تخمین پتانسیل واگرایی خاک و تثبیت آن با استفاده از نانو سلولز

نسرین زارع‌جونقانی، حمید مهرنهاد*، محمدمهدی خبیری، سارا سرفراز؛
دانشگاه یزد، دانشکدهٔ مهندسی عمران

تاریخ: دریافت ۹۹/۰۶/۳۰ پذیرش ۹۹/۱۰/۱۶

چکیده

وجود املاح سدیم در بعضی از خاک‌های ریزدانه رسی باعث ایجاد پدیدهٔ واگرایی در این خاک‌ها می‌شود. عدم شناسایی دقیق رس‌های واگرا خسارات و خرابی‌هایی را به‌دنبال دارد زیرا ذرات خاک‌های رسی واگرا تحت شرایط خاصی متفرق شده و به‌سرعت شسته می‌شوند. در این پژوهش به بررسی میزان واگرایی خاک‌های رخنمون یافته در جنوب شرق یزد پرداختیم و در نهایت اصلاح پتانسیل واگرایی خاک با استفاده از نانو سلولز بررسی شد. پس از انجام یک‌سری آزمایش‌های فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی، مشخصات خاک‌های بررسی شده تعیین شد و درجهٔ واگرایی خاک‌ها با انجام آزمایش‌های شیمیایی، پین‌هول،کرامب و هیدرومتری مضاعف مشخص شد. هم‌چنین با استفاده از سیستم طبقه‌بندی، واگرایی خاک‌ها بررسی شد. نهایتاً تثبیت واگرایی خاک با تهیه نمونه‌های ترکیب شده با ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد نانو سلولز انجام شد. نتایج نشان داد که خاک‌های بررسی شده در گمانه A دارای واگرایی متوسط و در گمانه B واگرایی شدید تا کمی واگرا است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت هر چه به‌سمت مرکز دشت نزدیک‌تر شویم واگرایی بیش‌تر می‌شود. هم‌چنین نتایج آزمایش‌های تثبیت واگرایی خاک نشان داد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر به‌ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. افزایش مقاومت تک‌محوری و عدد CBR نمونه‌ها نشان می‌دهد افزایش نانو سلولز تأثیر مثبت بر نمونه‌های اصلاح شده دارد و موجب اصلاح واگرایی خاک این منطقه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: جنوب شرق یزد، ویژگی‌های مکانیکی، درجه واگرایی، سیستم طبقه‌بندی.

*نویسنده مسئول Hmehrnahad@yazd.ac.ir

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

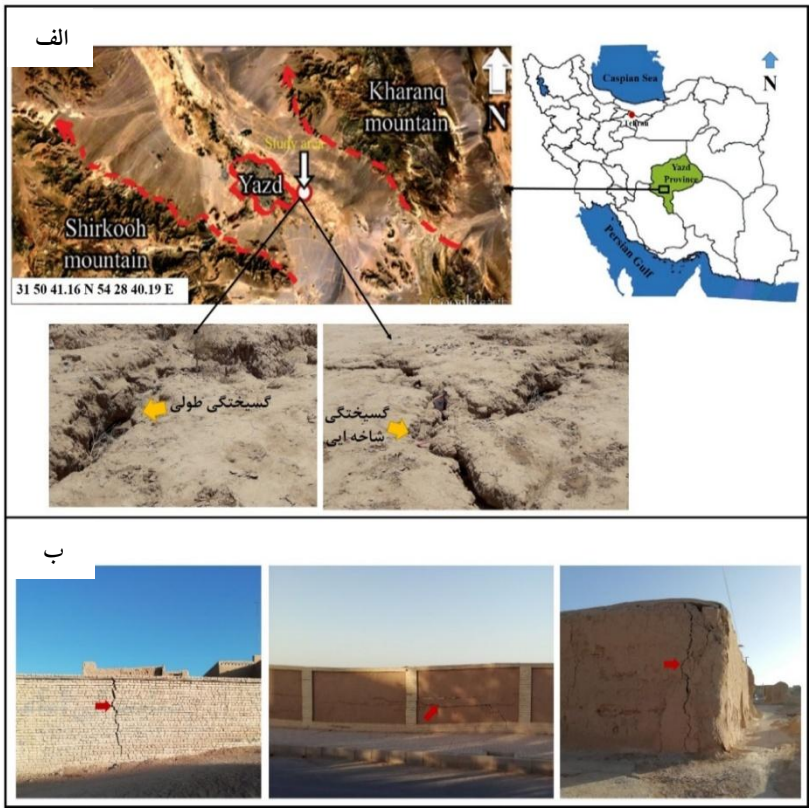
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]

مقدمه

شناخت خواص فیزیکی، مکانیکی و کانی‌شناسی خاک‌ها به‌ویژه خاک‌های ریزدانه قبل از اجرای پروژه‌های عمرانی مختلف ضروری است. تجربه‌های گذشته نشان می‌دهد که خواص مکانیکی اغلب خاک‌ها با افزایش رطوبت و اشباع شدن تغییر می‌کند. در برخی از خاک‌ها بر اثر افزایش رطوبت پدیده‌های خاصی بروز می‌کند که بعضاً به خسارات عمده‌ای در پروژه‌های عمرانی منجر می‌شود. از انواع این خاک‌ها، خاک‌های واگرا هستند [۱]. از نظر ژئوتکنیکی، خاک واگرا به آن دسته از خاک‌هایی گفته می‌شود که به‌دلیل کیفیت یا شرایط خاص فیزیکی یا شیمیایی ذرات آن در مجاورت با آب به حالت پراکنده و شناور درآمده و همراه با جریان از محیط خارج می‌شوند. به‌طورکلی خاک‌های واگرا به‌عنوان خاک‌های رسی با درصد سدیم زیاد که بسیار مستعد فرسایش هستند تعریف می‌شود. تمایل خاک‌های رسی واگرا به پراکندگی یا پخش‌شدگی به کانی‌شناسی، شیمی خاک و هم‌چنین نمک‌های محلول در آب منفذی و فرسایش آبی بستگی دارد [۲]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که وجود کانی‌های رس فعال باغلظت الکترولیتی پایین مانند مونت موریلونیت و یون‌های سدیم قابل تعویض به رفتار واگرایی خاک کمک می‌کند. ازآن‌جاکه شناسایی خاک‌های واگرا از طریق انجام آزمایش‌های معمول آزمایشگاهی امکان‌پذیر نیست، پژوهش‌های زیادی برای تعیین روش‌های شناسایی این نوع خاک‌ها انجام شده است [۳]. بر این اساس در طول دهه‌های گذشته بسیاری از محققان روش‌های شناسایی واگرایی خاک‌ها را با استفاده از خصوصیات فیزیکی و یا شیمیایی خاک‌ها بررسی شده‌اند. از جمله آزمایش‌های متداول برای واگرایی خاک می‌توان به آزمایش‌های پین هول، هیدرومتری مضاعف و آزمایش‌های شیمیایی اشاره کرد. هم‌چنین طی سال‌های گذشته خصوصیات مکانیکی از جمله آزمایش‌های فشار تک‌محوری، تراکم، مقاومت برشی و نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) برای شناسایی خاک‌های واگرا استفاده شده است [٤]. در دهه‌های گذشته گسیختگی‌هایی در سطح دشت یزد- اردکان اتفاق افتاده است (شکل ۱ الف)، که مربوط به حضور خاک‌های مسئله‌دار در این منطقه است. خسارت‌های جدی از جمله ایجاد ترک در ساختمان‌ها و جاده‌ها در این منطقه قابل مشاهده است که عامل احتمالی این پدیده وجود خاک‌های واگرا در این منطقه است (شکل ۱ ب).

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

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]



شکل ۱. الف) وضعیت جغرافیایی منطقهٔ بررسی شده همراه با نمای گسیختگی طولی و شاخه‌ای در ناحیه، ب) ترک‌خوردگی دیواره‌های ساختمان در جنوب شرق یزد به‌دلیل وجود خاک‌های واگرا

ساخت پروژه‌های عمرانی در نواحی دارای خاک‌های واگرا بسیار مشکل است و احتمال فرسایش خاک همواره خطری جدی برای سازه‌های مستقر بر نهشته‌های دارای خاصیت واگرایی محسوب می‌شود. بنابراین شناسایی و هم‌چنین اصلاح خاک‌های واگرا اهمیت زیادی دارد. روش‌های مختلفی برای کنترل واگرایی وجود دارد، امروزه نانو الیاف سلولزی به دلایل متعددی ازجمله فراوانی و زیست سازگاری مهم‌ترین و پرکاربردترین نانو ماده‌ی طبیعی است، که به‌عنوان راه‌کاری مناسب در مواجهه با خاک‌های واگرا استفاده می‌شود. در حال حاضر الیاف سلولز به‌عنوان کاندیدایی ایده‌آل در حوزه‌های کاربردی مختلف ازجمله ساختمان‌سازی به‌شکل گسترده‌ای بررسی شده است که در ساختمان‌سازی برای استحکام در

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]

برابر خزش و سایش و چسبندگی خوب و برای تقویت سیمان و بتن پیش‌تنیده و پیش‌ساخته به‌منظور افزایش چقرمگی و ماندگاری آنها استفاده می‌شود.

در پژوهشی، عساکره و آوازه (۱۳۹٦)، روی تأثیر نانو رس بر رفتار خاک‌های واگرا موجود در تصفیه‌خانه فاضلاب شهر میناب با استفاده از آزمایش‌های ویژه تعیین واگرایی بررسی کردند. نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها نشان داد که افزودن درصدهای پایین نانو رس به خاک واگرایی را بهبود می‌بخشد ولی هر چه میزان نانورس مصرفی افزایش پیدا می‌کند خاک به سمت واگرایی بیش‌تر میل می‌کند [۵]. زمردیان و سلیمانی (۱۳۹٦)، به بررسی تأثیر ماده افزودنی نانوسیلیس در کنترل فرسایش ماسه، با استفاده از دستگاه تابع فرسایش پرداختند. نمونه‌های حاوی نانوسیلیس با مقادیر مختلف درصد وزنی خاک خشک در قالب تراکم استاندارد متراکم گردیده و به‌وسیلهٔ یک فلوم بسته تحت دبی‌های متغیر آزمایش شده فرسایش‌پذیری قرار گرفتند. نتایج تصویر میکروسکوپی نشان می‌دهد که با افزودن ذرات نانوسیلیس به خاک خشک، ساختار خاک متراکم‌تر می‌شود، که این امر موجب کاهش فرسایش‌پذیری می‌شود [٦].

