که نتایج در جدول ۴ ارائه گردیده است. برای دانه‌بندی ذرات و همچنین تعیین درصد ریزدانه از آزمایش هیدرومتری استفاده شده است. نمونه‌های از نمودارها در شکل ۵ ملاحظه می‌گردد. براساس نتایج تمامی نمونه‌ها قطر بیش از ۹۰ درصد ذرات کمتر از ۰/۰۷۵ میلی متر می‌باشند. براساس آزمایش هیدرومتری میزان واگرایی نمونه‌ها با درصد آهک‌های مختلف تعیین گردیدند که براساس شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش درصد آهک میزان واگرایی نمونه‌ها به شدت کاهش می‌یابد. براساس نتایج حاصله از آزمایش حدود اتربرگ مشاهده می‌شود که حد روانی با آهک ۱ درصد روندی افزایش داشته و بعد از آن کاهش می‌یابد، همچنین حد خمیری پیوسته حالت افزایش دارد اما در رابطه با نشانه خمیری براساس افزایش درصد آهک یک افزایش اولیه‌ای در نشانه خمیری مشاهده می‌شود که بعد از آهک ۵ درصد این روند معکوس و کاهش می‌یابد (شکل ۷).

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، پتاسیم، کلسیم و منیزیم تعیین شده و براساس آن نسبت جذب سدیم یا SAR مجموع کل املاح موجود یا TDS و میزان درصد سدیم یا PS با استفاده از معادله‌های ۲ تا ۴ تعیین شد.

$$SAR = Na^+ / [0.5 \times (Ca^{2+} + Mg^{2+})]^{0.5} \quad (2)$$

$$TDS = Na^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+} \quad (3)$$

$$Ps = Na^+ / TDS \times 100 \quad (4)$$

آزمایش تعیین واگرایی بر اساس معیار اصلاح شده شرارد و عدد SAR انجام شد. نمودار تعیین پتانسیل واگرایی بر اساس معیار شرارد در شکل ۳ ارائه شده است. شکل ۴ نیز فلوجارت آزمایش‌های انجام گرفته و ترکیب نمونه‌های مورد استفاده در تحقیق را نشان می‌دهد.

۳- نتایج و بحث

ریزدانه بودن خاک از عوامل مؤثر در موضوع تورم خاک است. وجود پتانسیل تورم در خاک سبب تقویت روند خودترمیمی رُس می‌باشد. اما یکی از چالش‌های عمده در روند خودترمیمی وجود

جدول ۵. نتایج کلاس بندی و خودترمیمی نمونه های S2 و S3
Table 5. Classification and self-healing results of S2 and S3 samples

