[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.5.4]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.283]

پتانسیل واگرایی خاک کانال‌های آبیاری در مناطق خشک و نیمه‌خشک با اثربخشی امواج الکترومغناطیسی در روش شیمیایی: مطالعهٔ موردی خوزستان

بهناز شاهرخ*، محسن افتاده، نسرین سهرابی؛
دانشگاه پیام نور، دانشکدهٔ شیمی

تاریخ: دریافت ۹۹/۰۳/۰۲ پذیرش ۹۹/۰۴/۳۰

چکیده

بهره‌گیری از امواج الکترومغناطیس روی عصاره اشباع به‌عنوان یک عامل اثرگذار در افزایش دقت اندازه‌گیری پارامترهای شیمیایی و تعیین عوامل مؤثر بر حلالیت املاح خاک برای تشخیص دقیق‌تر میزان پتانسیل واگرایی خاک، خصوصاً خاک‌های نیمه‌واگرا است. در این پژوهش از اثربخشی امواج الکترومغناطیس بر تهیه گل اشباع به‌عنوان روشی نوین برای دست‌یابی به نتایج تجزیهٔ شیمیایی دقیق‌تر استفاده شده است. یازده نمونه خاک از مناطق مختلف استان خوزستان که عمدتاً مسئله‌دار بوده‌اند جمع‌آوری شد. برای هر نمونه خاک آزمایش پین‌هول و آزمایش‌های شیمیایی روی عصاره‌های اشباع حاصل از: گل اشباع تحت تأثیر امواج فرابنفش (۳۶۰ nm-۲۵۶)، امواج مرئی(۴۰۰-۷۰۰nm)، بدون تابش امواج (روش استاندارد) انجام شد. پارامترهای شیمیایی EC، pH ، غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌های مهم خاک اندازه‌گیری شدند، نتایج حاصل از اثربخشی امواج الکترومغناطیس با روش استاندارد تهیهٔ عصاره اشباع و پین‌هول مقایسه شد. تحلیل مقادیر اندازه‌گیری شده EC, pH و نسبت جذب سدیم براساس روش معیار شیمیایی برای نمونه‌های تحت تابش منجر به تشخیص دقیق‌تر خاک‌های نیمه واگرا در نمونه‌های تحت تابش نسبت به نمونه‌های بدون تابش و آزمایش پین‌هول شد. ضرایب هم‌بستگی محاسبه شده برای نمونه‌های تحت تابش نشان داد این امواج بر حلالیت ژیپس و هالیت مؤثر است و نتایج اندازه‌گیری بسیار دقیق‌تر و واقعی‌تری نسبت به‌روش استاندارد ارائه کرده‌اند.

واژه‌های کلیدی: امواج الکترومغناطیس، ژیپس، هالیت، پتانسیل واگرایی

*نویسنده مسئول r10719853@yahoo.com

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.5.4]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.283]

مقدمه

بررسی دقیق خصوصیات فیزیکی- شیمیایی خاک تأثیر فراوانی در تعیین و تفسیر پارامترهای مکانیکی، طبقه‌بندی و ارزیابی خاک‌ها و جنبه‌های مدیریتی پروژه‌ها می‌گذارد. به‌دست آوردن نتایج دقیق‌تر پارامترهای شیمیایی خاک سبب تعیین نوع و میزان دقیق‌تر سیمان و یا آهک مصرفی در تثبیت خاک مسئله‌دار، تخمین مناسب‌تر رفتار نشست تحکیمی ثانویه بستر زیر کانال آبیاری، دقت در بررسی‌ها و طراحی‌های مهندسی وسایر موارد دیگر می‌شود. تحقیقات نشان داد تغییرات شیمیایی مانند افزایش املاح خاک یکی ازعوامل مؤثر بر تغییر پارامترهای مکانیکی خاک است[۱]، [۲]، [۳]. با توجه به ناهمگون بودن بافت خاک، تغییرات آب و هوایی، میزان بارش، مقدار تبخیر و حتی آب در حال جریان در محیط، می‌توان انتظار واکنش‌های متفاوتی داشت. مثلاً در صورتی‌که آب خالص در خاک جریان یابد یا سبب اشباع آن شود انحلال ژیپس در خاک بیش‌تر می‌شود که موجب کاهش زاویهٔ اصطکاک داخلی، ضریب چسبندگی و در نهایت افزایش تخلخل خاک و تخریب سازه خصوصا سازه‌های آبی می‌شود[٦]، [٤.]عوامل محیطی مختلفی سرعت انحلال املاح خاک را افزایش می‌دهند. جیمز و لوپتون (۱۹۷۸)[۷] بیان کردند که افزایش سرعت جریان آب موجب افزایش حلالیت نمک‌ها می‌شود و هم‌چنین حضور سایر نمک‌ها در ساختار خاک، خصوصا غلظت‌های زیاد NaCl موجب افزایش سرعت انحلال ژیپس که یکی از مؤثرترین املاح در نشست خاک و تخریب کانال‌های آبیاری(کانال A بهبهان) است می‌شود [۸]. رامیا (۱۹۸۲) [۹] نشان داد که افزایش دما موجب افزایش حلالیت نمک‌ها در خاک‌های اشباع می‌شود. بنابراین با توجه به عوامل محیطی اثرگذار بر خصوصیات شیمیایی خاک، تعیین دقیق پارامترهای شیمیایی در تشخیص خاک‌های مسئله‌دار اهمیت فراوانی دارد.

کانال‌های آبیاری از جمله سازه‌هایی هستند که تقریباً همیشه روی محیط‌های ژئوتکنیکی خاکی و یا سنگی و یا بر محیط‌های تثبیت شده قرار می‌گیرند. یکی از مهم‌ترین مشکلات کانال‌ها در زمان ساخت و بهره‌برداری، خاک‌های رسی هستند که در آب‌های با غلظت کم نمک به‌راحتی شسته می‌شوند، این‌گونه خاک‌ها واگرا نامیده می‌شوند و این رس‌ها معمولاً دارای مقادیر زیاد یون سدیم در کاتیون‌های جذبی خود هستند. از سوی دیگر اگر کانال آبیاری در مناطق گرم و خشک قرار گرفته باشد با توجه به زیاد بودن مقدار تبخیر نسبت به

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.5.4]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.283]

بارش، با تبخیر آب از سطح خاک و صعود املاح به ترازهای بالایی خاک، غلظت املاح خصوصا کاتیون‌های مخربی مانند سدیم و به‌دنبال آن پتانسیل واگرایی افزایش می‌یابد.

نقطهٔ شروع مشاهده واگرایی می‌تواند ترک‌های حاصل از انقباض در سطح خاک و یا لایه پوشش روی آن و یا ترک‌های حاصل از ریشه گیاهان در نزدیکی گیاه باشد. پس از آغاز واگرایی و در صورت تداوم وجود آب در کانال، میزان واگرایی با دریافت مداوم و بیش‌تر آب افزایش یافته و به مرور حرکت خاک از محیط و جابه‌جایی در راستای گرادیان هیدرولیکی رخ می‌دهد. ایجاد حفرات جدید سبب تمرکز فشار آب در داخل خاک شده و زیر سطح بتن پوشش ضعیف شده و پوشش کانال به‌صورت آهسته و حتی به‌سرعت تخریب می‌شود.

پدیده واگرایی خاک عموماً به مشخصات فیزیکی-شیمیایی خاک، کانی‌شناسی، نمک‌های محلول در آب حفره‌ایی خاک و آب جاری مجاور، وابسته است و در رابطه با سازه‌های آبی اهمیت زیادی دارد. بنابراین تعیین دقیق پارامترهای شیمیایی خاک مانند هدایت الکتریکی[1] (EC)، تعیین غلظت کل یون‌های محلول[2] (TDI)، بررسی یون سدیم به‌عنوان عامل اصلی تعیین واگرایی، اندازه‌گیری غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌های خاک به‌منظور شناسایی، تثبیت و یا اصلاح خاک ضروری است [۱۰].

