

تأثیر میزان رس و شوری خاک در رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده با انعکاس سنج زمانی

داود نامدار خجسته^{۱*}، مهدی شرفاء، ذبیح‌ا. اسکندری و محمد فاضلی سنگانی

فارغ‌التحصیل دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی دانشگاه تهران؛ Davoodnamdar@gmail.com

عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی دانشگاه تهران؛ m_shorafa@yahoo.co.uk

عضو هیأت علمی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان؛ Z_eskandari@yahoo.com

دانشجوی کارشناسی ارشد خاک شناسی دانشگاه؛ m_fazeli_sangani@yahoo.com

چکیده

اندازه‌گیری مقدار دقیق رطوبت حجمی خاک در علوم کشاورزی، هیدرولوژی و خاک‌شناسی بسیار حائز اهمیت است. لذا استفاده از روشی که بتوان رطوبت خاک را در شرایط طبیعی و بدون دست خوردگی با سرعت و دقت بالا به دست آورد، بسیار با اهمیت و کاربردی می‌باشد. در سالهای اخیر استفاده از دستگاه انعکاس سنج زمانی^۲ (TDR) که می‌تواند رطوبت و شوری خاک را در مدت کوتاهی اندازه‌گیری نماید متداول شده است. در این مطالعه تأثیر میزان رس و مقدار شوری خاک بر ضریب دی‌الکتریک^۳ (یا رطوبت حجمی خاک) اندازه‌گیری شده با TDR در خاک‌های شور و غیر شور مورد بررسی قرار گرفت. نمونه برداری از پنج نوع خاک در دو عمق سطحی (۳۰-۰) و عمقی (۶۰-۳۰) انجام شد. هر نمونه بافت خاک بسته به میزان رس آن در ۱۵ تا ۲۰ ستون ریخته شد و هرابار به بعضی ستونها آب خالص به میزان ۰.۰۲۵ متر مکعب بر مترمکعب و به بعضی از آنها ۰.۰۳ متر مکعب بر متر مکعب آب با شوری‌های مختلف (۰/۴۱-۰/۸۱-۱/۵۳-۲/۶-۳/۴۹-۴/۷۱ دسی‌زیمنس بر متر) اضافه شد تا نزدیک به حالت اشباع رسیدند. سپس چگالی ظاهری آنها به چگالی مشابه در شرایط مزرعه رسانده شد، بعد از ۴۸-۲۴ ساعت ضریب دی‌الکتریک به وسیله TDR سیستم TRACE اندازه‌گیری شد. خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و مینرالوژیکی خاک‌ها نیز اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد با افزایش مقدار شوری خاک، ضریب دی‌الکتریک خاک نیز زیادتر شده در نتیجه مقدار رطوبت خاک اندازه‌گیری شده با TDR بیش از مقدار واقعی نشان داده می‌شود. مقدار آب پیوندی^۴ باعث کاهش مقدار ضریب دی‌الکتریک می‌شود، که نتیجه این عمل پایین نشان دادن مقدار رطوبت حجمی در خاک با بافت‌های سنگین شد و این کاهش مقدار ضریب دی‌الکتریک در اثر تغییر قطبیت ملکول‌های آب اتفاق می‌افتد. برای خاک‌های مورد مطالعه یک نقطه برگشت^۵ به دست آمد، که در این نقطه اثر آب پیوندی و شوری در ضریب دی‌الکتریک یکسان است. نتایج نشان داد که فقط در این نقطه معادله خطی مقدار دقیق رطوبت را نشان می‌دهد، در زیر این نقطه اثر آب پیوندی باعث تخمین زیادتر مقدار رطوبت و بالای این نقطه باعث تخمین کمتر مقدار رطوبت در خاک می‌شود. مقدار نقطه برگشت با افزایش مقدار شوری کاهش پیدا می‌کند. به طور کلی نتایج نشان می‌دهد برای اندازه‌گیری میزان رطوبت حجمی خاک با TDR بهتر است نوع شوری و نوع مینرالوژی در معادله واسنجی قرار داده شود زیرا این پارامترها می‌توانند خطای زیادی در اندازه‌گیری میزان رطوبت حجمی خاک داشته باشند.