عباسی و همکاران (۲۰۱۸)، به بررسی امکان استفاده از نانو ذرات رس برای کنترل پتانسیل واگرایی خاک‌های رسی پرداختند. بدین‌منظور ابتدا آزمایش‌های شناسایی بر دو نوع خاک رس و نانورس و سپس آزمایش‌های پین هول روی نمونه‌های خاک با مقادیر مختلف نانورس شامل صفر (طبیعی)، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲ و ٤ درصد وزنی خاک با در نظر گرفتن سنین عمل‌آوری ۱، ۳ و ۷ روز انجام شد. نتایج نشان دادند که افزودن نانورس به خاک رس واگرا به‌طور کلی موجب کاهش پتانسیل واگرایی خاک می‌شود. هم‌چنین مشخص شد زمان عمل‌آوری نقش چشم‌گیری در تثبیت خاک با نانوذرات رس داشته و برای انجام فعل و انفعالات شیمیایی مورد نیاز برای تثبیت حدود سه روز زمان لازم است [۷]. گایدی و ساتیندرا (۲۰۲۰)، به بررسی بهبود ویژگی‌های خاک واگرا بستر روسازی با استفاده از آهک پرداختند. نتایج نشان داد با افزایش مقدار آهک ویژگی‌های شاخص واگرایی کم، مقاومت فشاری تک‌محوری و نسبت باربری کالیفرنیا افزایش و شرایط مختلف آزمایش بهبود می‌یابد. مقدار

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

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]

آهک مؤثر باید ۷ ٪ تا ۹ ٪ از وزن خاک خشک باشد، زیرا استحکام و کیفیت بالایی در رتبه‌بندی خاک بستر روسازی ایجاد می‌کند [۸].

پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد ارزیابی واگرایی خاک بدون در نظر گرفتن سیستم طبقه‌بندی واگرایی خاک بوده است. با در نظر گرفتن این موضوع، در این پژوهش سعی شده است پتانسیل واگرایی خاک‌ها با استفاده از سیستم طبقه‌بندی بررسی شود. روش کلی در این تحقیق شامل بازدیدمحلی، تهیه نمونه‌های خاک، انجام آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی شناسایی خاک و استفاده از سیستم طبقه‌بندی بری تعیین میزان واگرایی خاک است. نهایتاً اثر افزودن مقادیر مختلف نانو الیاف سلولزی در اصلاح واگرایی خاک‌های رسی منطقه جنوب شرق یزد بررسی و مورد آزمایش واقع شده است.

موقعیت جغرافیایی، ژئومورفولوژی، زمین‌شناسی

دشت یزد- اردکان به‌صورت یک چاله زمین‌ساختی مابین رشته‌کوه‌های خرانق در سمت شرق تا شمال و شیرکوه در سمت جنوب تا جنوب غربی قرارگرفته است. روند رشته‌کوه خرانق متمایل به شمال و روند رشته‌کوه شیرکوه بیش‌تر متمایل به غرب است. مابین این دو رشته‌کوه، بقایای عوارض دوران سوم به‌صورت تپه‌های کم ارتفاع کنگلومرایی- ماسه‌سنگی بیرون‌زدگی دارند که به‌طور محلی موجب تغییر توپوگرافی شده‌اند و شرایط ژئومورفولوژیکی خاصی را پدید آورده‌اند. ارتفاعات مهم و مرتفع منطقه بیش‌تر از سازندهای آهکی مربوط به کرتاسه تشکیل شده است [۹]. شهر یزد بر رسوبات آبرفتی جوان (Q) و بادرفتی (تلماسه) مربوط به کواترنر واقع شده است. نهشته‌های پیرامون آن آبرفت‌های رودخانه‌ایی با عناصر تشکیل‌دهنده نظیر نهشته‌های تخریبی درشت‌دانه است و رسوبات بادرفتی، مرکز شهر به همراه رسوبات آبرفتی را در برمی‌گیرند. منطقهٔ بررسی شده اراضی دشت رسی واقع در جنوب شرق یزد را شامل می‌شود که رسوبات آن بیش‌تر از تخریب سنگ‌های رشته‌کوه خرانق است (شکل ۱). عوارض خاص ژئومورفولوژیکی در منطقه قابل مشاهده نیست و تنها اشکال موجود عبارت‌اند از گسیختگی‌هایی به شکل طولی و شاخه‌ایی که عامل اصلی تشکیل این گسیختگی‌ها مورد سؤال است (شکل A ۱). از لحاظ اقلیمی منطقهٔ بررسی شده دارای اقلیم گرم و خشک

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

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]

بیابانی با تابستان‌های بسیار گرم و خشک و زمستان‌های نسبتاً سرد و خشک است که بیش‌تر بارش سالانه نیز در این فصل اتفاق می‌افتد. آمار میانگین ٤٢ ساله بارش در شهر یزد نشان‌دهندهٔ نوسان شدید میزان بارش در طول این دوره است. میانگین بارش سالیانه در این مدت حدود ۵۹/۳ میلی‌متر بوده است، در طول همین مدت میانگین دمای سالیانه حدود ۱۹ درجه سلسیوس است. میزان تبخیر در استان یزد به‌دلیل خشکی شدید هوا و وزش بادهای تند، بسیار زیاد است و میانگین تبخیر از تشت سنجش، در مناطق پست‌تر استان (ارتفاع کم‌تر از ۱۲۰۰ متر) بین ۳۰۰۰ تا ۳٤۰۰ میلی‌متر است و در ارتفاعات بالای ۲۰۰۰ متر تا ۲۵۰۰ میلی‌متر کاهش می‌یابد [۹].

مواد و روش‌ها

پس از انجام پژوهش‌های اولیه و بررسی وضعیت زمین‌شناسی محدودهٔ بررسی شده، برای اخذ نمونه به‌منظور انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی اقدام به حفر دو گمانه با عمق‌های ۵ متری (گمانهA) در امتداد گسیختگی‌ها در حاشیه دشت و ٦ متری (گمانهB) با فاصله دو کیلومتر از گسیختگی‌ها و نزدیک به مرکز دشت شد (شکل ۲). ارزیابی مقاومت خاک با استفاده از آزمایش SPT دستی انجام شد. نمونه‌گیری‌ها به دو صورت دست‌خورده و دست‌نخورده با نمونه‌گیر جدار نازک به فاصلهٔ هر یک متر از عمق برای انجام آزمایش‌های مختلف انجام شده است.

شکل ۲. نمایی از گمانه‌های A و B

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

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]

۱. آزمایش‌های شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی

پس از اخذ نمونه‌ها انواع مختلفی از آزمایش‌های فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی انجام شد که جزئیات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. جزئیات آزمایش‌های فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی انجام شده

نوع آزمایش	تعداد آزمایش	شماره استاندار آزمایش
درصد رطوبت	۱۱	ASTM-D2216 [10]
دانسیته طبیعی	۱۱	ASTM-D1188 [11]
چگالی ویژه	۱۱	ASTM-D854 [12]
دانه‌بندی	۱۱	ASTM-C117 [13]
حدود آتربرگ	۱۱	ASTM- D4318 [14]
XRD: روی خاک کامل بدون تفکیک رس	۵ آزمایش در عمق‌های ۲ و ٤ متری گمانه A و ۲، ٤، ٦ متری گمانهB	دستگاه Philips Analytical X-Ray B.V. و زاویه تابش [°2Th.] 59.99 -4.01[°2Th.]
XRD: تعیین درصد کانی‌های رسی	۲ آزمایش در عمق‌های ٤ متری هر دو گمانه	
XRF	۲آزمایش در عمق‌های ۲ متری هر دو گمانه	دستگاه S4 EXPLORER / X- Ray Spectrometry – Bruker (WD XRF)
تراکم	۱۱	ASTM-D698 [15]
تک‌محوره	۱۱	ASTM-D2166 [16]

۲. آزمایش‌های تشخیص میزان واگرایی

آزمایش‌های آزمایشگاهی مختلفی معمولاً برای شناسایی خاک‌های واگرا از جمله آزمایش هیدرومتری مضاعف، کرامب، پین‌هول و تجزیه و تحلیل‌های مختلف شیمیایی انجام می‌شود [۱۷]. در بیش‌تر موارد ترکیبی از نتایج به‌دست آمده از روش‌ها برای تعیین واگرایی خاک در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش تجزیه و تحلیل‌های شیمیایی روی ۱۱ نمونه به‌دست آمده از هر گمانه با هدف تعیین میزان سدیم در نمونه‌های خاک انجام شد. با استفاده از این تجزیه‌های شیمیایی، کاتیون‌های قابل تعویض رس‌ها و کاتیون‌های موجود در عصاره اشباع اندازه‌گیری شد. سپس پارامترهای شیمیایی شامل کل املاح محلول (TDS)، نسبت جذب سدیم (SAR)، درصد سدیم (PS)، درصد سدیم قابل تبادل (ESP) و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (CEC) با توجه به این معادله‌ها محاسبه شد:

$$\text{TDS}=Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^{+} + K^{+} \quad (۱)$$

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]

$$SAR = \frac{Na^{+}}{\sqrt{\frac{Ca^{2+}+Mg^{2+}}{2}}} \quad (۲)$$

$$Ps=\frac{Na^{+}}{TDS} \times ۱۰۰ \quad (۳)$$

$$ESP = (SAR*1.95)+1.8 \quad (٤)$$

$$ESP = \frac{Na^{+}}{CEC} \times ۱۰۰ \quad (۵)$$

که در این روابط: Na^{+} غلظت سدیم، Ca^{2+} غلظت کلسیم، Mg^{2+} غلظت منیزیم و K^{+} غلظت پتاسیم برحسب میلی اکی‌والان در لیتر است. چنان‌چه ESP خاکی بزرگ‌تر از ۱۰ باشد خاک واگرا، بین ۷ تا ۱۰ نیمه‌واگرا و کوچک‌تر از ۷ غیرواگرا محسوب می‌شود [۱۸]. هم‌چنین از آزمایش پین هول برای ارزیابی واگرایی نمونه‌ها استفاده شد. این آزمایش یکی از متداول‌ترین آزمایش‌های فیزیکی برای تعیین واگرایی خاک است. شرارد و همکاران [۱۹] این آزمایش را برای شبیه‌سازی عملکرد تخلیه آب از طریق لوله‌ای در خاک معرفی کرده‌اند. در استاندارد [۲۰] ASTM-D4647 روی ۵ نمونه در عمق‌های ۲ و ٤ متری گمانه A و عمق‌های ۲، ٤ و ٦ متری گمانه B انجام گرفت. مطابق این استاندارد هنگامی که آب با جریان افقی تحت بار آبی ۵۰، ۱۸۰ و ۳۸۰ میلی‌متر از مسیر سوراخ ایجاد شده به قطر ۱ میلی‌متر در وسط نمونه جریان می‌یابد، کدورت آب خروجی و اندازه قطر سوراخ در انتهای هر آزمایش ثبت می‌شود.