ترازقی(۱۹۴۳، ۱۹۶۷)[۱۱]، [۱۲]نشان داد که رفتار خاک به همان‌صورت که تحت اثرات مکانیکی است تحت اثرات فیزیکی-شیمیایی نیز است. پس اگر غلظت محلول متغیر باشد تغییر در اثرات فیزیکی-شیمیایی خاک باید یا با دانش و تجربهٔ کافی مستقیماً دخالت داده شود و یا در آزمایش‌های شبیه‌سازی و برای رفتار در محل به‌کار رود. در بسیاری از موارد افزودن یا از دست دادن نمک‌ها باعث بروز تغییرات عمده‌ای در رفتار مکانیکی یا هیدرولیکی خاک می‌شود. یکی از مهم‌ترین روش‌های استاندارد بررسی خصوصیات شیمیایی خاک و تعیین غلظت نمک‌های محلول، تجزیهٔ شیمیایی عصاره اشباع است، عصاره اشباع نیز از گل اشباع به‌وسیلهٔ پمپ خلاء طبق دستورالعمل‌های استاندارد استخراج می‌شود [۱۳]، [۱٤]، [۱۵].

معمولاً در خاک‌هایی با املاح زیاد به‌دلیل ویژگی‌های ساختاری آب مانند: نیروی چسبندگی بین عناصر و ذرات خاک با آب، جاذبه الکترواستاتیکی یون‌ها و نیروی پیوستگی

1. Electrical onductivity
2. Total Dissolve ions

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.5.4]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.283]

بین مولکول‌های آب، نیروهای واندوالس، پیوند هیدروژنی، انحلال جامدات کاهش یافته و نتایج اندازه‌گیری پارامترهای شیمیایی در شرایط آزمایشگاهی متناسب با ماهیت شیمیایی واقعی خاک نیست، براساس گزارش‌های موجود سازه‌های متعددی در سراسر دنیا به‌دلیل عدم تعیین دقیق مقدار گچ تخریب شده و به تبع آن خسارت مالی و حتی جانی زیادی را به وجود آورده است [١٦]. روش‌های مختلف فیزیکی مانند هم‌زدن مداوم نمونه، حرارت دادن و یا شیمیایی مانند تزریق مواد شیمیایی برای کاهش مزاحمت‌ها در فرایند انحلال املاح در آزمایشگاه‌ها به‌کار گرفته می‌شود که مدت اثر آنها در طول اندازه‌گیری کوتاه است و یا مانند تزریق شیمیایی مزاحمت‌های جدیدی در نمونه‌ها ایجاد می‌کنند. استفاده از میدان‌های الکتریکی، مغناطیسی و تابش‌های الکترومغناطیس از جمله روش‌های فیزیکی نوین هستند که امروزه کاربرد فراوانی در صنعت تصفیه آب دارند.

آب مایع دیامغناطیس است و تحت تأثیر میدان‌های مغناطیسی قرار دارد [۱۷]، [۱۸]، [۱۹]، [۲۰]، این موضوع موجب جهت‌دار شدن مولکول‌ها و یون‌های آب و املاح شده و از تشکیل رسوب جلوگیری وحلالیت را افزایش می‌دهد [۲۱]. در شبیه‌سازی‌ها نشان داده شده است که میدان مغناطیسی تعداد مولکول‌های مونومرآب را افزایش می‌دهد [۲۲]، هم‌چنین تحرک یون‌های محلول، در میدان‌های مغناطیسی قوی و تحت امواج الکترومغناطیس افزایش یافته و این باعث ایجاد اختلال و تضعیف پیوندهای هیدروژنی و افزایش حلالیت در غلظت‌های زیاد نمک (NaCl,۵M) می‌شود، در حالی که در غلظت‌های کم‌تر(NaCl,۱M) افزایش پیوندهای هیدروژنی آب، این اثر میدان‌های مغناطیسی قوی و تابش‌های الکترومغناطیس را جبران می‌کند]۲۳]. هم‌چنین اثر میدان مغناطیسی روی یک فیلم نازک آب موجب کاهش ضریب اصطکاک آب شده که نشان‌دهندهٔ کاهش احتمالی استحکام پیوند هیدروژنی است [۲٤].

هر عاملی که استحکام پیوند هیدروژنی را کاهش می‌دهد مانند میادین الکتریکی و تابش‌های الکترومغناطیس در واقع واکنش‌پذیری، یعنی هیدراتاسیون و حلالیت را تقویت می‌کند. تحقیقات نشان داده تصفیه آب با میدان‌های مغناطیسی تقریباً یک تسلا باعث افزایش مقاومت ملات به‌دلیل هیدراتاسیون بیش‌تر آن می‌شود [۲۵]. خوشه‌های مولکول‌های آب (حتی با ترتیب‌های تصادفی) از همه جهات دارای پیوند هیدروژن برابر هستند، بنابراین

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.5.4]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.283]

میدان‌های الکتریکی و تابش‌های الکترومغناطیسی که سعی در تغییر مجدد مولکول‌های آب دارند، باعث تضعیف پیوندهای هیدروژنی، نیروهای الکترواستاتیکی و واندروالس می‌شوند [۲۶]. تابش‌های الکترومغناطیس و میدان‌های الکتریکی به‌عنوان ضدعفونی کننده در صنعت تصفیه آب کاربرد فراوانی دارند [۲۷].

استفاده از تابش‌های الکترومغناطیس یکی از قدرت‌مندترین و رایج‌ترین روش‌های اندازه‌گیری طیف وسیعی از آنالیت‌ها محسوب می‌شود. بسیاری از دستگاه‌های استفاده شده در آزمایشگاه‌های تشخیصی بر پایهٔ اندازه‌گیری میزان جذب یا عبور امواج الکترومغناطیس ساخته شده‌اند. دستگاه اسپکتروفتومتر اولین بار به‌وسیلهٔ آرنولد بکمن و همکارانش در سال ۱۹٤۰ کشف شد [۲۸]. هم‌چنین از این امواج در واکنش‌های مختلف شیمیایی با تزریق مواد شیمیایی برای تولید ترکیبات آلی، حذف نیترات از آب استفاده می‌شود [۲۹]، [۳۰].

در جنوب خوزستان به‌دلیل وجود عوامل محیطی متعدد و مؤثر در واگرایی خاک مانند زیاد بودن املاح خاک، بالا بودن تراز آب، نوع خاک، شرایط خاص آب و هوایی موجب شده تا نتایج تعیین پارامترهای شیمیایی به‌روش استاندارد که متغییرهای محدودی را دربر می‌گیرند برای خاک‌های مسئله‌دار با مقادیر واقعی آن در سایت هم‌خوانی نداشته باشد و موجب پیش تخمینی‌های نادرست در مورد میزان پتانسیل واگرایی خاک شود، متأسفانه اثرات آن پس از ماه‌ها و یا سال‌ها از اجرای کانال‌های آبیاری و یا سایر سازه‌ها خصوصاً سازه‌های آبی پدیدار می‌شود مانند نشست، ایجاد ترک و تخریب در کانال A بهبهان و یا قطعه ۳ پای پل که خسارات فراوانی ایجاد کردند. سطح وسیعی از اراضی کشور مانند خوزستان، اصفهان، کرمان در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته‌اند و اغلب خاک این مناطق دارای املاح زیادی (ژیپس، هالیت با مواد آلی کم و تجمع کربنات) است، این خاک‌ها به‌عنوان خاک‌های مسئله‌دار (خصوصاً از منظر ساخت و ساز انواع سازه‌ها و یا شبکه‌های آبیاری و زهکشی) شناخته شده‌اند [۳۱]، [۳۲]، [۳۳].