واژه‌های کلیدی: آب پیوندی، انعکاس سنج زمانی (TDR)، شوری خاک (EC)، رطوبت حجمی خاک

^۱ نویسنده مسئول، آدرس: کرج، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، گروه مهندسی علوم خاک

* دریافت: دی ۱۳۸۸ و پذیرش: خرداد ۱۳۹۰

2. Time Domain Reflectometry

3. Dielectric Constant

4. Bound water

5. Turning point

مقدمه

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری میزان رطوبت خاک وجود دارد از جمله روش‌های مستقیم که شامل: رطوبت حجمی و وزنی و روش‌های غیر مستقیم شامل: بلوک گچی، تترا پروب، اشعه گاما، نوترون متر، تانسومتر و ... که یکی از مهمترین این روش‌ها انعکاس سنج زمانی (TDR) می‌باشد. یکی از مزایای اندازه‌گیری رطوبت حجمی خاک، استفاده از آن برای ارزیابی بیلان هیدرولوژیکی خاک است. در سالهای اخیر استفاده از دستگاه TDR برای اندازه‌گیری رطوبت و شوری خاک متداول شده است. رطوبت خاک یک محیط متخلخل را می‌توان به وسیله دستگاه TDR با استفاده از پالس (موج) برگشتی در سنسور نصب شده در آن محیط اندازه‌گیری نمود. از آنجائی که انعکاس موج برگشتی تحت تأثیر محیط و سیستم اندازه‌گیری می‌باشند به کارگیری روش ساده و کاربردی می‌تواند کمک مؤثری در دستیابی به نتایج مورد نیاز و کاهش هزینه‌ها در برداشته باشد. لذا استفاده از روشی که بتوان رطوبت خاک را در شرایط طبیعی و بدون دست خوردگی با سرعت و دقت بالا به دست آورد، بسیار با اهمیت و کاربردی می‌باشد. عامل مهم در اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک با TDR اثر آب پیوندی در سطح ذرات رس و میزان شوری خاک می‌باشد. واژه آب پیوندی دلالت بر چرخش ملکول‌های آب نزدیک سطوح جامد یا سطح ذرات و دارای خصوصیات متفاوت از آب آزاد است، آب پیوندی باعث کاهش زمان امواج برگشتی در خاک شده که در نتیجه این عمل باعث کاهش میزان ضریب دی‌الکتریک خاک در مقایسه با آب آزاد می‌شود. رس به دلیل سطح ویژه زیاد دارای مقدار زیادی آب پیوندی می‌باشد (جاکوبسن و شونینگ، ۱۹۹۳). دلور (۱۹۶۸) در مطالعات خود به این نتیجه رسید که آب پیوندی می‌تواند تأثیر زیادی در ضریب دی‌الکتریک داشته باشد. گور و همکاران (۱۹۷۸) گزارش دادند که ضریب دی‌الکتریک به طور نمایی با افزایش فاصله از سطح افزایش پیدا می‌کند. روث و همکاران (۱۹۹۰) در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که مقدار رس زیاد منجر به سطح ویژه زیاد خاک شده و به خاطر وجود لایه‌های آب در اطراف ذرات خاک باعث آزادی کمتر ملکول‌های آب در اطراف ذرات خاک می‌شود. در نتیجه ضریب دی‌الکتریک آب خاک در اطراف ذرات نسبت به آب آزاد کمتر شده و در یک مقدار مشخص رطوبت خاک ضریب دی‌الکتریک برای خاک‌های با بافت سنگین، کمتر از ضریب دی‌الکتریک در خاک‌های با بافت سبک است.