هنگامی که آب خروجی بسیار کدر (تیره) باشد و اندازه قطر سوراخ داخل نمونه افزایش یابد، نمونه به‌عنوان خاک واگرا در نظر گرفته می‌شود. در صورت مشاهده برعکس، نمونه به‌عنوان خاک غیرواگرا در نظر گرفته می‌شود. طبقه‌بندی خاک‌ها بر اساس نتایج آزمون پین-هول در استاندارد ASTM-D4647 ارائه شده است. آزمایش مناسب دیگر برای شناسایی خاک‌های واگرا، آزمایش هیدرومتری مضاعف است. در این آزمایش سرعت ته‌نشینی ذرات خاک در آب برای بیان واگرایی خاک اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین آزمایش هیدرومتری مضاعف مطابق استاندارد [21] ASTM-D4221 بر روی ۱۱ نمونه از اعماق مختلف هر دو گمانه انجام شد. روال پیشنهادی به‌وسیلهٔ ASTM شامل دو آزمایش موازی است. اولین آزمایش با استفاده از هم‌زن مکانیکی و ماده‌پراکنده‌ساز و سپس در آزمایش دوم بدون استفاده از آنها انجام

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

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]

می‌شود. سرانجام از درصد ذرات به اندازه ۰/۰۰۵ میلی‌متر در هر دو آزمایش برای تعیین درصد واگرایی خاک (PD) مطابق رابطه (٦) استفاده می‌شود.

$$\text{درصد واگرایی (PD)} = \frac{\text{درصد ذرات کوچک‌تر از } 0/005 \text{ میلیمتر در آزمایش دوم}}{\text{درصد ذرات کوچک‌تر از } 0/005 \text{ میلی‌متر در آزمایش اول}} \qquad (٦)$$

بل و واکر [۲۲] مطابق درصد واگرایی به‌دست آمده خاک‌ها را به ٤ رده طبقه‌بندی کردند. چنان‌چه درصد واگرایی بیش از ۵۰ ٪ باشد واگرا، بین ۳۰ ٪ تا ۵۰٪ نسبتاً واگرا، بین ۱۵ ٪ تا ۳۰ ٪ کمی واگرا و کم‌تر از ۱۵ ٪ غیر واگرا طبقه‌بندی کردند. آزمایش کرامب نیز برای تعیین پتانسیل واگرایی بر اساس استاندارد ASTM D6572 [23] انجام شده است. ابتدا تکه کوچکی از خاک (به قطر ٦ تا ۹ میلی‌متر) در داخل ظرفی حاوی ۱۵۰ سانتی‌متر مکعب آب مقطر انداخته می‌شود. نمونه تدریجاً شروع به جذب آب می‌کند. پس از یک ساعت وضعیت نمونه از نظر تمایل ذرات کلوئیدی به جدا شدن از نمونه و شناور شدن در آب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و واکنش ذرات خاک در مقابل آب به یکی از صورت‌های غیرواگرا، نیمه‌واگرا، واگرا و شدیداً واگرا بیان می‌شود.

۳. سیستم طبقه‌بندی

به طورکلی هیچ آزمون واحدی که بتواند به‌طور قابل اعتمادی خاک‌های واگرا را شناسایی کند ایجاد نشده است. بنابراین با استفاده از برآیند یک شماری از آزمایش‌ها و ارزیابی نتایج آن‌ها در یک سیستم طبقه‌بندی، پتانسیل واگرایی خاک تعیین می‌شود. بر این اساس شرارد با استفاده از پارامترهای درصد سدیم (PS) و مقدار کل املاح محلول (TDS) نمودار ارزیابی پتانسیل واگرایی را ارائه کرد [۱۸]. هم‌چنین گربر و هارمز با استفاده از درصد سدیم قابل تبادل (ESP) و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (CEC) نمودار تعیین واگرایی را ارائه کردند. در این نمودار پتانسیل واگرایی به شش رده به شدت واگرا VD، خیلی واگرا HD، واگرا D، واگرایی متوسط MD، غیرواگرا ND و کاملاً غیرواگرا CD تقسیم شده است. علاوه بر این نمودارها جدیدترین سیستم طبقه‌بندی، سیستمی است که به‌وسیلهٔ بل و واکر توصیف شده است. در این سیستم از نتایج آزمایش‌های پین‌هول، کرامب، میزان SAR، ارزیابی نمودارهای PS-TDS و ESP-

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

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]

CEC استفاده شده است. گنجاندن هر دو عامل فیزیکی و شیمیایی در ارزیابی طبقه‌بندی اجازه می‌دهد تا چندین جنبه از واگرایی در نظر گرفته شود.

آزمایش پین‌هول به‌دلیل این‌که تأثیر جریان آب در طول یک شکاف یا ترک را مدل‌سازی می‌کند، نتایج آن بهترین انطباق را با عملکرد فرسایشی خاک‌های رسی در طبیعت دارد. بنابراین در این سیستم طبقه‌بندی برای تعیین پتانسیل واگرایی بیش‌ترین امتیاز ۵ به آزمایش پین‌هول داده می‌شود. نمودار ESP-CEC از معتبرترین روش‌های تعیین واگرایی است. که احتمالاً به این دلیل است که در تعیین پتانسیل واگرایی خاک از ترکیب دو پارامتر اصلی استفاده شده است. بنابراین نمونه‌هایی که در این نمودار در زون بسیار واگرا قرار می‌گیرند امتیاز ٤ داده می‌شود. امتیاز ۳ برای بیش‌ترین واکنش آزمایش کرامب در نظر گرفته شده است. دو روش دیگر ارزیابی (میزان SAR و نمودار PS-TDS) حداکثر امتیاز ۲ اختصاص داده شده است. جزئیات سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی در جدول (۲) ارائه شده است [۲۲].

جدول ۲. سیستم طبقه‌بندی خاک‌های واگرا (بل و واکر) [۲۲]

پین هول	رده	واگرا	واگرایی متوسط	کمی واگرا	غیرواگرا
	امتیاز	۵	۳	۱	۰
ESP-CEC	رده	شدیداً واگرا	واگرا	واگرایی حاشیه‌ای	غیرواگرا
	امتیاز	٤	۳	۱	۰
کرامب	رده	واکنش شدید	واکنش متوسط	واکنش کم	بدون واکنش
	امتیاز	۳	۲	۱	۰
SAR	رده	> ۲	۲–۱/۵		< ۱/۵
	امتیاز	۲	۱		۰
PS-TDS	رده	واگرا	واگرایی متوسط		غیرواگرا
	امتیاز	۲	۱		۰
سیستم طبقه‌بندی کل		شدیداً واگرا	واگرایی متوسط	کمی واگرا	غیرواگرا
		>۱۲	۸–۱۱	۵–۷	< ٤

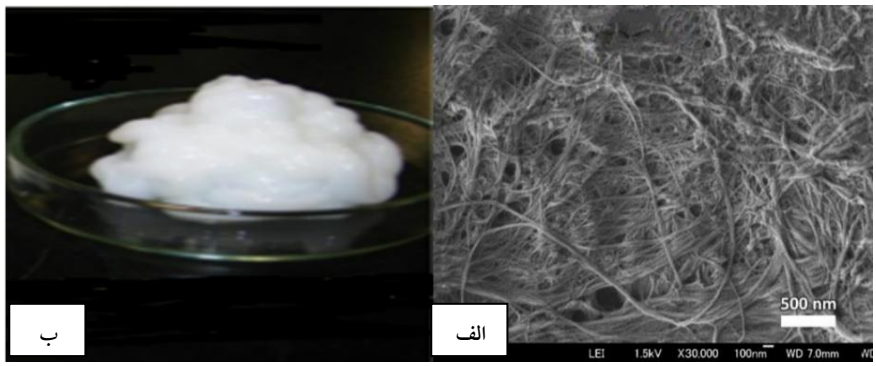
٤. آزمایش‌های اصلاح خاک واگرا

در این پژوهش اثر نانو الیاف سلولزی در تثبیت خاک واگرای جنوب شرق یزد بررسی شده است. الیاف سلولز، مشتق شده از چوب است که از طریق خرد کردن تهیه می‌شود. در نهایت الیافی به‌دست می‌آید که با وجود سبکی، بسیار محکم است. الیاف سلولز آرایه‌ای از

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

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]

بلورهای سوزنی شکل که به شکل فشرده در کنار یک‌دیگر قرارگرفته‌اند، تشکیل می‌شود. بنابراین خواص مکانیکی عالی آن قابل توجیه است. برای این پژوهش دو تصویر و مشخصه از مصالح مورد توجه با کمک استانداردهای آزمایشگاهی مطابق شکل (۳) شناسایی شد و در جدول (۳) منعکس شد. ساختار تنیده و طول زیاد الیاف درحالی‌که ساختار باریک و مستحکمی دارند علاوه بر جلوگیری از تشکیل فضای خالی اضافی امکان پدیدهٔ پل‌شدگی در ذرات خاک را فراهم می‌آورد و وقوع گسیختگی و گسترش ترک جلوگیری می‌کند. شکل الیاف نشان داده شده در تصویر SEM و ساختار الیاف طولی نشان می‌دهد این مواد امکان تشکیل پل‌هایی در ساختار مواد مرکب را دارا هستند که این ساختار و استحکام در الیاف برای جلوگیری از گسترش ترک‌های گسیختگی مؤثر است.



شکل ۳. الف) تصویر SEM نانو سلولز،ب) ژل نانو الیاف سلولز

جدول ۳. مشخصات نانو سلولز استفاده شده

مشخصات	مقدار	شیوه تهیه الیاف
فرمول	)	
نوع ساختار مواد نانو	نانو ژل (۲۵/۵ ٪)	
رنگ	سفید	تولید فیزیکی با خردایش تدریجی محصولات گیاهی در مقیاس نانو
ابعاد الیاف	متوسط ۳۵ میلی‌متر	
خلوص	۹۹ ٪	

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]

تمامی آزمایش‌های اصلاح واگرایی خاک روی عمق‌های ۲، ٤ متری هر دو گمانه و با اضافه نمودن درصدهای مختلف نانو الیاف سلولزی (۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵) و زمان عمل‌آوری ۳ روز مخلوط و ساخته شده است. قابل‌ذکر است برای تهیه ترکیب‌های سلولزی، ابتدا مقدار نانو سلولز مورد نیاز را با آب کاملاً مخلوط کرده و سپس به خاک اضافه شد. به دلیل این‌که نانو سلولز به‌صورت ژل استفاده می‌شود، ازاین‌رو بخشی از آب مورد نیاز از طریق ژل تأمین می‌شود. در این تحقیق آزمایش‌های انجام شده برای شناسایی رفتار خاک اصلاح شده عبارت‌اند از: آزمایش تراکم که مطابق استاندارد ASTM-D:698 انجام شد.

این آزمایش ۳ الی ٦ مرتبه تکرار انجام شد سپس وزن مخصوص مرطوب و رطوبت بهینه آن تعیین و پس از آن وزن مخصوص خشک آن تعیین و نمودار وزن مخصوص خشک خاک در برابر رطوبت رسم شد. هم‌چنین از آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) مطابق استاندارد [٢٤] ASTM D 1883-87 برای بررسی اصلاح واگرایی خاک استفاده شد. آزمایش‌های مناسب دیگری برای بررسی اصلاح واگرایی خاک آزمایش تک‌محوری و دوام است. آزمایش فشاری تک‌محوری، تعیین مقاومت فشاری یک استوانه خاک بدون هیچ بار جانبی است. بنابراین می‌توان از آن برای تعیین مقاومت برشی زهکشی نشده Cu در خاک‌های رسی استفاده کرد. این آزمایش مطابق استاندارد ASTM D: 2166-87 انجام شد. نمونه‌های خاکی استوانه‌ای به‌ترتیب با ارتفاع و قطر تقریبی ۷و۳/۷ سانتی‌متری تهیه شدند و در دستگاه آزمایش قرار گرفتند. قرائت‌های بارگذاری تا ظاهر شدن ترک در نمونه ادامه پیدا کرد. یکی از مسائل مرتبط به استفاده از مواد طبیعی نظیر سلولزها ثبات عملکرد آنها در طی زمان است ازاین‌رو طراحی آزمایشی که پایداری مقاومت را در طول زمان کاربرد و وجود در خاک بررسی کند ضروری به نظر می‌رسد، بنابراین برای اعمال سیکل‌های یخ زدن و آب شدن از آزمایش دوام مطابق استاندارد [۲۵] ASTM D 560-96 استفاده شده است.