هم‌چنین این مناطق به‌دلیل موقعیت جغرافیایی، از تابش‌های الکترومغناطیس نیز بیش‌ترین بهره را می‌برند (در طول یک سال به‌مدت نه ماه تابش امواج الکترومغناطیس، با شدت زیاد دارند) و بهتر است اثر این امواج نیز به‌عنوان یک عامل محیطی نیز بررسی شود. در این تحقیق برای اولین بار اثر بخشی امواج الکترومغناطیس بر بافت خاک از نظر شناخت یک

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.5.4]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.283]

عامل محیطی مؤثر بر رفتار فیزیکی- شیمیایی بررسی شد. با توجه به این‌که در اندازه‌گیری پارامترهای شیمیایی خاک معمولاً با افزایش رسانایی خاک دقت در اندازه‌گیری غلظت یون‌ها به‌دلیل افزایش جفت یون‌های خنثی کاهش می‌یابد، این یونها (جفت یون‌های بی‌اثر) در اندازه‌گیری‌ها مشارکت نمی‌کنند [۳٤]، اما در شرایط محیطی مناسب در فرایندهای شیمیایی مانند تبادل یونی وارد عمل می‌شوند، انتظار می‌رود بهره‌گیری از امواج پر انرژی الکترومغناطیس مانند امواج فرابنفش (UV)[1] و مرئی[2] با افزایش انرژی درونی و اثر متقابل فیزیکی-شیمیایی فاز جامد و مایع خاک موجب انحلال بیش‌تر نمک‌ها و جداسازی یون‌ها در فاز مایع شوند. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های اثر میدان‌های الکتریکی و تابش‌های الکترومغناطیس بر خواص ساختاری آب مانند تضعیف پیوندهای بین مولکولی و یا هیدروژنی، ماندگاری و عمر طولانی این اثرات بعد از زمان تابش است [۳۵] این خصوصیت موجب می‌شود در مدت اندازه‌گیری پارامترهای شیمیایی از عصاره اشباع ماهیت نمونه‌ها تغییر نکند.

بنابراین اثرگذاری این امواج بر گل اشباع و تهیه عصاره اشباع به‌عنوان روشی نوین در تعیین دقیق‌تر پارامترهای شیمیایی خاک و هم‌چنین میزان پتانسیل واگرایی خاک در این پژوهش ارائه شد. براساس این پژوهش پیشنهاد می‌شود اثر این امواج در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌عنوان یکی از پارامترهای محیطی مؤثر بر حلالیت املاح در خاک اشباع و پیش تخمینی خاک‌های واگرا و نیمه‌واگرا در نظر گرفته شود.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی تأثیر امواج الکترومغناطیس بر حلالیت املاح خاک در تجزیه‌های شیمیایی، ۱۱ نمونه خاک (خاک‌های مسئله‌دار) از عمق ۰-۲۰ سانتی‌متری هرکدام به وزن یک کیلوگرم از جنوب اهواز، آبادان، رامهرمز و بهبهان جمع‌آوری شد. نمونه‌های یک کیلوگرمی بعد از خشک شدن از غربال شمارهٔ ۲ میلی‌متر عبور داده شدند. برای مشخص کردن نوع خاک، آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ شامل، تعیین حد روانی، تعیین حد

1. ultraviolet
2. Visible

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.5.4]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.283]

خمیری (D-4318-10, ASTM 2010 [۳۶]) برای۱۱ نمونه انجام و نتایج ان در جدول ۱، ارائه شده است.

جدول ۱. طبقه‌بندی ۱۱ نمونه خاک آزمایش شده براساس استاندارد D-4318-10, ASTM 2010

شمارهٔ نمونه	نوع	حد روانی	حد خمیری	نشانهٔ خمیری
۱	CL-ML	٤٠/٠٢	٣٨/١١	١/٩١
۲	CL-ML	٣٥/٥٢	٢٩/٣٧	٦/١٥
۳	CL-ML	٤٠/١٤	٣٦/١٣	٤/٠١
٤	ML	٤٢/٥٣	٣٤/٨٦	٧/٦٧
٥	CL	٤٢/٤٧	٣٩/٣١	١٣/١٦
٦	CL	٣٨/٧٣	٢١/٦١	١٧/١٢
۷	plant	٤٣/٨٤	٤١/٧١	٢/١٣
۸	CL	٣٠/٨٤	٢١/٤٨	٩/٣٦
۹	ML	٣٧/٢٧	٣٦/٠٨	١/١٩
١٠	ML	٤١/٥٨	٣٧/٣٦	٤/٢٣
١١	ML	٣٢/٨٦	٢٩/٢٢	٣/٦٢

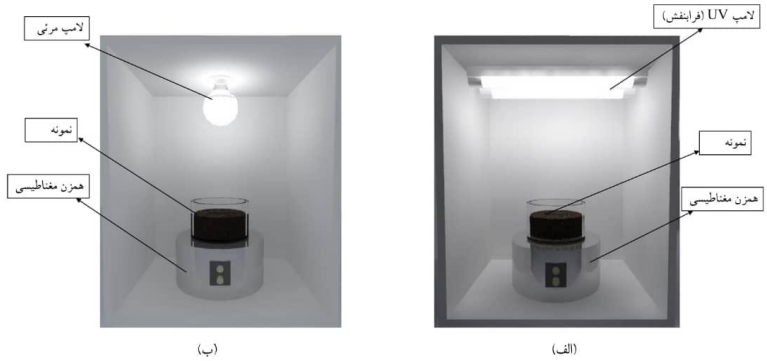
با در نظر گرفتن گوناگونی بافت خاک و تکرار آزمایش‌ها با مقادیر وزنی مختلف، مقدار بهینه خاک برای هر نمونه گل اشباع۲۵۰ گرم در نظر گرفته شد. براساس تحقیقات انجام شده[۳۷] میزان آب در خاک اشباع تابع بافت خاک، سطح ویژه، رس و ظرفیت تبادلی کاتیونی خاک‌ها است، بنابر این مقدار آب مصرفی برای تهیه گل اشباع حتی در نمونه‌های یکسان متفاوت بود. بدین‌ترتیب برای هر نمونه سه گل اشباع جهت مقایسه نمونه‌های تحت تابش امواج الکترومغناطیس با روش استاندارد تحت شرایط آزمایشگاهی تهیه شد.

برای نمونهٔ اول، گل اشباع تحت تابش امواج فرابنفش در محفظه طراحی شده با فضای داخلی کاملاً تاریک دارای لامپ UV(در محدودهٔ nm ٢٥٦-٣٦٠) روی هم‌زن مغناطیسی با سرعت ٦٠ دور در دقیقه به‌مدت ٤٠ دقیقه قرار گرفت (شکل الف ۱). در نمونهٔ دوم، گل اشباع تحت تابش امواج مرئی(در محدودهٔ nm ٤٠٠-٧٠٠) در محفظهٔ طراحی شده دارای لامپ مرئی روی هم‌زن مغناطیسی با سرعت ٦٠ دور در دقیقه به‌مدت ٦٠ دقیقه قرار گرفت (شکل ب ۱). سومین نمونه در واقع به‌منظور مقایسه نتایج حاصل از اثربخشی امواج الکترومغناطیس، گل اشباع مطابق با روش استاندارد (بدون تابش امواج)[1] تحت شرایط آزمایشگاهی با زمان ماند ۳ ساعت تهیه شد. پس از زمان‌های مورد نظر عصاره‌گیری از

1. No ray

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.5.4]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.283]

گل‌های اشباع به‌وسیله پمپ خلأ انجام شد و عصاره‌های اشباع برای تعیین پارامترهای شیمیایی مؤثر بر واگرایی خاک از قبیل EC (رسانایی الکتریکی)، pH، TDI (کل یون‌های محلول) و تعیین غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌های مهم خاک استفاده شدند.



شکل ۱. شماتیکی از سیستم تابش امواج الکترومغناطیس روی نمونه‌های گل اشباع درون محفظه‌ایی با فضای داخلی کاملا تاریک الف) نمونه روی هم‌زن مغناطیسی تحت تابش امواج فرابنفش در محدوده nm ۲۵۶-۳۶۰، ب) نمونه روی هم‌زن مغناطیسی تحت تابش امواج مرئی در محدودهٔ nm ۴۰۰-۷۰۰

از دستگاه METROHM632 برای اندازه‌گیری pH، و WTW3301 برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی استفاده شد. برای تعیین غلظت کلسیم، منیزیم، کلر و بی‌کربنات روش تیتراسیون به‌کار گرفته شد. به‌ترتیب برای اندازه‌گیری غلظت یون سدیم و سولفات به‌ترتیب از روش فلیم فتومتری (G٤٦٠) و گراوی‌متری استفاده شد [۳۸]. نتایج تجزیهٔ شیمیایی عصاره‌های اشباع براساس روش‌های تابش امواج الکترو مغناطیس با استفاده از رسم نمودارهای ترکیبی، ستونی و محاسبه ضریب هم‌بستگی (r) بین پارامترهای شیمیایی با روش استاندارد مقایسه و براساس معیارهای شیمیایی میزان پتانسیل واگرایی نمونه‌های خاک بررسی شد.