خودترمیمی	کلاس بندی	تیرگی جریان	زمان آزمایش		دبی جریان	رطوبت بهینه نمونه (%)
			ثانیه	ارتفاع آبی (میلی متر)		
نمونه S2 با 2 درصد آهک						
خودترمیمی قابل پیش بینی است.	غیر واگرا (ND1)	کدر شفاف	300	50	0/4	22/6
خودترمیمی قابل پیش بینی است.	غیر واگرا (ND1)	کدر شفاف	300	50	0/42	22/6
خودترمیمی قابل مشاهده است.	غیر واگرا (ND1)	کدر شفاف	300	180	1/00	22/6
خودترمیمی قابل پیش بینی است.	غیر واگرا (ND1)	کاملاً شفاف	300	380	1/53	22/6
خودترمیمی قابل پیش بینی است.	غیر واگرا (ND1)	کاملاً شفاف	300	1020	2/75	22/6
نمونه S2 با 1 درصد آهک						
خودترمیمی قابل پیش بینی است.	غیر واگرا (ND2)	کدر شفاف	300	50	0/43	20/8
خودترمیمی قابل پیش بینی است.	غیر واگرا (ND2)	کدر شفاف	300	50	0/43	20/8
خودترمیمی قابل مشاهده است.	غیر واگرا (ND2)	کدر شفاف	300	180	1/07	20/8
خودترمیمی قابل پیش بینی است.	غیر واگرا (ND2)	کدر شفاف	300	380	1/52	20/8
خودترمیمی قابل مشاهده است.	غیر واگرا (ND1)	کاملاً شفاف	300	1020	2/9	20/8
نمونه S2 با 0/5 درصد آهک						
-	غیر واگرا (ND1)	کدر شفاف	300	50	0/33	20/27
خودترمیمی قابل مشاهده است.	غیر واگرا (ND1)	کدر شفاف	300	50	0/43	20/27
خودترمیمی قابل مشاهده است.	غیر واگرا (ND2)	کدر شفاف	300	180	1/95	20/27
-	غیر واگرا (ND1)	کدر شفاف	300	380	1/52	20/27
خودترمیمی قابل پیش بینی است.	غیر واگرا (ND1)	کاملاً شفاف	300	1020	2/8	20/27
نمونه S2 با 0/25 درصد آهک						
-	غیر واگرا (ND2)	کدر شفاف	300	50	0/38	19/56
خودترمیمی قابل پیش بینی است.	غیر واگرا (ND2)	کدر شفاف	300	50	0/48	19/56
خودترمیمی قابل مشاهده است.	غیر واگرا (ND2)	کدر شفاف	300	180	1/02	19/56
-	غیر واگرا (ND2)	کدر شفاف	300	380	1/7	19/56
خودترمیمی قابل پیش بینی است.	(ND1)	کاملاً شفاف	300	1020	3/22	19/56
نمونه S2 با خاک طبیعی						
-	غیر واگرا (ND1)	کاملاً غیر واگرا شفاف	300	50	0/32	19/36
خودترمیمی قابل پیش بینی است.	واگرا (ND3)	کدر شفاف	300	50	0/35	19/36
خودترمیمی قابل مشاهده است.	واگرا (ND2)	کدر شفاف	300	180	0/82	19/36

ادامه جدول ۵. نتایج کلاس‌بندی و خودترمیمی نمونه‌های S2 و S3
Table 5. Classification and self-healing results of S2 and S3 samples

-	غیر واگرا (ND2)	کاملاً شفاف	300	380	1/52	19/36
خودترمیمی قابل مشاهده است.	غیر واگرا (ND2)	کاملاً شفاف	300	1020	4/00	17
نمونه S3 با 2 درصد آهک						
خودترمیمی قابل پیش‌بینی است.	غیر واگرا (ND1)	کدر شفاف	300	50	0/43	20/90
خودترمیمی قابل پیش‌بینی است.	غیر واگرا (ND1)	کدر شفاف	300	50	0/43	20/90
خودترمیمی قابل مشاهده است.	غیر واگرا (ND1)	کدر شفاف	300	180	0/95	20/90
خودترمیمی قابل پیش‌بینی است.	غیر واگرا (ND1)	کاملاً شفاف	300	380	1/47	20/90
خودترمیمی قابل پیش‌بینی است.	غیر واگرا (ND1)	کاملاً شفاف	300	1020	2/6	20/90
نمونه S3 با 1 درصد آهک						
خودترمیمی قابل پیش‌بینی است.	غیر واگرا (ND2)	کدر شفاف	300	50	0/40	21/32
خودترمیمی قابل پیش‌بینی است.	غیر واگرا (ND2)	کدر شفاف	300	50	0/42	21/32
خودترمیمی قابل مشاهده است.	غیر واگرا (ND2)	کدر شفاف	300	180	0/92	21/32
خودترمیمی قابل پیش‌بینی است.	غیر واگرا (ND2)	کدر شفاف	300	380	1/40	21/32
خودترمیمی قابل مشاهده است.	غیر واگرا (ND1)	کاملاً شفاف	300	1020	2/68	21/32
نمونه S3 با 0/5 درصد آهک						
-	غیر واگرا (ND1)	کاملاً شفاف	300	50	0/37	20/51
خودترمیمی قابل مشاهده است.	غیر واگرا (ND1)	کاملاً شفاف	300	50	0/40	20/51
خودترمیمی قابل مشاهده است.	غیر واگرا (ND2)	کاملاً شفاف	300	180	0/85	20/51
-	غیر واگرا (ND1)	کاملاً شفاف	300	380	1/32	20/51
خودترمیمی قابل پیش‌بینی است.	غیر واگرا (ND1)	کاملاً شفاف	300	1020	2/63	20/51
نمونه S3 با 0/25 درصد آهک						
-	غیر واگرا (ND2)	کدر شفاف	300	50	0/33	18/98
خودترمیمی قابل پیش‌بینی است.	غیر واگرا (ND2)	کدر شفاف	300	50	0/42	18/98
خودترمیمی قابل مشاهده است.	غیر واگرا (ND2)	کدر شفاف	300	180	0/80	18/98
-	غیر واگرا (ND2)	کدر شفاف	300	380	1/55	18/98
خودترمیمی قابل پیش‌بینی است.	غیر واگرا (ND1)	کاملاً شفاف	300	1020	3/05	18/98
نمونه S3 با خاک طبیعی						
-	غیر واگرا (ND1)	کاملاً شفاف	300	50	0/27	18/51
خودترمیمی قابل پیش‌بینی است.	واگرا (ND3)	کدر شفاف	300	50	0/32	18/51
خودترمیمی قابل مشاهده است.	واگرا (ND2)	کدر شفاف	300	180	0/73	18/51
-	غیر واگرا (ND2)	کاملاً شفاف	300	380	1/58	18/51
خودترمیمی قابل مشاهده است.	غیر واگرا (ND2)	کاملاً شفاف	300	1020	3/70	18/51