نمونه‌های آزمایشی ساخته شده از هر یک از مخلوط‌ها تحت دوره‌های انجماد و ذوب متفاوت شامل ۰، ۱، ۳، ٦ و ۱۰ روزه قرار گرفتند. روش آزمایش بدین‌صورت بود که ابتدا نمونه‌های تک‌محوری درون فریزری در دمای کم‌تر از ۲۳- درجه سلسیوس به‌مدت ۲٤ ساعت برای اعمال یخ‌زدگی قرار داده شدند. پس از این مدت نمونه‌ها از فریزر بیرون آورده

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

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]

شده، در محیط آزمایشگاه به‌مدت ۲٤ ساعت در دمایی حدود ۲۰ درجه سلسیوس قرار داده شدند. این فرایند به‌عنوان یک سیکل یخ زدن- آب شدن در نظر گرفته شد. پس از اعمال هر سیکل نمونه‌ها مورد آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده قرار گرفت. نتایج همهٔ نمونه‌ها در سیکل صفر همان نتایج به‌دست آمده از آزمایش تک‌محوری است.

نتایج و بحث

۱. نتایج آزمایش‌های فیزیکی، شیمیایی و مقاومتی

چنان‌که در بخش مواد و روش‌ها ذکر شد یکسری آزمایش‌های فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی روی نمونه‌های به‌دست آمده انجام شده است و نتایج آنها در جدول‌های ٤، ۵، ٦، ۷، ۸ و شکل‌های ٤، ۵، ٦، ۷ ارائه شده است. در جدول ٤ ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های اخذ شده ارائه شده است. مطابق نتایج به‌دست آمده جدول ٤ در گمانه A تغییرات شاخص خمیری یک روند افزایشی داشته که نشان می‌دهد با افزایش عمق پتانسیل جذب آب بیشتر شده است. نمونه‌های خاک با استفاده از نمودار خمیری [۲٦] و بر اساس حدود آتربرگ طبقه‌بندی شدند. (شکل ٤) با توجه به تغییرات حدود آتربرگ در گمانه A می‌توانیم دو لایه خاک را از هم تفکیک کنیم. به‌طوری‌که با افزایش عمق، نوع خاک از رس با پلاستیسیته کم CL به رس با پلاستیسیته زیاد CH تغییر کرده است.

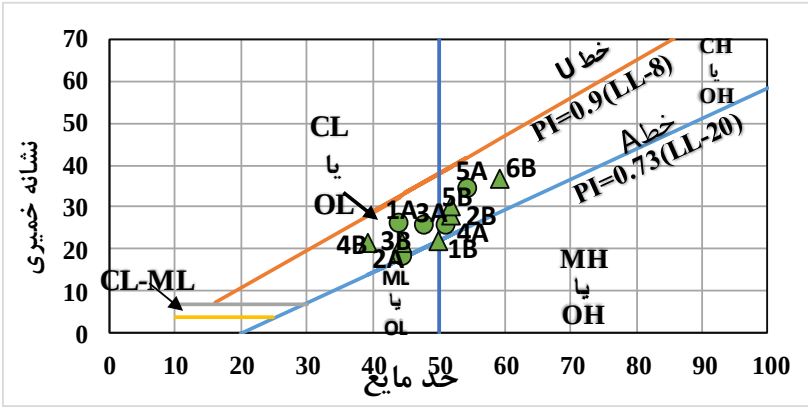
در گمانه A تغییرات شاخص خمیری یک روند افزایشی داشته که نشان می‌دهد با افزایش عمق پتانسیل جذب آب بیش‌تر شده است. عمق‌های ۳ و ٤ متری کم‌تر از اعماق دیگر است و خاک در رده CL رده‌بندی شده است. حدود آتربرگ در گمانه B در هر سه لایه خاک متغیر است، که نشان می‌دهد پتانسیل جذب آب در عمق‌های ۳ و ٤ متری کم‌تر است. ازاین‌رو می‌توان عنوان کرد که در هر دو گمانه خاک رس دارای لایه‌بندی در نتیجه تغییر در حدود آتربرگ است. در گمانه B می‌توانیم سه لایه خاک را از هم تفکیک کنیم، که از CL تا CH متغیر هستند. در این گمانه شاخص خمیری در عمق‌های ۳ و ٤ متری کم‌تر از اعماق دیگر است و خاک در رده CL رده‌بندی شده است. حدود آتربرگ در گمانه B در هر سه لایه خاک متغیر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]

است، که نشان می‌دهد پتانسیل جذب آب در عمق‌های ۳ و ٤ متری کم‌تر است. ازاین‌رو می‌توان عنوان کرد که در هر دو گمانه خاک رس دارای لایه‌بندی در نتیجه تغییر در حدود آتربرگ است.

جدول ٤. مشخصات فیزیکی گمانه A و B

نمونه	عمق (متر)	عدد نفوذ استاندارد N	رطوبت	دانسیته طبیعی (gr/cm³)	چگالی ویژه G_s	نسبت تخلخل	نوع خاک	LL	PL	PI	خاک ریزدانه	رس	سیلت
											٪		
گمانه A	۱	۳۰	۳	۱/٦۰	۲/۸۰	۰/۷۵	CL	٤٤	۲٦/۳۰	۱۷/۷۰	۹٦/۲۸	۱٤	۸۲/۲۸
	۲	٤۵	٤/۱٦	۱/۵۸	۲/۷۲	۰/۷۲	CL	٤٤/۵۰	۲٦/۲۰	۱۸/۳۰	۹۵/۵٦	۱٤	۸۱/۵٦
	۳	۵۹	٤/۵۱	۱/۵۹	۲/۷۲	۰/۷۱	CL	٤۷/۹۰	۲۲	۲۵/۹۰	۹٤/٦٤	۱٤	۸۰/٦٤
	٤	۷۵	۵/۳۰	۱/۵۵	۲/٦۵	۰/۷۱	CH	۵۱	۲۵	۲٦	۹۰/۳۱	۱۱	۷۹/۳۱
	۵	۱۰۳	٦/۲۵	۱/۵۳	۲/٦۵	۰/۷۰	CH	۵٤/۳۰	۱۹/۵۰	۳٤/۸۰	۸۹/۲۰	۱۱	۷۸/۲۰
گمانه B	۱	۸۰	۹/۱۲	۱/٤۹	۲/٦۰	۰/۷٤	CH	۵۰	۲۸	۲۲	۹۸/۲۱	۱۹/۵۰	۷۸/۷۱
	۲	۸۵	۱۰	۱/۵۲	۲/۷۲	۰/۷۸	CH	۵۱/۹۰	۲۳/۸۰	۲۸/۱۰	۹٦/۰۷	۱٦	۸۰/۰۷
	۳	۸۸	۱٤/۹۵	۱/۵٤	۲/٦۰	۰/٦۸	CL	٤٤/٦۰	۲۳/۰۷	۲۱/۵۳	۹۱/۷۳	۱٤	۷۷/۷۳
	٤	۹۵	۱۹/۹	۱/۵۷	۲/۷۲	۰/٤۲	CL	۳۹/۲۰	۱۷/٦٤	۲۱/۵٦	۸۹	۱۲	۷۷
	۵	۹۸	۱۵/٦۲	۱/٦۳	۲/۷۲	۰/٤۰	CH	۵۲	۲۱/۸۰	۳۰/۲۰	۸۷	۱۰	۷۷
	٦	۱۰۲	۱۱/۳۰	۱/۷۰	۲/٦۵	۰/۳۵	CH	۵۹/۱۵	۲۲/۲۲	۳٦/۹۳	۸۵	۱۰	۷۵

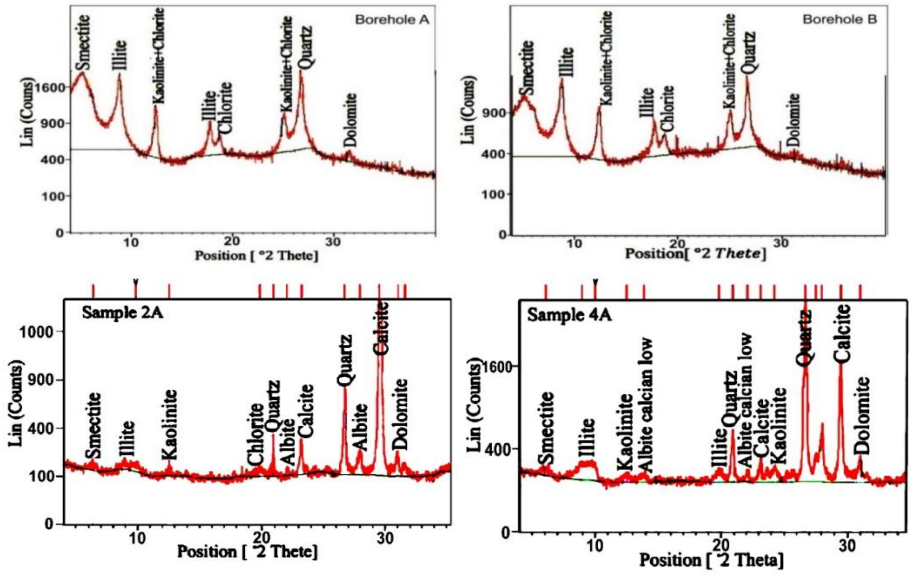


شکل ٤. طبقه‌بندی نمونه‌های خاک بر اساس نمودار خمیری [۲٦]

درصد رطوبت در گمانه A یک روند افزایشی داشته که ناشی از افزایش درصد دانه‌های ریز خاک (رس و سیلت) است، و در گمانه B یک روند کاهشی مشاهده می‌شود که این امر نشان‌دهندهٔ افزایش درصد ماسه است. وزن مخصوص ویژه اکثر کانی‌های خاک در دامنه‌ای

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]

بین ۲/٤ تا ۲/۹ تغییر می‌کند. وزن مخصوص ویژه قسمت جامد ماسه‌های با رنگ روشن که غالباً از کوارتز تشکیل شده‌اند، در حدود ۲/٦٥، کائولینیت ۲/٦، ایلیت ۲/۸ و مونت-موریلونیت در دامنه‌ای بین ۲/۸ تا ۲/٦٥ تخمین زده می‌شود. برای خاک‌های رسی و سیلتی این مقدار بین ۲/٤ تا ۲/۹ تغییر می‌کند [۲۷]. مطابق نتایج به‌دست آمده (جدول ٤) وزن مخصوص ویژه هر دو گمانه در دامنه‌ای بین ۲/٦ تا ۲/۸ متغیر است و این موضوع نشان‌دهندهٔ وجود درصد بالای رس و سیلت در خاک است. مقاومت خاک با توجه به عدد نفوذ استاندارد N به غیر از عمق یک متری گمانه A که در رده خیلی سفت قرار می‌گیرد، در رده سخت طبقه‌بندی می‌شوند. در هر دو گمانه نسبت تخلخل e_0 با افزایش عمق کاهش یافته است و این نشان‌دهندهٔ افزایش تراکم‌پذیری خاک است. با توجه به نمودارهای حاصل از تجزیهٔ XRD (شکل ٥) کانی‌های رسی بخش اصلی تشکیل‌دهندهٔ خاک است و سایر کانی‌های مشاهده شده شامل کوارتز، کانی‌های گروه میکا و کلسیت است. با توجه به آن‌چه‌که در بخش مواد و روش‌ها ذکر شد تجزیهٔ XRD برای تعیین کانی‌های رسی مطابق شکل ٦ و جدول ٥ انجام شد.