فریدمن (۱۹۹۸) نشان داد که ضریب دی‌الکتریک آب K_w

با فاصله از فاز جامد خاک d_w ارتباط دارد و به صورت

زیر است:

(۱)

$$k_w = \frac{d_w k_{max}}{d_w \frac{1}{\lambda} \ln \left[\frac{k_{max}(k_{max} - k_{min}) e^{-\lambda d_w}}{k_{min}} \right]}$$

در این معادله k_{mic} (مقدار ۵/۵ اندازه‌گیری شده به وسیله فریدمن) و k_{max} ضریب دی‌الکتریک آب آزاد (۸۰ در ۲۰ درجه سانتی‌گراد) و پارامتر λ در دامنه بین $10^7 - 10^9 \text{ cm}^{-1}$ بوده و بهترین مقدار برازش شده این مقدار تقریباً 10^9 به دست آمد. اور و راث (۱۹۹۹) به این نتیجه رسیدند که برای جزء آب پیوندی با ۳ و ۲،۱ ملکول آب در سطح ذرات، ضریب دی‌الکتریک آب پیوندی به ترتیب ۱۰،۶ و ۱۴ به دست می‌آید. سان و همکاران (۲۰۰۰) در آزمایشات خود به این نتیجه رسیدند که خاک‌های رسی معمولاً دارای شوری بالاتر از خاک شنی و لومی است و این شوری کل خاک از غلظت یون‌ها در محلول خاک و سطح ذرات خاک است. این مقدار شوری می‌تواند باعث تغییر میزان ضریب دی‌الکتریک خاک شود و در نتیجه باعث تخمین بیش از حد رطوبت خاک شود. تاپ و همکاران (۲۰۰۰) گزارش دادند که ضریب دی‌الکتریک برای خاک‌های در دو افق A و B با درصد رس ۲۰ و ۵۵، به ترتیب ۷۱/۱ و ۵۳/۷۸ می‌باشد که علت آن میزان آب پیوندی است. گونگ و همکاران (۲۰۰۳) به این نتیجه رسیدند که ضریب دی‌الکتریک آب پیوندی از سطح ذرات با چهار لایه ملکول آب (لایه اول) تا آب آزاد (لایه چهارم) در خاک مقدار ۳۰/۲ می‌باشد. همچنین بیان کردند که شیب

معادله ۲ $\frac{1}{(k^{0.5} - 1)}$ در شرایط متفاوت با نوع و مقدار رس ارتباط دارد و بزرگی تفاوت وابسته به مقدار رس و همچنین نوع مینرال رس در خاک می‌باشد.

(۲)

$$\theta_v = \frac{(0.5 \sqrt{k_a}) - (0.5 \sqrt{k_s})}{K_w^{0.5} - 1}$$

در این معادله k_s ضریب دی‌الکتریک در خاک خشک، $0.5 \sqrt{k_s}$ و $0.5 \sqrt{k_a}$ به ترتیب مربع ریشه ضریب دی‌الکتریک خاک خشک و کل خاک و K_w ضریب دی‌الکتریک محلول خاک بوده و در رابطه خطی بین

در ۵ کیلومتری شهر کرج انجام شد. نمونه برداری در دو عمق، سطحی (۰-۳۰) و زیر سطحی (۳۰-۶۰) سانتی متری انجام گرفت، که در نهایت ۱۰ نمونه خاک (مبنای انتخاب این خاک‌ها بر اساس نوع بافت متفاوت آنها بوده است) به آزمایشگاه منتقل و پس از خشک کردن و کوبیده شدن از الک ۵ میلی متری عبور داده شدند.

تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

بافت خاک به روش هیدرومتری، چگالی ظاهری به روش سیلندر، هدایت الکتریکی^۳ با استفاده از هدایت سنج فیلیس^۴، اسیدیته خاک^۵ با دستگاه pH متر الکتریکی ایلیا^۶، کربن آلی به روش واکلی و بلاک (ویست، ۱۹۸۶)، درصد اشباع با روش وزنی، کربنات کلسیم معادل به روش حجم سنجی (گازومتری) اندازه‌گیری شد. که نتایج آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

۲-۳ تهیه ستون خاک

ده نمونه خاک بر اساس بافت خاک به ۲۱-۱۶ زیر گروه تقسیم شدند و با اضافه کردن ۰/۰۲۵ متر مکعب در متر مکعب آب از دامنه حدود هوا خشک تا نزدیک اشباع مرطوب شدند و در هر محتوای رطوبتی، خاک‌ها در لوله‌های PVC به طول ۱۸ و قطر ۱۹ سانتی متر قرار داده و چگالی ظاهری آنها به چگالی مشابه در شرایط مزرعه (جدول ۱) رسانده شدند.