معیارهایی که از نتایج شیمیایی برای تشخیص واگرایی خاک استفاده می‌شوند عبارتند از: معیارهای شیمیایی شرارد (۱۹۷٦) [۳۹]، معیار رحیمی (۱۹۹۳) [٤۰] و معیار محققان آفریقای جنوبی (۱۹۹٤) [٤۱]. با توجه به تناقض آزمایش‌های فیزیکی انجام شده روی خاک‌های شور خوزستان با معیار شرارد و معیار رحیمی و دلفی که در تشخیص خاک‌های نیمه‌واگرا دقت

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.5.4]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.283]

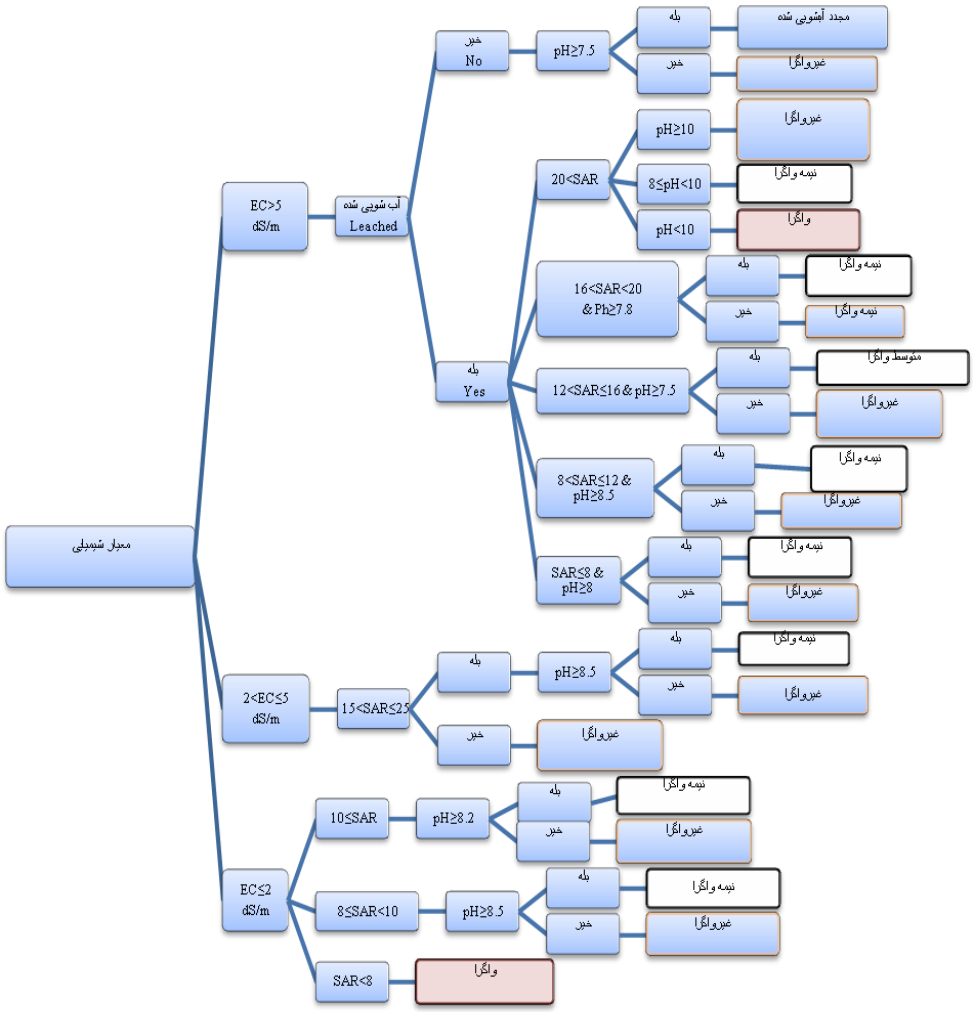
کمی دارند، در این تحقیق از معیار اصلاح شده رحیمی–دلفی به‌وسیلهٔ اسماعیلی و بازرگان (۲۰۱۰) [٤٢] که دارای دقت بیش‌تری برای تشخیص خاک‌های مسئله‌دار است استفاده شده است (شکل ۲)

در این پژوهش آزمایش پین‌هول نیز به‌عنوان معیار فیزیکی قابل اعتماد سنجش میزان واگرایی برای ارزیابی روش اثربخشی امواج الکترومغناطیس بر گل اشباع مطابق استاندارد ازمایشگاه شوری آمریکا [۱۵] روی همهٔ نمونه‌ها انجام شد [٤٣]، [٤٤]. با توجه به آن‌که نمونه‌ها از مناطق گرم و خشک و با درصد رطوبت طبیعی کم و درصد زیاد املاح جمع‌آوری شدند، درنتیجه تهیه نمونه‌های دست‌نخورده بسیار مشکل بود بنابراین نمونه‌ها براساس درصد رطوبت طبیعی و دانسیته در محل باسازی شدند. آب مقطر از نمونه‌های متراکم شده خاک تحت بارهای آبی ۵۰mm، ۱۸۰، ۳۸۰و ۱۰۲۰ به‌ترتیب در مدت زمان معین از طریق یک مجرای باریک که در داخل نمونه‌ای از خاک که با ابعاد معین تعبیه شده بود، عبور داده شد. با توجه به میزان دبی خروجی، رنگ آب خروجی و قطر نهایی سوراخ ایجاد شده در نمونه، میزان واگرایی تعیین شد. همهٔ آزمایش‌های پین‌هول در آزمایشگاه مکانیک خاک شرکت مهندسین مشاور بانیان پی انجام شد.

نتایج و بحث

خاک‌های متأثر از املاح در مناطق خشک و نیمه‌خشک بر حسب نمک‌های محلول تعریف و طبقه‌بندی می‌شوند. یکی از مهم‌ترین پارامترهای تعیین واگرایی خاک براساس معیار شیمیایی تعیین EC خاک است، استفاده از نمودارهای ستونی برای مقایسهٔ مقادیر ECو TDI اندازه‌گیری شده براساس سه روش تهیه گل اشباع در شکل ۳، نشان می‌دهد که بیش‌ترین رسانایی الکتریکی در روش تابش امواج فرابنفش بر گل اشباع در شکل ۳ الف مشاهده شده است که در نمونه‌های شمارهٔ۱، ۵، ٦، ۷ و ۹ بیش‌ترین مقدار را دارد و با نمودار ستونی TDI در شکل ۳ ب مطابقت دارد. هم‌چنین مقادیر EC وTDI اندازه‌گیری شده با روش تابش امواج مرئی بر گل اشباع در شکل ۳ الف وب برای نمونه‌های ۲، ۵ ،۷، ۸ و ۹ بیش‌تر از روش استاندارد بوده است اما در سایر نمونه‌ها تقریباً نتایج دو روش نزدیک به‌هم هستند. در هر سه روش نمودارهای EC و TDIبا یک‌دیگر مطابقت داشتند که نشانه صحت آزمایش‌های انجام شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.5.4]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.283]

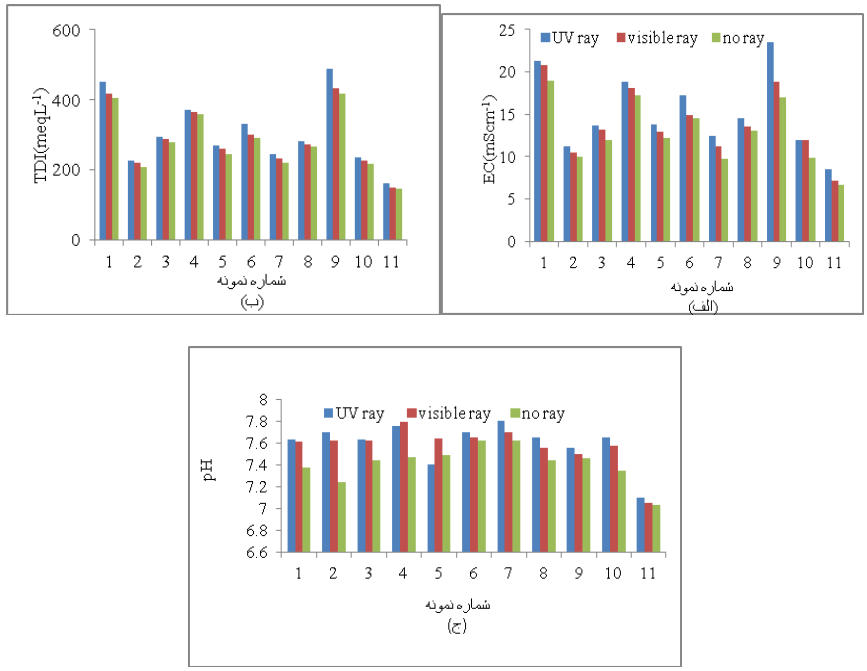


شکل۲. معیار پیشنهادی اسماعیلی و بازرگان[۴۲] برای تشخیص واگرایی خاک براساس تجزیه‌های شیمیایی