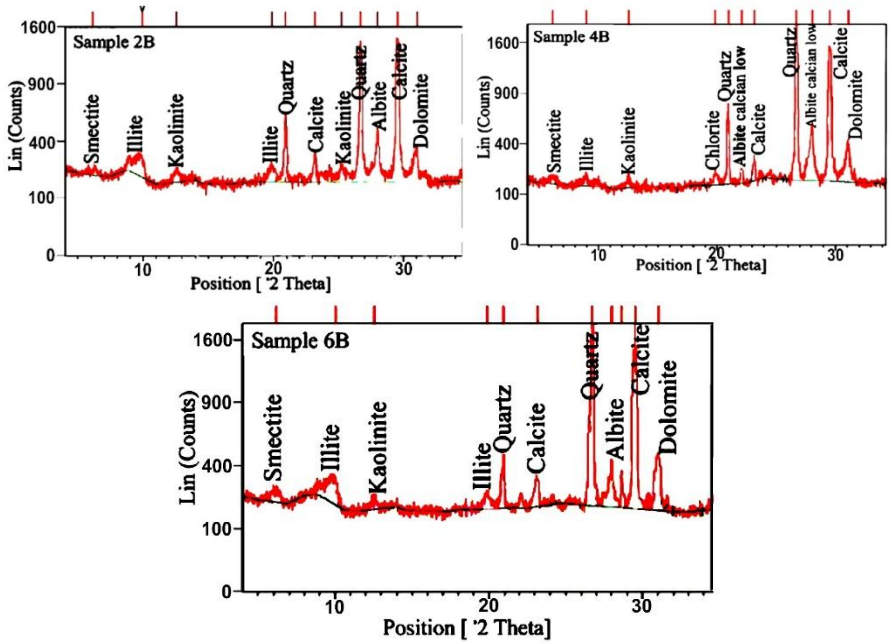


شکل ٥. نمودار XRD نمونه‌های خاک در هر دو گمانه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]

جدول ۵. نتایج به‌دست آمده از آزمایش XRD روی کانی‌های رسی نمونه خاک

نمونه	عمق	اسمکتیت٪	ایلیت٪	کائولینیت+کلریت٪	
A	٤	٤/٤٥	۸۰/۰۸	۱۵/٤۵	
B	٤	۳/۵۷	۸۰/۳۵	۱٦/۰۷	



شکل ٦. نمودار XRD کانی‌های رسی در هر دو گمانه

نتایج نشان داد که کانی اصلی رسی ایلیت و کانی‌های فرعی کائولینیت، کلریت و اسمکتیت است. در این بین وجود رس‌های اسمکتیت در خاک‌های ناپایدار منطقه اهمیت ویژه‌ای دارد. به‌علاوه، سایر نتایج به‌دست آمده از تفسیر این نمودارها، افزایش ۲/۸ و ۲/۹ برابری نسبت شدت پیک اول ایلیت به پیک دوم به‌ترتیب در گمانهٔ A و B را نشان داد. این امر نشان‌دهندهٔ برتری کانی ایلیت بیوتیتی به ایلیت مسکویتی در خاک‌های منطقه است. خصوصیت تخریب‌پذیری شدیدتر بیوتیت نسبت به مسکوویتی باعث آزادسازی بیش‌تری از عناصر منیزیم و آهن در خاک‌های دربردارندهٔ این کانی شده است. نتایج حاصل از تجزیهٔ

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]

XRF (جدول ٦) نشان می‌دهد که، در عمق ۲ متری گمانه A درصد Na_2O در مقایسه با گمانه B کم‌تر ولی درصد اکسید CaO کمی بیش‌تر است. بنابراین می‌توان انتظار داشت که پتانسیل واگرایی خاک گمانه A کم‌تر از گمانه B باشد. هم‌چنین با توجه به این‌که مجموع درصد SiO_2 و CaO در گمانه A بیش‌تر است انتظار می‌رود مقاومت خاک گمانه A بیش‌تر از خاک گمانه B باشد.

جدول ٦. نتایج آزمایش XRF

نمونه	عمق (متر)	٪					
		Na_2O	K_2O	SiO_2	MgO	CaO	Al_2O_3
گمانه A	۲	۰/٦٧	۱/٤٥	۲٥/۹	٦/۰٤	۱۳/۳	٦/۷۲
گمانه B	۲	۱/۲	۲/۲٦	۲۲	۸/۲۹	۱۳/۲	۱۱/۲

بر اساس نتایج آزمایش تراکم (جدول ۷)، با افزایش عمق درصد رطوبت بهینه کاهش و وزن مخصوص خشک حداکثر افزایش می‌یابد. خاک‌های خوب دانه‌بندی شده دارای بیش‌ترین وزن مخصوص خشک بیشینه و کم‌ترین میزان رطوبت بهینه هستند. از طرف دیگر خاک‌های ماسه نرم یکنواخت، لای‌ها و خاک‌های دارای رس زیاد، کم‌ترین مقدار وزن مخصوص خشک بیشینه و بیش‌ترین میزان رطوبت بهینه را دارند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش عمق به‌دلیل این‌که میزان رس کاهش یافته و ماسه افزایش می‌یابد و هم‌چنین میزان تخلخل کاهش‌یافته در نتیجه دانه‌بندی خوب و تراکم بیش‌تر می‌شود.

جدول ۷. نتایج به‌دست آمده از آزمایش تراکم

نمونه	عمق	وزن مخصوص مرطوب $\gamma_t(\mathrm{gr}/cm^3)$	وزن مخصوص خشک $\gamma_d(\mathrm{gr}/cm^3)$	درصد رطوبت بهینه
گمانه A	۱	۲/۱٥۷	۱/۷۰٥	۲٦
	۲	۲/۱٥۸	۱/۷۱۰	۲٦/۲۰
	۳	۲/۱۳٥	۱/۷٥٦	۲۱/۹۰
	٤	۲/۲۲٤	۱/۹۱۷	۱٦/۱۰
	٥	۲/۳۰٤	۱/۹٤۱	۱٥/۷۰
گمانه B	۱	۲/۰۸٤	۱/٦٥	۲۷
	۲	۲/۱۱۳	۱/۷۳	۲۲
	۳	۲/۲۰٦	۱/۸۷٥	۱۷/۹۰
	٤	۲/۲٤٥	۱/۹۱۸	۱۷
	٥	۲/۲٤۰	۱/۹۲۰	۱٦/۷۰
	٦	۲/۲٦٤	۱/۹۲۹	۱٦/٥۰

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]

نتایج آزمایش تک‌محوره (جدول ۸ و شکل ۷) نشان داد که در عمق‌های ۱، ۲، ۳ متری گمانه A، مدول الاستیسیته مماسی، مقاومت فشاری محدود نشده و مقاومت برشی زهکشی نشده مقادیر بیش‌تری در مقایسه با سایر نمونه‌ها دارند و بر این مبنا در رده خیلی سفت قرار می‌گیرد. دلیل این موضوع میزان درصد بالای آهک است.

۲. نتایج آزمایش‌های تشخیص واگرایی خاک

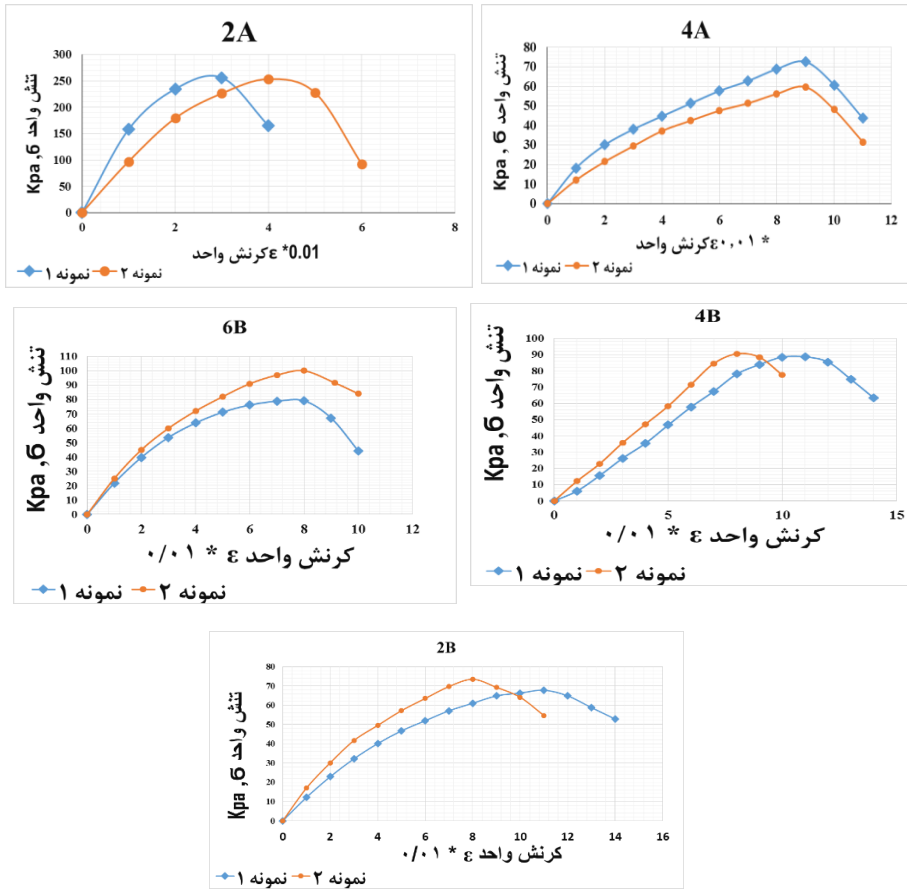
مطابق آنچه در بخش مواد و روش‌ها ذکر شد آزمایش‌های تشخیص واگرایی خاک انجام شدند و نتایج آن‌ها در جدول‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است. نتایج آزمایش‌های شیمیایی در جدول ۹ ارائه شده است. بر اساس مقادیر ESP ارائه شده در جدول ۹، همه نمونه‌ها در رده واگرا قرار می‌گیرند. نتایج مربوط به آزمایش پین‌هول در جدول ۱۰ ارائه شده است. نتایج بررسی‌ها با استفاده از آزمایش پین‌هول نشان می‌دهد که در گمانه A تمامی نمونه‌ها در رده ND_3 (کمی‌واگرا) و در گمانه B نمونه‌های مربوط به عمق کم‌تر از ٤ متر در رده ND_4 (کمی تا نسبتاً واگرا) و نمونه‌های عمق ٦ متری در رده ND_1 (غیر واگرا) قرار دارند. نتایج آزمایش هیدرومتری مضاعف در جدول ۱۱ نشان داد که در گمانه A تمامی نمونه‌ها در رده نسبتاً واگرا قرار می‌گیرند.