۲-۴ اضافه کردن شوری به خاک

هر ده نوع خاک به چند زیر گروه (۱۵-۲۰) تقسیم گردید و سپس با شوری ۰/۴۱-۰/۸۱-۰/۱۵۳-۰/۲۶-۴۹/۳-۴۷/۴ دسی زیمنس بر متر که توسط برمید پتاسیم^۷ ایجاد شده بود در هر مرحله به اندازه ۰/۰۳ متر مکعب در متر مکعب در دامنه حدود هوا خشک تا نزدیک اشباع به خاک اضافه گردید. برای تهیه ستون‌های خاک، آنها را در لوله‌های PVC با طول ۱۸ و قطر ۱۹ سانتی متر ریخته شده و برای به دست آوردن مقدار چگالی ظاهری خاک (bp) طول سیلندر ۵ سانتی متری نشانه گذاری شد و خاک در هر مرحله به ستون اضافه شد و به مقدار مشخص و مشابه چگالی ظاهری در شرایط مزرعه رسانده شد، بعد از ۴۸-۲۴ ساعت ضریب دی‌الکتریک اندازه‌گیری شد.

۲-۵ اندازه گیری ضریب دی‌الکتریک

ضریب دی‌الکتریک به وسیله TDR سیستم

$k_a^{0.5}$ و θ_v ، شیب $\frac{1}{k_w^{0.5} - 1}$ و عرض از مبدا $\frac{(k_s^{0.5})}{k_w^{0.5} - 1}$ می‌باشد. شیب رابطه خطی بین $\sqrt{k_a^{0.5}}$ و مقدار رطوبت حجمی (θ_v) با افزایش مقدار رس بیشتر می‌گردد.

شوری کل خاک شامل شوری در سطح ذرات خاک (EC_b) و شوری در محلول خاک (EC_s) می‌باشد. اثر شوری کل خاک در اندازه‌گیری رطوبت در مطالعات تاپ و همکاران (۱۹۸۰)، وایت و همکاران (۱۹۹۴)، مالیکی و همکاران (۱۹۹۴)، سان و همکاران، (۲۰۰۰) نشان داده شده است. شوری کل خاک، باعث پراکنده شدن سیگنال منعکس شده در خاک گردیده در نتیجه باعث طولانی شدن زمان برگشت امواج و باعث خطا در اندازه‌گیری مقدار رطوبت حجمی می‌شود (هوک و لونگستن، ۱۹۹۵). این شوری زیاد، ضریب دی‌الکتریک خاک را افزایش می‌دهد (ویت و همکاران، ۱۹۹۴، سان و همکاران، ۲۰۰۰) و منجر به تخمین زیادتر مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده می‌شود. ویسر (۱۹۹۷) نشان داد که خاک‌های شور تأثیر زیادی بر روی زمان برگشت امواج و فرکانس‌ها دارند. به همین دلیل این تأثیر TDR به طور سیستماتیک مقدار رطوبت خاک را بیش از حد نشان می‌دهد. رودز و همکاران (۱۹۸۹) تحقیق کردند که میزان شوری خاک منجر به تخمین زیاد در محتوای رطوبتی خاک نیز می‌شود. در رطوبت کم جزء حجمی آب پیوندی به آب آزاد بیشتر و مقدار شوری کل خاک کم می‌باشد. هدف از این مطالعه بررسی تأثیر دو پارامتر مهم از جمله شوری و مقدار رس بر میزان ضریب دی‌الکتریک اندازه‌گیری شده با انعکاس سنج زمانی و به طور کلی تأثیر پارامترهای ذکر شده بر میزان رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده با دستگاه TDR می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه نمونه برداری

نمونه برداری خاک از پنج منطقه مختلف استان قزوین و تهران شامل خاک قرسن از سری خاک‌های قرسن از گروه خاک‌های رسوبی^۱، خاک تپه سلطان آباد از سری خاک‌های نظام آباد از گروه خاک‌های رسوبی، خاک جنوب تاکستان از سری خاک تاکستان از گروه خاک‌های رسوبی، خاک قریه شال از سری خاک خررود از گروه خاک‌های قهوه‌ای^۲ و خاک مزرعه دانشگاه در شهرستان کرج