تد و میز (۲۰۰۵) [۴۵] بیان کردند که رسانایی الکتریکی تابعی از بار و غلظت یون‌های محلول است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت تابش امواج الکترومغناطیس به‌ویژه فرابنفش موجب افزایش حلالیت املاح و در نتیجه افزایش غلظت یون‌ها در عصاره اشباع شده است. یکی از معمول‌ترین و شاخص‌ترین اندازه‌گیری خصوصیات شیمیایی خاک مانند واگرایی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.5.4]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.283]

تعیین pH است. حضور نمک‌ها و نسبت خاک به آب از عوامل مؤثر بر کاهش یا افزایش pH است. با توجه به مسئله‌دار بودن نمونه‌های آزمایش شده، اندازه‌گیری pH یکی از پارامترهای مهم در مقایسه روش‌های مورد نظر است. نتایج اندازه‌گیری pH که در شکل ۳ ج نشان داد مقدار pH برای یازده نمونه تحت تابش در محدوده ۷ تا ۸ و برای روش استاندارد عمدتا کم‌تر از ۷/۵ اندازه‌گیری شده است.



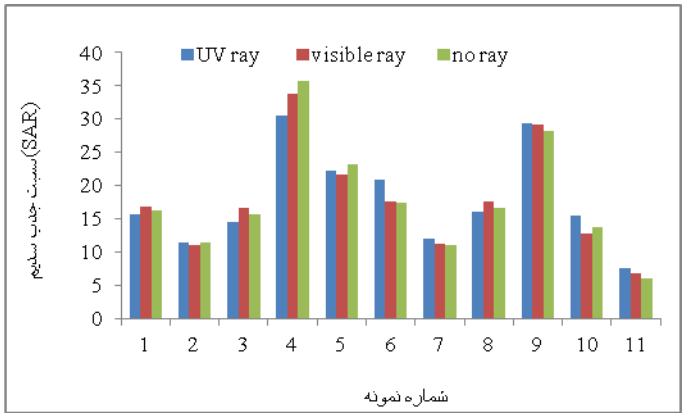
شکل ۳. مقایسه پارامترهای اندازه‌گیری شده، الف) هدایت الکتریکی(EC)، ب)کل محلول جامد محلول (TDI)، (ج)pH ، نمونه‌های تحت تابش امواج ماوراء بنفش(UV)، تابش امواج مرئی(visible) و روش استاندارد (no ray)

در این پژوهش براساس معیار اصلاح شده به‌وسیلهٔ اسماعیلی و بازرگان برای تعیین واگرایی خاک‌ها نسبت جذب سدیم[1](SAR) نیز با استفاده از مقادیر کاتیون‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از رابطهٔ (۱) محاسبه شد و نتایج آن در شکل ٤ ارائه شد.

1. Sodium Adsorption Ratio

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.5.4]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.283]

$$SAR = \frac{Na^{+}}{\sqrt{(Ca^{++}+Mg^{++})/2}} \quad (۱)$$



شکل ٤. مقایسهٔ **نسبت جذب سدیم(SAR) نمونه‌های تحت تابش امواج ماوراء بنفش(UV)، تابش امواج مرئی(visible) و روش استاندارد(no ray)**

نتایج حاصل از اندازه‌گیری EC, pH, و SAR برای یازده نمونه با روش‌های تابش امواج الکترومغناطیس و روش استاندارد و براساس معیار شیمیایی شکل ۲، تحلیل شد که نتایج آن بدین‌شرح است: برای همهٔ یازده نمونه با سه روش آزمون شرح داده شده در این پژوهش، مقدار EC بیش‌تر از $mScm^{-1}$ ٥ تعیین شد (شکل ۳ الف). برای نمونه‌های شمارهٔ ۱، ۳، ۸ و ۱۰ تحت تابش امواج الکترومغناطیس (فرابنفش و مرئی) مقادیر pH> ۷/٥ و SAR>۱۲ حاصل شد که نشان‌دهندهٔ واگرایی متوسط خاک است اما در روش استاندارد برای این نمونه‌ها pH< ۷/٥ و SAR<۱٤ به‌دست آمده که نشان‌دهندهٔ غیرواگرا بودن نمونه‌های خاک است. نمونه‌های ٦ و ٥ براساس سه روش کاملاً واگرا گزارش شده‌اند. به‌منظور مقایسه دقیق‌تر و صحت نتایج حاصل از معیار شیمیایی آزمایش پین‌هول روی نه نمونه انجام شد زیرا نمونه‌های ٦ و ۱۱ قابل بازسازی نبودند. معیار آزمایش پین‌هول در تعیین پتانسیل واگرایی براساس سه روش A, B و C است که در این پژوهش به‌دلیل پرکاربرد بودن روش A از این روش براساس استاندارد ASTM D 4647-93 استفاده شد [٤٦]. نتایج حاصل از این آزمایش مطابق جدول ۲، نشان داد نمونهٔ شمارهٔ ۱۰ غیرواگرا است. باتوجه به آن که نمونه‌ها از مناطق خشک و نیمه‌خشک تهیه و بازسازی شده‌اند بنابراین عدم مطابقت نتایج پین‌هول با اثربخشی امواج الکترومغناطیس به‌دلیل دست‌خوردگی نمونه‌ها

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.5.4]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.283]

است. آزمایش پین‌هول برای شناسایی خاک‌های واگرا دارای محدودیت‌هایی است، مانند نمونه خاک‌های دست نخورده با حساسیت زیاد که ممکن است با آزمایش پین‌هول واگرا نشان داده شوند اما در حالت طبیعی خاک مقاوم باشند. سوراخ کردن ساختار طبیعی و دست نخورده نمونه خاک در این آزمایش منجر به تخریب ساختار خاک می‌شود، که در این حالت خاک‌هایی با سدیم زیاد (بیش‌تر از ۸۰٪) و غلظت کم املاح محلول (کم‌تر از ۰/٤ میلی اکی‌والان بر لیتر) ممکن است غیرواگرا تشخیص داده شوند [٤٧]. اما نتایج حاصل از توصیف واگرایی سایر نمونه‌ها با روش پین‌هول با روش اثر بخشی امواج الکترومغناطیس کاملاً مطابقت داشت که در جدول ۲، نشان داده شده است، بنابراین باتوجه به غیرممکن بودن تهیه نمونه دست‌نخورده در مناطق خشک و نیمه‌خشک که رطوبت خاک کم است، استفاده از روش پین‌هول برای توصیف دقیق واگرایی خاک مناسب نیست.