جدول ۸. نتایج حاصل از آزمایش تک‌محوره

نتایج نهایی آزمایش تک‌محوره					
نمونه	عمق	E_s (MPa)	C_u (KPa)	q_u (KPa)	سفتی
گمانه A	۱	۱۲	۱۲۸/۵	۲۵۷	خیلی سفت
	۲	۱۱/٦٦۷	۱۲۷/۵	۲۵۵	خیلی سفت
	۳	۸/۳	۹۹	۱۹۸	خیلی سفت
	٤	۱/٤٦۷	۳۳/۲۵	٦٦/۵	متوسط
	۵	۱/۲۷٦	۲۲/۲۵	٤٤/۵	متوسط
گمانه B	۱	۱/۷۲٤	۳۵/۰۷۵	۷۰/۱۵	متوسط
	۲	۱/٦۳۵	۳۵/۲۵	۷۰/۵	متوسط
	۳	۱/٤۳۰	۳۸/۷۵	۷۷/۵	متوسط
	٤	۱/۱۸۳	٤٤/۷۵	۸۹/۵	متوسط
	۵	۱/۲۹۹	٤٤/۸۵	۸۹/۷	متوسط
	٦	۱/۹۷۱	٤۵	۹۰	متوسط

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

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]



شکل ۷. نمودار تنش-کرنش حاصل از آزمایش تک‌محوره برای نمونه‌های هر دو گمانه

هم‌چنین در گمانه B به‌جز اعماق ۵ و ٦ متری که نمونه‌ها در رده کمی واگرا و غیرواگرا هستند، مابقی نمونه‌ها نسبتاً واگرا هستند. نتایج آزمایش کرامب در جدول ۱۱ نشان داد در گمانه A تمامی نمونه‌ها در رده واگرا و در گمانه B از سطح به عمق نمونه‌ها به‌شدت واگرا تا نیمه واگرا هستند.

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

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]

جدول ۹. نتایج آزمایش شیمیایی انجام گرفته بر روی نمونه‌ها

نمونه	عمق	N	M	C	K	ESP	TDS	SAR	PS	CEC	تعیین پتانسیل واگرایی باتوجه به پارامتر ESP خاک
		Meq/L									
گمانه A	۱	۴۰/۲۰	۴	۵	۳/۹۵	۳۸/۷۵	۵۳/۱۵	۱۸/۹۵	۷۵/۶۳	۱۰۳/۷۴	واگرا
	۲	۳۶	۴/۶	۶	۳/۲۹	۳۲/۲۷	۴۹/۸۹	۱۵/۶۳	۷۲/۱۵	۱۱۱/۵۵	واگرا
	۳	۳۵/۱	۴/۸	۶/۴	۳	۳۰/۷۵	۴۹/۳	۱۴/۸۵	۷۱/۱۹	۱۱۴/۱۴	واگرا
	۴	۲۹/۵	۷	۸	۲/۷۹	۲۲/۸۰	۴۷/۲۹	۱۰/۷۷	۶۲/۳۷	۱۲۹/۳۸	واگرا
	۵	۲۲/۳	۸/۸	۹/۵	۲/۵	۱۶/۰۳	۴۳/۱	۷/۳	۵۱/۷۴۰	۱۳۹/۱۱	واگرا
گمانه B	۱	۵۲/۸۵	۱۳/۵	۱۵/۲	۴/۷	۲۹	۸۶/۲۵	۱۳/۹۵	۶۱/۱۳	۱۸۲/۲۴	واگرا
	۲	۵۱/۲	۱۳	۱۵	۴/۴۳۰	۲۸/۴۸	۸۳/۶۳	۱۳/۶۸	۶۱/۲۲	۱۷۹/۷۷	واگرا
	۳	۲۴/۷	۵/۵	۷	۴/۱۵	۲۱/۱۰	۴۱/۳۵	۹/۹	۵۹/۷۳	۱۱۷	واگرا
	۴	۲۰/۲	۳/۹	۶/۸	۳/۹۶	۱۸/۸۲	۳۴/۸۶۴	۸/۷۳۳	۵۷/۹۳	۱۰۷/۳۳	واگرا
	۵	۱۷/۷۵	۳/۵	۶/۳	۳/۱۵	۱۷/۴	۳۰/۷	۸	۵۷/۸۱	۱۰۲	واگرا
	۶	۱۶/۲	۲/۹	۶/۱	۲/۶	۱۶/۶۲	۲۸/۲	۷/۶	۵۷/۴۴	۹۷/۴۷	واگرا

جدول ۱۰. نتایج حاصل از آزمایش پین هول

نمونه	عمق (متر)	(gr/cm^3)	هد (میلی‌متر)	مدت آزمایش به ازای هد مشخص (دقیقه)	نرخ نهایی جریان (میلی‌متر بر ثانیه)	تیرگی آب در انتهای آزمایش		قطر سوراخ در انتهای آزمایش (میلی‌متر)	رده‌بندی واگرایی
						از کنار	از بالا		
گمانه A	۲	۱/۲۴۶	۵۰	۱۰	۱/۴	کمی کدر	کمی کدر	≥۱/۵	ND_3
			۱۸۰	۵	۱/۸	کمی تیره تا تیره	کمی تیره تا تیره	≥۱/۵	ND_3
	۴	۱/۵۱۳	۵۰	۱۰	۱/۵	کمی کدر	کمی کدر	≥۱/۵	ND_3
			۱۸۰	۵	۱/۷	کمی تیره تا تیره	کمی تیره تا تیره	≥۱/۵	ND_3
گمانهB	۲	۱/۳۲۱	۵۰	۱۰	۰/۸۵	کمی کدر	کمی کدر	۱/۵	N
			۱۸۰	۵	۰/۹	کمی تیره تا تیره	کمی تیره تا تیره	۱/۵	N
	۴	۱/۵۵	۵۰	۱۰	۰/۸	کمی کدر	کمی کدر	۱/۵	N
			۱۸۰	۵	۰/۹۵	کمی تیره تا تیره	کمی تیره تا تیره	۱/۵	N
	۶	۱/۶۰۳	۵۰	۱۰	۲/۱	شفاف	کمی سفیدرنگ	۱	N
			۱۸۰	۵	۲/۶	شفاف	شفاف	۱	N

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

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]

جدول ۱۱. درصد واگرایی محاسبه شده با استفاده از آزمایش هیدرومتری مضاعف [۲۲] و نتایج آزمایش کرامب

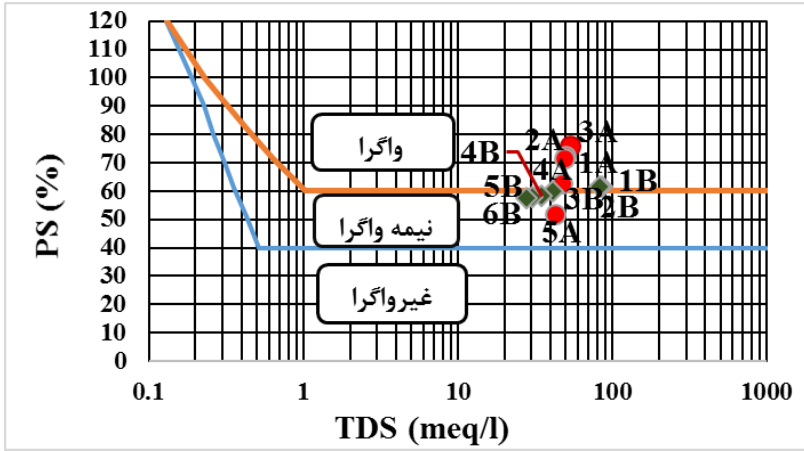
نمونه	عمق (متر)	درصد واگرایی	رده‌بندی	آزمایش کرامب
گمانهA	۱	٤٠	واگرایی متوسط	واگرا
	۲	٤٥/٤٥	واگرایی متوسط	واگرا
	۳	٤٠	واگرایی متوسط	واگرا
	٤	٤٦/٦٦	واگرایی متوسط	واگرا
	٥	٤٣/٧٥	واگرایی متوسط	واگرا
گمانه B	۱	۳۹/۲۸	واگرایی متوسط	به شدت واگرا
	۲	٤۳/۳۳	واگرایی متوسط	به شدت واگرا
	۳	٤٥	واگرایی متوسط	واگرا
	٤	۳۳/۳۳	واگرایی متوسط	واگرا
	٥	۲٥/٦	کمی واگرا	نیمه واگرا
	٦	۱۱/٧٦	غیر واگرا	نیمه واگرا

نتایج سیستم طبقه‌بندی

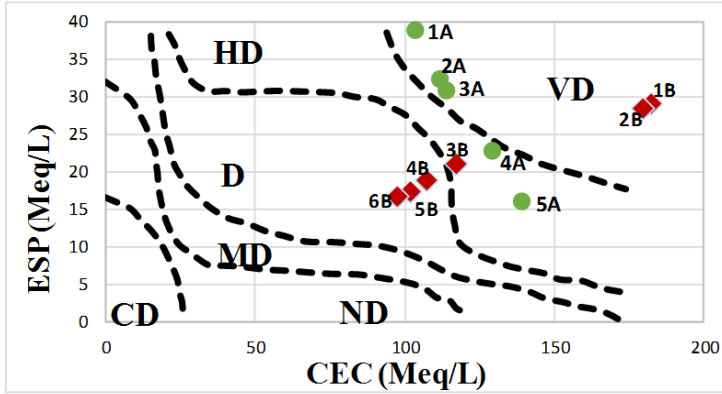
مطابق آن‌چه‌که در بخش مواد و روش‌ها ذکر شد یک‌سری سیستم‌های طبقه‌بندی برای تعیین پتانسیل واگرایی با استفاده از نتایج آزمایش‌های حاصل از ۱۱ نمونه استفاده شده است. نتایج آن‌ها در شکل‌های ۸ و ۹ و جدول ۱۲ ارائه شده است. بر اساس داده‌های موجود در جدول ۹، موقعیت نمونه‌ها روی گراف ارائه شده به‌وسیلهٔ شرارد و گربر و هارمز (شکل‌های ۸ و ۹) مشخص شد. نتایج نشان داد که در گراف شرارد هفت نمونه در منطقه واگرا و چهار نمونه در منطقهٔ نیمه‌واگرا قرار دارند و این در جای است که هیچ‌کدام از نمونه‌ها در منطقه غیرواگرا قرار نگرفتند. نتایج گراف گربر و هارمز نیز نشان داد پنج نمونه در منطقه به‌شدت واگرا، سه نمونه در منطقه خیلی‌واگرا و سه نمونه در منطقه واگرا قرار گرفته‌اند.