جدول ۶. نتایج آزمایش شیمیایی بر روی نمونه‌ها

Table 6. Chemical test results on samples

واگرایی	نسبت جذب سدیم	Ps%	TDS (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Mg ⁺⁺ (mg/l)	Ca ⁺⁺ (mg/l)	NA ⁺ (mg/l)	گچ %	نمونه
واگرا	14/18	75/69	42/7	0/256	5/8	4/6	32/32	0/45	S2 بدون آهک
اندکی واگرا	12/5	74/58	41/65	0/259	6/6	4/85	33/14	0/59	S2 با 0/25 درصد آهک
غیرواگرا	6/45	74/01	39/698	0/265	6/12	5/02	32/88	0/61	S2 با 0/5 درصد آهک
غیرواگرا	5/9	73/25	38/45	0/264	6/78	5/15	33/69	0/62	S2 با 1 درصد آهک
غیرواگرا	6/14	74/64	38/69	0/260	6/85	5/5	33/74	6	S2 با 2 درصد آهک
واگرا	12/04	72/32	38/3	0/281	5/6	5	27/7	0/5	S3 بدون آهک
واگرا	118/10	70/45	34/02	0/274	6/45	5/1	28/57	0/53	S3 با 0/25 درصد آهک
غیرواگرا	6/15	68/40	37/47	0/265	7/11	6/56	29/45	0/59	S3 با 0/5 درصد آهک
غیرواگرا	5/14	71/13	36/45	0/266	7/28	7/35	30/36	0/65	S3 با 1 درصد آهک
غیرواگرا	6/14	68/69	47/35	0/259	8/33	8/55	31/54	0/69	S3 با 2 درصد آهک

۱ درصد کاهش یافته و پس از آن تقریباً روند ثابت بخود گرفته است. شاخص خمیری با افزایش آهک تا ۰/۵ درصد افزایش یافته و پس از آن با افزایش میزان آهک کاهش یافته است. با توجه به کاهش زیاد شاخص خمیری خاک (۲۲-۲۸ درصد) در نمونه با آهک ۲ درصد، نمونه با آهک ۱ درصد را می‌توان به عنوان بهینه‌ترین و مؤثرترین گزینه برای کاهش میزان واگرایی خاک رسی عنوان کرد.