جدول ۲. توصیف واگرایی یازده نمونه خاک براساس نتایج آزمایش‌های پین‌هول و معیار شیمیایی با روش اثر بخشی امواج فرا بنفش، امواج مرئی و روش استاندارد(بدون تابش)تهیه عصاره اشباع

نمونه	نمونه‌های تحت تابش فرابنفش	نمونه‌های تحت تابش مرئی	نمونه‌های تحت روش استاندارد	نتایج آزمایش پین‌هول
۱	متوسط واگرا	متوسط واگرا	غیرواگرا	شک به واگرا ND4
۲	غیرواگرا	غیرواگرا	غیرواگرا	غیر واگرا ND2
۳	متوسط واگرا	متوسط واگرا	غیرواگرا	شک به واگرا ND4
٤	غیرواگرا	غیرواگرا	غیرواگرا	غیر واگرا ND1
٥	واگرا	واگرا	واگرا	واگرا D1
٦	واگرا	واگرا	واگرا	انجام نشده
۷	غیرواگرا	غیرواگرا	غیرواگرا	غیر واگرا ND2
۸	متوسط واگرا	متوسط واگرا	غیرواگرا	شک به واگرا ND4
۹	غیرواگرا	غیرواگرا	غیرواگرا	غیر واگرا ND1
۱۰	متوسط واگرا	متوسط واگرا	غیرواگرا	غیر واگرا ND3
۱۱	غیر واگرا	غیرواگرا	غیرواگرا	انجام نشده

یکی دیگر از راهکارهای مقایسه روش‌های تجزیهٔ شیمیایی و پیش‌بینی ترکیبات احتمالی خاک، تعیین رابطه بین پارامترهای حاصل از تجزیه نمونه‌های عصاره اشباع ازطریق رسم آنها

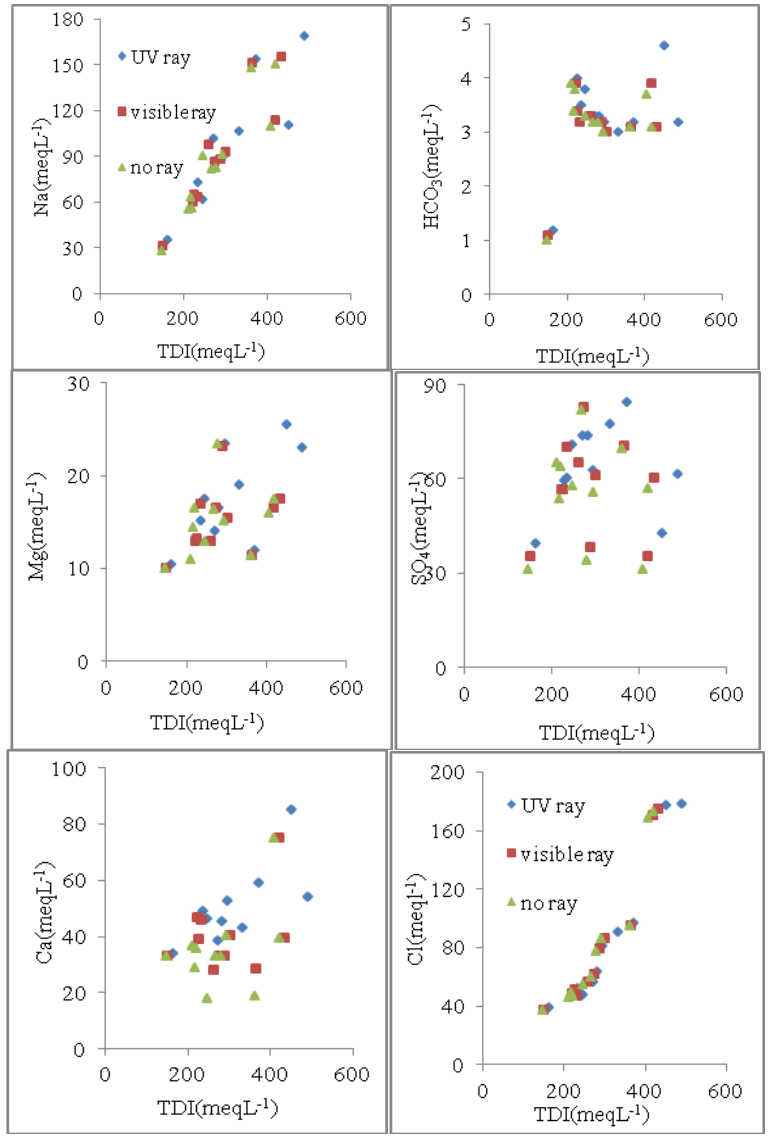
روی نمودارهای دو متغیره‌ای است که به نمودارهای ترکیبی(نمودارهای غلظت کل یون‌ها در مقابل غلظت یون‌های اصلی) معروف هستند.

باتوجه به نحوهٔ آرایش نمونه‌ها در این نمودارها می‌توان نتایج روش‌های تابش امواج الکترومغناطیس را با روش استاندارد مقایسه کرد. نمودار دو متغیره کل یون‌های محلول را در مقابل غلظت یون‌های کلسیم، سدیم، منیزیم، بی‌کربنات، کلر و سولفات براساس روش تابش امواج الکترومغناطیس و استاندارد در شکل ۵، نشان داده شده است. با توجه به نمودارهای ترکیبی شکل ٤، در هر سه روش غلظت کلر و سدیم با TDI به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. تغییرات غلظت بی‌کربنات نسبت به TDI برای هر سه روش نسبتاً کم است و این امر به‌دلیل قابلیت انحلال بالای نمک است که دیگر فرصتی برای انحلال بی‌کربنات باقی نمی‌ماند. تغییرات کلسیم، سولفات و منیزیم نسبت به TDI برای هر سه روش نتایج کاملاً متفاوتی را نشان داد، برای مقایسه دقیق‌تر ضریب هم‌بستگی(r) میانTDI و یون‌های مورد نظر محاسبه و با استفاده از نرم‌افزار SPSS تحلیل و نتایج آن در جدول ۳، ارائه شده است. در هر سه روش بیش‌ترین ارتباط TDI در کاتیون‌ها با Na و در آنیون‌ها با Cl برقرار است که نشان می‌دهد منبع یکسانی داشته‌اند (ناشی از انحلال هالیت)، این موضوع با شکل ۵، نیز مطابقت دارد. در واقع این دو یون بیش‌ترین سهم را در بالا بودن مقادیر EC و TDI برای همه نمونه‌ها در سه روش دارند. اما بیش‌ترین ضریب هم‌بستگی TDI با Na و Cl در روش اثربخشی امواج فرابنفش مشاهده شد.

با توجه به جدول ۳ بیش‌ترین ضریب هم‌بستگی میانEC، کاتیون‌ها، آنیون‌ها (به‌جز بی‌کربنات) باTDI برای نمونه‌های تحت تابش امواج فرابنفش محاسبه شد که نشان‌دهندهٔ اثربخشی بیش‌تر این امواج بر حلالیت املاح خاک نسبت به‌روش استاندارد است، هم‌چنین در روش تابش امواج مرئی نیز به‌جز کلسیم در مورد سایر پارامترهای شیمیایی ضریب هم‌بستگی اندازه‌گیری شده بیش‌تر از روش استاندارد است و نشان می‌دهد امواج مرئی نیز بر حلالیت املاح خاک اثر گذار هستند. کم‌ترین مقدار r برای یون سولفات با روش استاندارد محاسبه شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.5.4]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.283]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.5.4]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.283]



شکل۵. نمودارهای ترکیبی TDI (غلظت کل یون‌های محلول) در مقابل غلظت یون‌های کلسیم، منیزیم، سدیم، سولفات، کلر و بی‌کربنات براساس نمونه‌های تحت امواج فرابنفش (UV)، امواج مرئی (visible) و روش استاندارد (no ray)

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.5.4]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.283]

به‌منظور مقایسه روش اثربخشی امواج الکترومغناطیس بر انحلال ژیپس و هالیت نسبت به‌روش استاندارد، نمودارهای ترکیبی کلر در برابر سدیم و سولفات در برابر کلسیم در شکل ٦، نشان داده شده‌اند و ضرایب هم‌بستگی بین کلر با سدیم و سولفات با کلسیم محاسبه شد.

بیش‌ترین ضریب هم‌بستگی میان کلر و سدیم برابر r=۰/٦٢٢ از روش تابش امواج فرابنفش و کم‌ترین مقدار آن r=۰/٥٨٥ برای روش استاندارد محاسبه شد. مقدار این ضریب برای روش تابش امواج مرئی r= ۰/٦۰٨ به‌دست آمد. با در نظر گرفتن ضرایب محاسبه شده می‌توان نتیجه گرفت امواج الکترومغناطیس به‌ویژه امواج فرابنفش بر حلالیت هالیت‌ها مؤثر است. با توجه به نمودار ترکیبی سولفات در برابر کلسیم در شکل ٦، بیش‌ترین ضریب هم‌بستگی بین این دو یون نیز از روش تابش امواج فرابنفش (r=۰/٢١٩) محاسبه شد، بنابراین امواج فرابنفش حلالیت ژیپس که یک نمک کم محلول در شرایط آزمایشگاهی است و نقش مهمی در واگرایی خاک دارد را افزایش می‌دهد. کم‌ترین مقدار r از روش تابش امواج مرئی (r=۰/١٦٥) به‌دست آمده است. اما در روش استاندارد مقدار r بیش‌تر از روش تابش امواج مرئی محاسبه شد (r=۰/٢۰١). تکرار آزمایش‌ها در زمان‌های مختلف نشان داد افزایش زمان تابش بیش‌تر از زمان مورد نظر موجب تبخیر و خشک شدن نمونه‌ها شده و تأثیری در نتایج نهایی ندارد.