نتایج سیستم طبقه‌بندی بل و واکر در جدول ۱۲ ارائه شده است. نتایج نشان داد در گمانه A واگرایی متوسط و در گمانه B واگرایی شدید تا کمی واگرا است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت هر چه به‌سمت مرکز دشت نزدیک‌تر شویم واگرایی شدیدتر می‌شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]



شکل ۸. نتایج آزمایش‌های شیمیایی روی نمودار معیار شیمیایی شرداد



شکل ۹. نتایج آزمایش‌های شیمیایی روی نمودار معیار شیمیایی گربر و هارمز

جدول ۱۲. نمونه‌های طبقه‌بندی شده بر اساس سیستم طبقه‌بندی بل و واکر [۲۲]

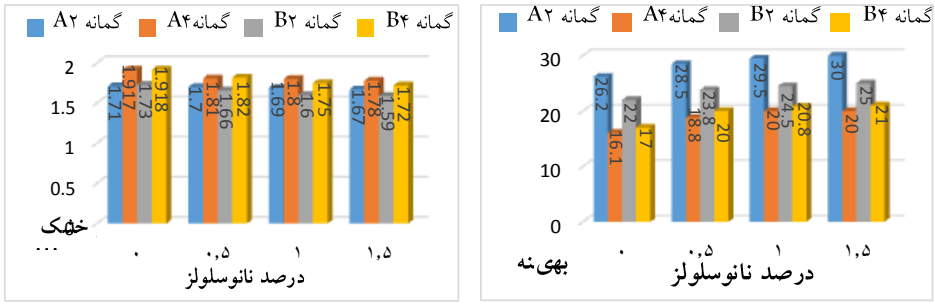
نمونه	عمق (متر)	معیارهای طبقه‌بندی					جمع امتیازات	رده
		پین هول	کرامب	ESP-CEC	SAR	PS-TDS		
گمانه A	۲	۱	۲	٤	۲	۲	۱۱	واگرایی متوسط
	٤	۱	۲	٤	۲	۲	۱۱	واگرایی متوسط
گمانه B	۲	۳	۳	٤	۲	۲	۱٤	شدیداً واگرا
	٤	۳	۲	۳	۲	۱	۱۱	واگرایی متوسط
	٦	۰	۱	۳	۲	۱	۷	کمی واگرا

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

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]

٤. نتایج آزمایش‌های اصلاح واگرایی خاک

با توجه به آن‌چه‌که در بخش مواد و روش‌ها ذکر شد آزمایش‌های اصلاح واگرایی خاک انجام شده و نتایج آن‌ها در شکل‌های ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳ ارائه شده است. نتایج آزمایش تراکم برای نمونه‌های ترکیب شده با درصدهای مختلف نانو الیاف سلولزی به‌صورت گراف شکل (۱۰) ارائه شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، نمونه‌های ترکیب شده با نانو الیاف سلولزی منجر به تغییراتی در رطوبت بهینه و مقدار وزن مخصوص خشک بیشینه می‌شود و با افزودن مقدار نانو الیاف سلولزی، رطوبت بهینه افزایش و وزن مخصوص خشک بیشینه کاهش می‌یابد. هنگامی که نانو الیاف سلولزی به خاک افزوده می‌شود، واکنش آنی تبادل کاتیونی رخ می‌دهد و ذرات خاک رس با یکدیگر لخته می‌شوند. این فرایند منجر به تشکیل حفره‌های هوا در میان ذرات شده و سبب ایجاد یک محیط متخلخل با کم‌ترین وزن واحد حجم خشک بیشینه می‌شود. علاوه بر این، به‌دلیل سطح ویژه الیاف که تمایل به جذب آب بیش‌تری دارند و هم‌چنین آب بیش‌تری نیز برای پر کردن حفرات لازم است، به‌صورتی که رطوبت بهینه افزایش می‌یابد.

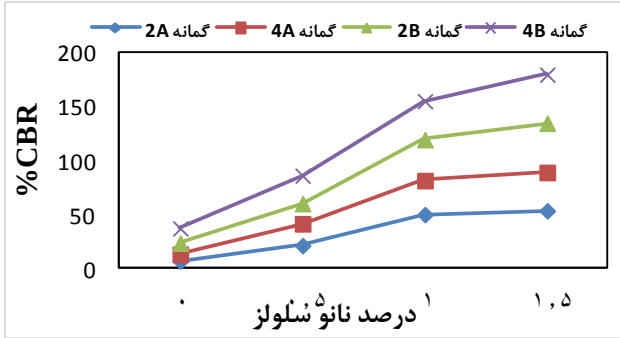


شکل ۱۰. تغییرات وزن مخصوص خشک بیشینه و درصد رطوبت بهینه برای درصدهای مختلف ترکیبی با نانو سلولز، از هر دو عمق و هر دو گمانه انتخابی

نتایج آزمایش CBR برای نمونه‌های ترکیب شده با درصدهای مختلف نانو الیاف سلولزی به‌صورت گراف شکل ۱۱ ارائه شده است. نتایج نشان داد که افزودن نانو سلولز سبب افزایش مقاومت خاک شده است، که در ۱/۵ درصد نانو سلولز بیش‌ترین مقاومت را نشان داده است. علت افزایش این مقاومت را می‌توان به ویژگی‌های نانو سلولز الیافی نسبت داد. به‌دلیل ساختار تنیده و طول زیاد الیاف علاوه بر جلوگیری از ایجاد فضای خالی، باعث

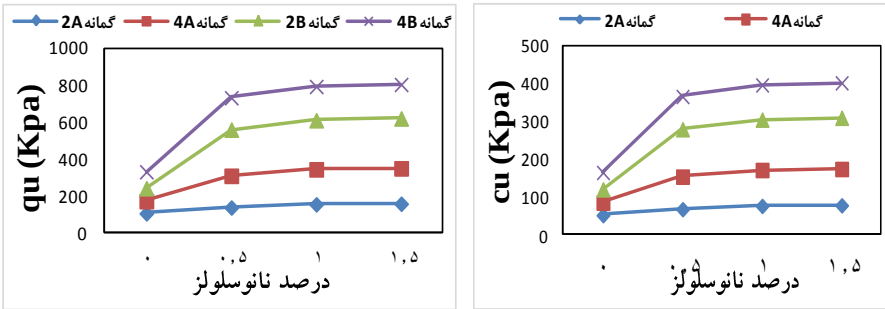
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]

بسته شدن منافذ خاک و متراکم‌تر شدن خاک می‌شود. نهایتاً باعث افزایش مقاومت نمونه‌های تثبیت شده و کاهش پتانسیل واگرایی خاک می‌شود.



شکل ۱۱. مقایسه ظرفیت باربری نمونه‌های شاهد و ترکیبی با نانو سلولز از هر دو گمانه و هر دو عمق انتخابی

شکل ۱۲ نتایج حاصل از آزمایش مقاومت تک‌محوری نمونه‌های ترکیب شده با نانو الیاف سلولزی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری محدود نشده و مقاومت برشی زهکشی نشده نسبت به نمونهٔ شاهد (نمونه فاقد نانو الیاف سلولزی) افزایش یافته‌اند. علت افزایش این دو پارامتر را می‌توان به‌دلیل افزودن نانو سلولز به خاک چسبندگی و پیوند بین ذرات افزایش و کاهش خلل و فرج خاک، فعل و انفعالات شیمیایی و رفتار الیاف و ایجاد پدیده پل شدگی منسوب دانست، الیاف سلولزی در مقیاس میکروساختاری مانع از گسیختگی ذرات و اجزاء خاک می‌شوند.



شکل ۱۲. مقایسه مقاومت فشاری محدود نشده و مقاومت برشی زهکشی نشده نمونه‌های شاهد و ترکیبی با نانو سلولز از هر دو گمانه و هر دو عمق انتخابی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]

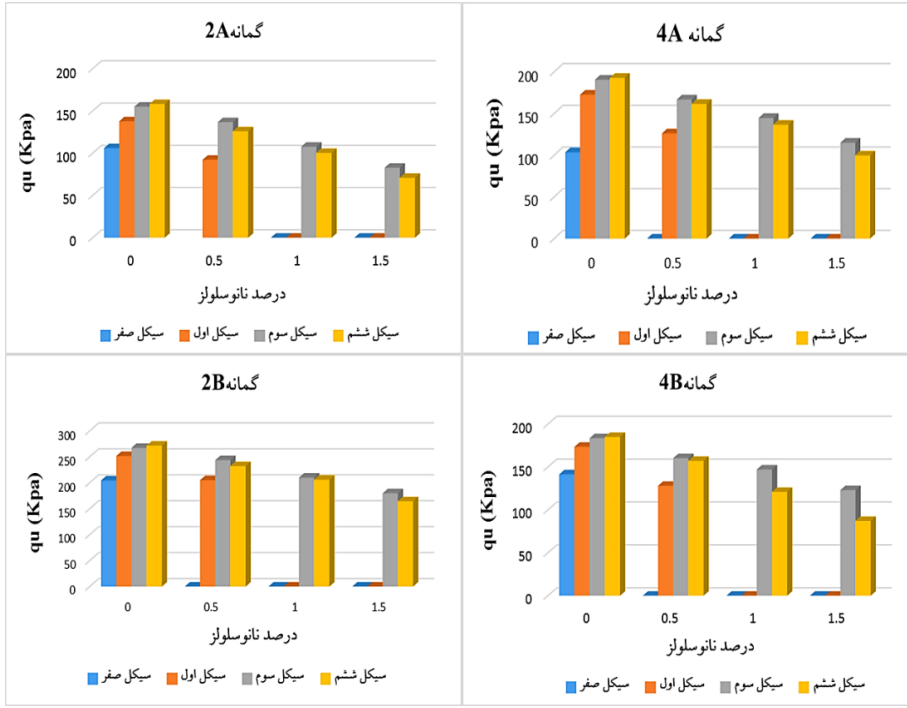
با توجه به نمودارهای به‌دست آمده از آزمایش دوام خاک اصلاح شده (شکل۱۳)، نمونه‌های شاهد در سیکل اول انجماد–ذوب و نمونه‌های ترکیبی با ۰/۵درصد سلولز در سیکل سوم و هم‌چنین نمونه‌های ترکیبی با ۱و۱/۵ درصد نانو سلولز نیز در سیکل ۱۰ دوام نیاوردند و مقاومت خود را از دست دادند. با توجه به نمودارهای به‌دست آمده از آزمایش، نشان می‌دهد که افزودن نانو سلولز سبب مقاومت بیش‌تر نمونه‌های خاکی نسبت به نمونه‌های شاهد در برابر سیکل‌های انجامد– ذوب می‌شود. ولی با افزایش دوره‌های انجماد–ذوب این مقاومت رفته رفته کاهش پیدا می‌کند. به‌طور نمونه در سیکل اول مقاومت تمامی نمونه‌ها کاهش یافته که این کاهش مقاومت در نمونه‌های ترکیبی با ۰/۵ درصد نانو سلولز بیش‌تر از سایر نمونه‌ها است. علت کاهش مقاومت را به این صورت می‌توان بیان کرد که قبل از فرایند انجماد ذرات خاک به‌صورت کاملاً فشرده در کنار هم قرار گرفته و مقاومت زیادی دارند، در طول فرایند انجماد و توسعه لنزهای یخی، ذرات خاک در اثر تشکیل یخ، از هم جدا شده و به‌دنبال آن با ذوب شدن یخ‌ها، ناحیه ضعیف برشی در طول لنزهای یخی ایجاد می‌شود. بنابراین با افزایش نسبت تخلخل نمونه‌ها، مقاومت خاک هم کاهش یافته و هم‌چنین ناپیوستگی و جدا شدن ذرات خاک اتفاق می‌افتد و ساختار خاک به‌هم می‌ریزد. ولی درمجموع می‌توان نتیجه گرفت که با افزودن نانو سلولز به خاک مقاومت خاک در برابر سیکل انجماد–ذوب بیش‌تر می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش ارتباط بین پتانسیل واگرایی خاک‌های رسی ناحیهٔ جنوب شرق یزد با ویژگی‌های مقاومتی آنها و هم‌چنین اصلاح واگرایی خاک این منطقه بررسی شد. برای این منظور آزمایش‌های کانی‌شناسی و شیمی خاک به‌دلیل تعیین ترکیب خاک انجام پذیرفت. هم‌چنین خصوصیات فیزیکی و مقاومتی نمونه‌ها نیز بررسی شدند. نتایج به‌دست آمده عبارت‌اند از:

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

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]



شکل ۱۳. مقایسه مقاومت فشاری محدود نشده سیکل‌های انجماد-ذوب نمونه‌های شاهد و ترکیبی با نانو سلولز از هر دو گمانه و هر دو عمق انتخابی

۱. نمونه‌ها بر اساس رده‌بندی متحد در گروه CL تا CH و در رده رس‌ماسه‌ای سیلتی قرار می‌گیرند. نتایج آزمایش XRF نشان داد که در عمق ۲ متری گمانه A درصد Na_2Oدر مقایسه با گمانه B کم‌تر ولی درصد اکسید CaO کمی بیش‌تر است. بنابراین می‌توان انتظار داشت که پتانسیل واگرایی خاک گمانه A کم‌تر از گمانه B باشد. با توجه به نمودارهای XRD مهم‌ترین کانی‌های مشاهده‌شده شامل کوارتز، کانی‌های گروه میکا، کلسیت و کانی گروه اسمکتیت هستند. بر این اساس کانی ایلیت با ۸۰ درصد محتوی به‌عنوان کانی اصلی شناسایی شد و کانی‌های فرعی نیز شامل فرعی کائولینیت، کلریت، اسمکتیت،کوارتز و دلومیت هستند.

۲. به‌طورکلی با افزایش عمق، میزان رس کم‌تر، ماسه بیش‌تر، دانه‌بندی بهتر و تراکم بیش‌تر می‌شود که می‌توان نتیجه گرفت با توجه به آن‌که در تراکم‌پذیری کم، خاک‌های واگرا در مقابل جریان آب مقاومتی را از خود نشان نداده و به‌راحتی فرسایش پیدا

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]

می‌کنند. واگرایی این منطقه سطحی است و با افزایش عمق و تراکم‌پذیری، واگرایی کاهش می‌یابد.

۳. نتایج آزمایش تک‌محوره نشان داد که در عمق‌های ۱، ۲ و ۳ متری گمانه A ، مدول الاستیسیته مماسی، مقاومت فشاری محدود نشده و مقاومت برشی زهکشی نشده در مقایسه با سایر نمونه‌ها بالاتر بوده و در ردG خیلی سفت قرار می‌گیرد.

٤. آزمایش‌های ارزیابی پتانسیل واگرایی و سیستم طبقه‌بندی واگرایی نشان می‌دهد در گمانه A واگرایی متوسط و در گمانه B واگرایی شدید تا کمی واگرا خاک‌های جنوب شرق یزد است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت هر چه به‌سمت مرکز دشت نزدیک‌تر شویم واگرایی شدیدتر می‌شود. نشست و گسیختگی‌هایی که در بازدید صحرایی مشاهده شده است، در اثر واکنش‌های فیزیکی-شیمیایی سطحی خاک با املاح، آنیون‌ها، کاتیون‌ها و کانی‌های موجود در خاک ایجاد شده‌اند.

٥. زیاد بودن مقاومت فشاری در عمق‌های ۱، ۲، ۳ متری گمانه A به‌دلیل برداشت نمونه از لایه آهکی، و وجود آهک، سیلیس است، ولی در نهایت به‌دلیل کاهش سدیم و افزایش کلسیم و منیزیم واگرایی را نسبت به عمق‌های دیگر یک‌سان نشان می‌دهد.

٦. افزودن نانو الیاف سلولزی به خاک بررسی شده با توجه به نتایج آزمایش باربری کالیفرنیا(CBR)، و رسم نمودارها نتیجه می‌شود که افزودن درصدهای مختلف نانو سلولز موجب افزایش مقاومت خاک و درنتیجه بهبود سطح کیفی ساختار خاک می‌شود. در آزمایش تک‌محوری کرنش در لحظه گسیختگی به‌علت کاهش نسبت منافذ نمونه، تغییر بافت خاک‌ها و پیوند بهتر بین ذرات خاک بیش‌تر شده است. هم‌چنین مشاهده می‌شود با افزودن نانو سلولز به خاک به دلیل چسبندگی و پیوند بین ذرات و کاهش خلل و فرج خاک و فعل و انفعالات شیمیایی، مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌ها افزایش می‌یابد. نتایج به‌دست آمده از آزمایش دوام بیان‌گر این است که افزودن نانو سلولز سبب مقاومت بیش‌تر نمونه‌های ترکیبی نسبت به نمونه‌های شاهد در برابر سیکل‌های انجماد- ذوب می‌شود. ولی با افزایش دوره‌های انجماد-ذوب این مقاومت رفته رفته کاهش پیدا می‌کند. در طول چرخه‌های انجماد- ذوب چون در ساختار خاک فروپاشیدگی ذرات رخ می‌دهد و تخلخل نمونه‌ها بیش‌تر می‌شود درنتیجه مقاومت نمونه‌ها کم شده و گسیخته می‌شوند.

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

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]

منابع

۱. حداد ع.، جاودانیان ح.، ابراهیم پور ف.، "شناسایی و تثبیت خاک‌های واگرا: مطالعه موردی کانال انتقال آب سیمین دشت-گرمسار"، زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه خوارزمی ۱۱، ۱ (۲۰۱۷) ۲۹-۵۰.

2. Singh B., Gahlot P. K., Purohit D. G. M., "Dispersive Soils Characterization, Problems and Remedies", International Research Journal of Engineering and Technology, 5 (6) (2018) 2478–2484.

3. Maharaj A., "The Evaulation of test protocols for dispersive soil identification in Southern Africa", PhD Thesis, University of Pretoria, (2013).

4. Abbaslou H., Hadifard H., Poorgohardi A., "Characterization of dispersive problematic soils and engineering improvement: A review", Computations and Materials in Civil Engineering, 1(2) (2016) 65-83,.

۵. عساکره ع.، آوازه ا.،"بررسی تأثیر نانو رس بر رفتار خاک‌های واگرا (مطالعه موردی: شهرستان میناب در استان هرمزگان)"، (۱۳۹۶) ۵۰۳-۵۱۲.

۶. زمردیان م.ع.، سلیمانی آ.، "تأثیر ماده افزودنی نانوسیلیس بر فرسایش‌پذیری خاک"، مجله علوم آب و خاک، ۲۱ (۱) (۱۳۹۶) ۲۱۷ - ۲۲۷.

7. Abbasi N., Farjad A., Sepehri S., "The use of nanoclay particles for stabilization of dispersive clayey soils", Geotechnical and Geological Engineering 36.1 (2018) 327-335.

8. Gidday B. G., Satyendra M., "Improving the characteristics of dispersive subgrade soils using lime" Heliyon 6.2 (2020) e03384.

۹. مهرشاهی د.، مهرنهاد ح.، "بررسی ساختار مورفوتکتونیک دشت یزد-اردکان"، گزارش نهایی طرح پژوهشی، دانشگاه یزد (۱۳۷۸).

10. ASTM, "Test method for laboratory determination of water content of soil and rock by mass", Designation: D2216-98 (1998).

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

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]

11. ASTM, "Standard test method for bulk specific gravity and density of compacted bituminous mixtures using paraffin-coated speciments", Designation: D1188-96 (2002).
12. ASTM, "Test method for specific gravity of soil solid by water pycnometer", Designation: D854, (1998).
13. ASTM, "Standard test method for materials finer than 75-µm (NO.200) sieve in mineral aggregates by washing", Designation: C117-13 (2013).
14. ASTM, "Standard test methods for liquid limit, plastic Limit, and plasticity index of soils", Designation: D4318 (1998).
15. ASTM, "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12 400 ft-lbf/ft3 (600 kN-m/m3))", Designation: D698-07 (2007).
16. ASTM, "Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil", Designation: D2166 (2000).
17. Maharaj A., Paige-Green P., "The Pinhole Test for Dispersive Soil Identification", Engineering Geology for Society and Territory, 5 (2015) 1299-1303.
۱۸. رحیمی ح.، عباسی ن.، "مهندسی ژئوتکنیک: خاک‌های مشکل‌آفرین"، چاپ اول، مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران (۱۳۹٤).
19. Sherard J. L., Steele E. F., Decker R. S., Dunnigan L. P., "Pinhole test for identifying dispersive soils", Journal of the Geotechnical Engineering Division, 102 (1) (1976) 69-85.
20. ASTM, "Standard test method for identification and classification of dispersive clay soils by the pinhole test", Designation: D4647 (1998).
21. ASTM, "Standard test method for dispersive characteristics of clay soil by double hydrometer", Designation: D4221-17 (2017).

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

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]

22. Bell F. G., Walker D., "A further examination of the nature of dispersive soils in Natal, South Africa", Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 33 (3) (2000) 187-199.

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

24. ASTM, D., "Standard test method for CBR (California bearing ratio) of laboratory-compacted soils." West Conshohocken, PA, United States (2007).

25. ASTM, D. "Standard test methods for freezing and thawing compacted soil-cement mixtures" (2003).

26. American Society for Testing and Materials "ASTM D2487- 17 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)", ASTM International, West Conshohocken, PA, (2017).

۲۷. افتخاریان ل.، تی تی دژ ا.، خاکباز ب.، سارنگ ا.، صادقیان پ.، مهین روستا ر.، نواری م.، "آزمایشگاه مکانیک خاک"، ویراست دوم، نشر کتاب دانشگاهی (۱۳۷۸).

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

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.253]