۱-۳- نتایج آزمایش شیمیایی

جدول ۶ نتایج آزمایش شیمیایی انجام گرفته بر روی دو نمونه را نشان می‌دهد. نتایج آزمایش شیمیایی حاکی از واگرا بودن نمونه‌ها در حالت بدون آهک می‌باشد که با افزایش آهک از ۰/۵ درصد نمونه‌ها حالت غیرواگرایی پیدا می‌کنند.

با مقایسه نتایج آزمایش‌های مختلف انجام گرفته که در جدول ۷ ارائه شده است، برای نمونه‌های S_۱ و S_۲ و با درصد آهک‌های مختلف مشاهده می‌شود که با افزایش درصد آهک نمونه به سمت غیرواگرایی میل می‌نماید و تعیین خودترمیمی نمونه که ارتباط مستقیم با نشانه خمیری دارد تا حدی افزایش و بعد کاهش پیدا می‌کند با عنایت به اینکه بهترین حالت زمانی است که واگرایی حداقل و خودترمیمی حداکثر باشد، در نتیجه نمونه با یک درصد آهک کمترین واگرایی و

منحنی آزمایش تراکم خاک برای دو نمونه S_۲ و S_۳ مطابق شکل ۸ می‌باشد. بررسی شکل حاکی از آن است که با افزایش آهک رطوبت بهینه افزایش یافته و وزن مخصوص خشک نمونه‌ها کاهش یافته است. با انجام آزمایش بر روی نمونه‌ها از موقعیت‌های مختلف از قرضه ریزدانه گرگر مشاهده شد که نتایج دلالت بر مشکوک بودن مصالح این قرضه به واگرایی داشته و با توجه به حساسیت عملکرد هسته سد خاکی، جهت افزایش پایداری و کاهش واگرایی خاک، درصدهای متفاوت آهک بر دو نمونه S_۲ و S_۳ اضافه شد که نتایج آزمایش در جدول ۵ ارائه گردیده است.

نتایج آزمایش‌های انجام گرفته بر روی نمونه‌های S_۲ و S_۳ نشان می‌دهد که با افزایش درصد آهک نمونه‌ها به سمت غیرواگرا بودن حرکت می‌کنند. شکل ۹ قطر نهایی حفره در آزمایش پین هول برای دو نمونه S_۲ و S_۳ با درصد آهک‌های مختلف را نشان می‌دهد. بررسی شکل‌ها حاکی از این است که با اضافه کردن آهک به نمونه‌ها قطر سوراخ کاهش یافته و با افزایش میزان آهک تا ۱ درصد قطر حفره ۶۷٪ کاهش یافته و پس از آن با افزایش آهک مقدار ثابت ۱ میلی متر را به خود گرفته است. شکل ۱۰ نیز دبی عبوری از نمونه‌ها و حد خمیری را با اضافه کردن آهک در آزمایش پین هول را نشان می‌دهد. بررسی شکل حاکی از آن است که با اضافه کردن آهک دبی عبوری تا آهک

بیشترین خودترمیمی را خواهد داشت.

روش اصلاح خاک رُس با افزودن آهک به میزان ۱ درصد توصیه می‌گردد.

۴- نتیجه‌گیری نتایج به صورت کمی

در این تحقیق با بررسی آزمایشگاهی، پدیده واگرایی و خود ترمیمی در هسته سدهای خاکی مورد توجه قرار گرفت. بدین منظور نمونه‌ای از منابع قرضه گرگر سد گردیان تهیه گردید. این نمونه به پنج صورت، با ترکیب ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی آهک، و خاک طبیعی با استفاده از آزمایش پین هول و هیدرومتری دابل مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تحقیق حاکی از آن است که:

- در آزمایش هیدرومتری مضاعف با اضافه کردن ۰/۲۵ درصد آهک نمونه حالت غیرواگرایی پیدا کرده در حالی که در آزمایش پین هول با اضافه کردن ۰/۵ درصد آهک و بیشتر نمونه حالت غیرواگرایی داشته است. که جهت حصول اطمینان و دقت بیشتر توصیه می‌گردد آزمایش پین هول بکار گرفته شود.