عموماً تشخیص خاک‌ها با واگرایی بالا با آزمون‌های فیزیکی و شیمیایی بسادگی امکانپذیر است اما شناسایی نشدن دقیق خاک‌های نیمه‌واگرا خصوصاً در سازه‌های آبی و ساخت کانال‌های آبیاری خسارات فراوانی ایجاد می‌کند. بنابراین دست‌یابی به‌روش‌های نوین برای تشخیص این نوع خاک‌ها درصد اطمینان بیش‌تری برای طراحی، ساخت و ساز و یا اصلاح خاک ایجاد می‌کند

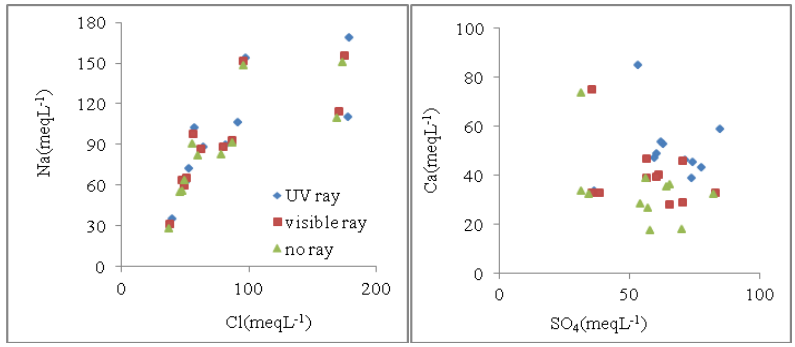
نتیجه‌گیری

در این پژوهش یازده نمونه خاک از مناطق مختلف استان خوزستان تهیه شد و آزمایش‌های شیمیایی بر عصاره‌های اشباع حاصل از: گل اشباع تحت تأثیر امواج فرابنفش (٢٥٦-٣٦۰ nm) به‌مدت ٤۰ دقیقه، امواج مرئی (٤۰۰-٧۰۰nm) به‌مدت ٦۰ دقیقه، بدون تابش امواج (روش استاندارد) با زمان ماند ٣ ساعت انجام شد. میزان واگرایی نمونه‌ها براساس معیار شیمیایی اصلاح شده برای سه روش انجام و با آزمایش پین‌هول مقایسه شد که نتایج آن عبارتند از:

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.5.4]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.283]

جدول۳. محاسبهٔ ضرایب هم‌بستگی(r) میان TDI و پارامترهای شیمیایی براساس روش‌های اثر بخشی امواج الکترو مغناطیس و استاندارد

یونها	روش تابش امواج فرابنفش	روش تابش امواج مرئی	روش استاندارد
Na	۰/۸۸٦	۰/۸٤٦	۰/۸۵۰
Mg	۰/٤۱۹	۰/۱۳۹	۰/۱۲۰
Ca	۰/۲٤۲	۰/۱٤٤	۰/۱۸۵
SO4	۰/۰۱۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰
Cl	۰/۹۲٦	۰/۸۸۹	۰/۸۸۰
HCO3	۰/۱۹۹	۰/۲۱۲	۰/۱۱۹
EC	۰/۹۸٦	۰/۹٦۱	۰/۹٤۱



شکل ٦. نمودارهای ترکیبی کلر در برابر سدیم و سولفات در برابر کلسیم براساس نمونه‌های تحت اثر بخشی امواج فرابنفش (UV)، امواج مرئی (visible) و روش استاندارد (no ray)

۱. اثر بخشی امواج الکترومغناطیس در تهیهٔ عصاره اشباع موجب تعیین دقیق‌تر پارامترهای شیمیایی مهم و مؤثر در تعیین واگرایی خاک مانند EC, pH و SAR نسبت به‌روش استاندارد شد. در نتیجه تشخیص دقیق‌تر خاک‌هایی با واگرایی متوسط براساس معیار شیمیایی اصلاح شده به‌سرعت امکان‌پذیر شد، این امواج می‌توانند به‌عنوان یکی از عوامل محیطی مؤثر بر تحلیل تغییرات شیمیایی- فیزیکی خاک در کنار نتایج تجزیهٔ شیمیایی برای پیش‌تخمینی میزان پتانسیل واگرایی خاک در نظر گرفته شوند و خصوصاً خسارات ناشی از طراحی و ساخت سازه‌های آبی را بر این گونه خاک‌ها کاهش دهند.

۲. براساس ضرایب هم‌بستگی به‌دست آمده بین کلر- سدیم و کلسیم- سولفات، تابش امواج فرابنفش حلالیت هالیت و هم‌چنین ژیپس که از عوامل مؤثر بر واگرایی خاک

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.5.4]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.283]

هستند را در خاک اشباع، به مقدار چشم‌گیری افزایش می‌دهد. با توجه به حلالیت کم ژیپس در شرایط آزمایشگاهی و دقیق نبودن روش‌های آزمون در تعیین غلظت آن، بهره‌گیری از امواج فرابنفش به‌عنوان روشی نوین در تعیین مقدار دقیق‌تر ژیپس می‌تواند به‌کار گرفته شود.

۳. عواملی مانند اثر جفت‌شدگی یون، اثر متقابل نمک‌ها، جاذبه‌های الکترواستاتیکی و افزایش انرژی درونی خاک–آب در تجزیهٔ شیمیایی نمونه‌هایی با EC زیاد، در اندازه‌گیری پارامترهای شیمیایی خطا ایجاد می‌کنند. زیاد بودن و مطابقت مقادیر EC وTDI نمونه‌های تحت تابش امواج الکترومغناطیس نسبت به‌روش استاندارد نشان داد تابش این امواج بر نمونه‌های گل اشباع در کاهش این خطا کاملاً اثرگذار است.

٤. اثربخشی این امواج بر گل اشباع، زمان ماند برای تهیه عصاره اشباع را از حداقل دو ساعت به یک ساعت کاهش داده و موجب افزایش سرعت دست‌یابی به نتایج تجزیهٔ آزمایشگاهی می‌شود.

۵. با توجه به غیرممکن بودن استفاده از نمونه‌های دست‌نخورده در مناطق خشک و نیمه‌خشک، در روش پین‌هول، استفاده از روش اثربخشی امواج الکترومغناطیس در توصیف واگرایی این‌گونه خاک‌ها با رطوبت کم، دقیق‌تر است.

تشکر و قدردانی

از شرکت مهندسین مشاور بانیان‌پی که امکانات لازم را برای انجام این پروژه فراهم کرده‌اند، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

منابع

1. Arakelyan E. A., "Characteristics of the determination of the physical properties of gypsum soils", Soil Mechanics and Foundation Engineering, 23 (1) (1986) 27-29. https://doi.org/10.1007/BF0174339.
2. Xing H., Xu H. X., Yang C., Y G., "Strength characteristics and mechanisms of salt-rich soil–cement", Engineering Geology,103 (1-2) (2009) 33-38. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.07.011.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.5.4]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.283]

3. Li M., Chai S., Du H., Wang C., "Effect of chlorine salt on the physical and mechanical properties of inshore saline soil treated with lime", Soils and Foundations, 56 (3) (2016) 327-335. https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.04.001.

4. Ahmed K. I., "Effect of gypsum on the hydro-mechanical characteristics of partially saturated sandy soil", PhD diss., Cardiff University (2013). http://orca.cf.ac.uk/id/eprint/58191.

5. Al-Homoud A. S., Basma A. I., Malkawi H., Bashabsheh M. A. A., "Cyclic swelling behavior of clays", Journal of geotechnical engineering, 121 (7) (1995) 562-565. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1995)121,7(562).

6. Al-Qaissy F. F., "Effect of gypsum content and its migration on compressibility and shear strength of the soil", PhD diss., M. Sc. Thesis, Building and Construction Eng. Dept., Univ. of Technology, Baghdad, Iraq (1989).

7. James A. N., Lupton A. R. R., "Gypsum and anhydrite in foundations of hydraulic structures", Geotechnique, 28 (3) (1978) 249-272. https://doi.org/10.1680/geot.1978.28.3.249.

۸. شاهرخ ب. منصوری‌کیا م ت.، "ترمیم ژئوتکنیکی یک کانال ساخته شده در خاک مسئله‌دار، دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران"، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه تبریز (۱۳۹٤).

9. Ramiah B. K., "The effect of chemicals on compressibility and strength of Baghdad silty clay" , RD 70 (1982) 82.

10. Karlen D. L., Mausbach M. J., Doran J. W., Cline R. T., Harris R. F., Schuman G. E., "Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial)", Soil Science Society of America Journal, 61 (1) (1997) 4-10. https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x.

11. Terzaghi K., Peck B., "Soil mechanics in engineering practice",(2nd). New York. Wiley (1967) 729.

12. Terzaghi K., "Theoretical soil mechanics", New York. Wiley (1943) 450-510.

13. United States Salinity Laboratory, Diagnoses and Improvement of Saline and Alkali Soils, Agriculture Handbook No. 60, USDA, Washington, DC, USA (1954).

14. Reitemeie R. F., Richards, L. A., "Reliability of the pressure-membrane method of extraction of soil solution", Soil Sci. illus., 57 (1944) 119-135.

15. Richard L. A., "A method of measuring soil moisture tension." Soil Sci. 68(1949) 95-112.United States Salinity Laboratory", "Diagnoses and Improvement of Saline and Alkali Soils", Agriculture Handbook No 60, USDA, Washington, DC, USA (1954).

16. Rahimi H., Abbasi, N., "Failure of concrete canal lining on fine sandy soils: a case study for the Saveh Project", Irrigation and Drainage: The journal of the International Commission on Irrigation and Drainage, 57 (1) (2008) 83-92. https://doi.org/10.1002/ird.350.

17. Pang X., Deng B., "Investigation of changes in properties of water under the action of a magnetic field", Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy, 51 (11) (2008) 1621-1632.

18. Cai R., Yang H., He J., Zhu W., "The effects of magnetic fields on water molecular hydrogen bonds", Journal of Molecular Structure, 938 (1-3) (2009) 15-9.

19. Wang Y., Wei H., Li Z., "Effect of magnetic field on the physical properties of water", Results in Physics, 8 (2018) 262-267.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.5.4]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.283]

20. Chibowski E., Szcześ A., "Magnetic water treatment–A review of the latest approaches", Chemosphere, 203 (2018) 54-67.

21. Ambashta R. D., Sillanpää M., "Water purification using magnetic assistance: a review", Journal of hazardous materials, 180 (1-3) (2010) 38-49.

22. Zhou K. X., Lu G. W., Zhou Q. C., Song J. H., Jiang S. T., Xia H. R., "Monte Carlo simulation of liquid water in a magnetic field", Journal of Applied Physics, 88 (4) (2000) 1802-1805.

23. Chang K. T., Weng C. I., "An investigation into the structure of aqueous NaCl electrolyte solutions under magnetic fields", Computational Materials Science, 43 (4) (2008) 1048-1055.

24. Wang Y., Zhang B., Gong Z., Gao K., Ou Y., Zhang J., "The effect of a static magnetic field on the hydrogen bonding in water using frictional experiments", Journal of Molecular Structure, 1052 (2013) 102-104.

25. Su N., Wu C. F., "Effect of magnetic field treated water on mortar and concrete containing fly ash", Cement and concrete composites, 25 (7) (2003) 681-688.

26. Novikov V. V., Fesenko E. E., "Molecular Biophysics-Hydrolysis of Some Peptides and Proteins in a Weak Combined (Constant and Low-Frequency Variable) Magnetic Field', Biophysics, 46 (2) (2001) 233-238.

27. Fesenko E. E., Novikov V. V., Bobkova N. V., "Decomposition of amyloid β-protein under the action of a weak magnetic field", Biophysics, 48 (2) (2003) 204-206.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.5.4]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.283]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.5.4]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.283]

28. Biryukov A. S., Gavrikov V. F., Nikiforova L. O., Shcheglov V. A., "New physical methods of disinfection of water", Journal of Russian Laser Research, 26 (1) (2005) 13-25. www.chemheritage.org/explore/Beckman/all.htm.

29. Horikoshi S., Watanabe T., Narita A., Suzuki Y., Serpone N., "The electromagnetic wave energy effect(s) in microwave–assisted organic syntheses(MAOS)" Scientific reports, 8 (1) (2018) 1-0.

30. Bensalah N., Nicola R., Abdel-Wahab A., "Nitrate removal from water using UV-M/S 2 O 4 2-advanced reduction process", International Journal of Environmental Science and Technology, 11 (6) (2014) 1733-1742.

31. Melendez-Pastor I., Navarro-Pedreño J., Gómez I., Koch M., "Identifying optimal spectral bands to assess soil properties with VNIR radiometry in semi-arid soils", Geoderma, 147 (3-4) (2008) 126-132. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.08.004.

32. Keshavarzi A., Sarmadian F., "Mapping of Spatial Distribution of Soil Salinity and Alkalinity in a Semi-arid Region Land Reclamation", Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW, Land Reclamation (2012). http://dx.doi.org/ 10.2478/v10060-011-0057-x.

33. Rezaei M., Ajalloeian R., Ghafoori M., "Geotechnical properties of problematic soils emphasis on collapsible cases", International Journal of Geosciences, 3 (1) (2012) 105-110. http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2012.31012.

34. Mortimer C. E., "Chemistry(6th ed.)", Wadsworth, Belmont, CA (1993).

35. (a) Fesenko E. E., Gluvstein A. Y., "Changes in the state of water, induced by radiofrequency electromagnetic fields", FEBS letters. 367

(1) (1995) 53-55. (b) Yamashita M., Duffield C., Tiller W. A., "Direct Current Magnetic Field and Electromagnetic Field Effects on the pH and Oxidation-Reduction Potential Equilibration Rates of Water", 1. Purified Water. Langmuir, 19 (17) (2003) 6851-6856.

36. ASTM D4318, "Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils", American Society for Testing and Materials (2010).

37. Wallender W. W., Tanji K. K., eds. "Agricultural salinity assessment and management", American Society of Civil Engineers (2011). https://doi.org/10.1061/9780784411698.

38. Reitemeier R. F., "Semi microanalysis of saline soil solution", Industrial and Engineering Chemistry Analytical Edition15 (1943) 393-402.

39. Sherard J. L., Dunnigan L. P., Decker R. S., "Identification and nature of dispersivesoils", Journal of geotechnical engineering. ASCE, 102 (GT1) (1976) 287-301.

40. Rahimi H., Delfi M.,"New Chemical Method for Evaluation of Soil dispersivity", In: Proceedings of the Second International Seminar on Soil Mechanics and Foundation Engineering of Iran (1993) 199-218.

41. Bell F. G., Maud R. R., "Dispersive soils: a review from a South African perspective", Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 27 (3) (1994) 195-210. https://doi.org/10.1144/GSL.QJEGH.1994.027.P3.02.

42. Bazargan J., Esmaeeli, D., "Criteria of the clay soils dispersal using chemical test", Journal of Engineering Geology, 4 (2) (2010) 917-942.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.5.4]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.283]

43. Craft C. D., Acciardi R. G.,"Failure of pore-water analyses for dispersion", Journal of Geotechnical Engineering 110,4 (1984) 459-472. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1984)110:4(459).

44. Dahnke W. C., Recommended chemical soil test procedures for the North Central Region (1975).

45. Todd D. k., Mays L. W., "Groundwater hydrology ", New York: Wiley (2005) 535.

46. ASTM D4647,"Standard test method for identification and classification of dispersive clay soils by the pinhole test", American Society for Testing and Materials (1993) (Re-approved 1998).

47. Dascal O., Pouliot G., Hurtubise J., "Erodibility tests on a sensitive, cemented marine clay(Champlain Clay)", In Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Projects. ASTM International (1977). https://doi.org/10.1520/STP26981S.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.5.4]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.283]