- در آزمایش شیمیایی شرارد با افزایش آهک از میزان ۰/۵ درصد نمونه‌های واگرا به حالت غیرواگرایی تبدیل می‌شوند.

- قطر نمونه‌های بدون آهک S2 و S3 در آزمایش پین هول ۳ میلیمتر بوده که با اضافه کردن آهک این قطر کاهش یافته است. در آهک ۱ درصد قطر نمونه ۶۷ درصد کاهش داشته و به ۱ میلیمتر رسیده است و افزایش آهک پس از آن تأثیری در کاهش قطر نمونه نداشته است.

- شاخص خمیری تا میزان آهک ۰/۵ درصد برای هر دو نمونه افزایش یافته و با افزایش آهک این شاخص کاهش می‌یابد.

- دبی عبوری از نمونه بدون آهک در آزمایش پین هول برای S2 و S3 به ترتیب ۴ و ۳/۷ میلی لیتر بر ثانیه بوده که در نمونه‌های دارای آهک میزان دبی عبوری کاهش یافته است. با توجه به دبی عبوری و شاخص خمیری نمونه‌ها، نمونه دارای ۱ درصد آهک با کاهش ۲۸ درصدی دبی و شاخص خمیری ۲۵ و ۲۳ بترتیب برای نمونه S2 و S3 به عنوان مطلوب ترین ترکیب می‌باشد.

برای صحت‌سنجی آزمایش از دو نمونه دیگر نیز با اضافه کردن ۱ درصد آهک مورد آزمایش قرار گرفتند که هر دو نمونه با اضافه کردن آهک از واگرایی به غیرواگرایی تغییر حالت دادند.

- جهت افزایش پایداری و کاهش واگرایی مصالح قرضه رسی گرگر

مراجع

- [1] Al-Rawas A. A., Hago A. W., Al-Sarmi, H., Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman. *Building and Environment* 40, (2005) 681-687.
- [2] Lin, D.F., Lin, K.L., Hung, M.J., Luo. HL., Sludge ash/hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil. *Journal of Hazardous Materials* 145, (2007) 58-64.
- [3] Sakr MA., Shahin M.A., Metwally, Y.M., Utilization of lime for stabilizing soft clay soil of high organic content. *Geotechnical and Geological Engineering* 27, (2009) 105-113.
- [4] Abu Seif, E.S.S., Efficiency of Quicklime in Reducing the Swelling Potential of Pulverized Expansive Shale, Northern Jeddah, Saudi Arabia, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74, (2015) 637-650.
- [5] Dif, A.E., Bluemel, W.F., Expansive Soils under Cyclic Drying and Wetting. *ASTM Geotechnical Testing* 14(1), (1991) 96-102.
- [6] Al-Homoud, A.S., Basma, A.A., Husein Maluawi, A.I., Al Bashabsheh, M.A., Cyclic Swelling Behavior of Clays. *Geotechnical Engineering* 121(7), (1995) 562-565.
- [7] Cokca. E., Use of class C fly ashes for the stabilization of an expansive soil. *Geotechnical and Geo environmental Engineering* 127 (7), (2001) 568-573.
- [8] Pejon, O.J., Zuquette, L.V., Analysis of cyclic swelling of mudrocks. *Engineering Geology* 67, (2002), 97-108.
- [9] D 698, ASTM Standard., Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. Originally published as (2000). D 698 – 42T.
- [10] Sherard. J.L., Dunnigan, L.P., Decker, R.S, Pinhole Test for Identifying Dispersive Soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division* 102, (1976). 69-85.
- [11] D-4647-93, ASTM standard, Standard test method for identification and classification of Dispersive clay soils by the Pinhole Test (1998).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

K. Roushangar, M.T. Alami, Y. Houshyar, Experimental investigation of lime impact on self-healing and dispersion processes of clay soils (Case study: Gurdyan dam), Amirkabir J. Civil Eng., 52(6) (2020) 1347-1360.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15354.5893](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15354.5893)