3. Electrical conductivity

4. PW-Philips

5. Soil reaction

6. Eysel-2000

7. KBr

1. Alluvial soil

2. Brown soil

لگاریتمی و معادله خطی در مقدار $0.5\sqrt{k_a}$ برای خاک لوم با شوری ۷/۱۹ و ۵/۵ و رسی سیلتی با شوری ۱۰/۷ و لوم رس ۱/۸۶ دسی زیمنس بر متر در جدول ۳ نشان داده شده است. مقایسه دو خاک لومی (با مقدار رس و مینرالوژی یکسان) تنها تغییر اعمال شده در این خاک مقدار شوری متفاوت بود. همان طور که در جدول ۳ نشان داده شده است مقدار رطوبت در خاک با شوری بالاتر (۷/۱۹) کمتر از مقدار رطوبت حجمی با خاک با شوری پایین تر (۵/۵) است. در دو خاک رس سیلتی و لوم رسی با شوری ۱۰/۷ و ۱/۸۶ دسی زیمنس بر متر مشاهده می‌شود که خاک با شوری بالاتر میزان رطوبت حجمی پایین‌تری در یک ضریب دی‌الکتریک مشخص نسبت به خاک با شوری پایین‌تر دارد. در واقع شوری کل خاک باعث پراکنده شدن سیگنال منعکس شده در خاک می‌شود در نتیجه آن زمان برگشت امواج طولانی‌تر شده و باعث افزایش مقدار ضریب دی‌الکتریک در خاک شده، در نتیجه منجر به تخمین زیادتر مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده با دستگاه می‌شود. در اثر افزایش شوری و مقایسه معادله لگاریتمی و معادله خطی نتایج نشان می‌دهد که در خاک لومی با شوری ۵/۵ دسی زیمنس بر متر در مربع ضریب دی‌الکتریک بیشتر از $(4 > 0.5\sqrt{k_a})$ میزان مقدار رطوبت حجمی با استفاده از معادله خطی بیشتر از معادله لگاریتمی است. در زیر این مقدار رطوبت تأثیر آب پیوندی بیشتر از تأثیر شوری می‌باشد و مقدار رطوبت معادله لگاریتمی بیشتر از معادله خطی می‌باشد و نقطه برگشت در این خاک مقدار ضریب دی‌الکتریک که برابر با ۴ به دست آمد و تنها در این نقطه معادله خطی مقدار دقیق رطوبت را نشان می‌دهد. در زیر این نقطه به دلیل تأثیر آب پیوندی و در بالای این نقطه به دلیل تأثیر مقدار شوری خاک مقدار رطوبت کمتر یا بیشتر از مقدار واقعی نشان داده می‌شود. در خاک رس سیلتی با شوری ۱۰/۷ دسی زیمنس بر متر مقایسه دو مدل (خطی و لگاریتمی) نشان می‌دهد که شوری تأثیر زیادتری در اندازه‌گیری مقدار رطوبت داشته و مقدار رطوبت در تمام دامنه در مدل لگاریتمی کمتر از معادله خطی می‌باشد. در این خاک به دلیل مقدار شوری زیاد نقطه برگشت در این خاک کمتر از ۲ می‌باشد و بالای این نقطه معادله خطی مقدار رطوبت را بیشتر از مقدار واقعی نشان می‌دهد. مقایسه خاک‌های بررسی شده نشان می‌دهد که با افزایش مقدار شوری نسبت مقدار شوری بر مقدار آب پیوندی بیشتر شده و نقطه برگشت در رطوبت پایین‌تری اتفاق می‌افتد. پس با افزایش مقدار شوری تأثیر مقدار آب پیوندی کمتر می‌گردد. در نقطه برگشت اثر آب پیوندی در حال تعادل با اثر شوری خاک می‌باشد. این

تریس^۱ مدل ۶۰۵۰ X₁ به دست آمد. دو سنسور موازی استیل به طول ۱۵۰، قطر ۶/۳۵ و به فاصله ۵/۱ میلی‌متر در داخل ستون‌های خاک قرار گرفتند. اندازه‌گیری ضریب دی‌الکتریک ۲۰ ساعت بعد از قرارگیری در داخل خاک (برای برطرف کردن گرادیان مقدار رطوبت در اطراف سنسور) انجام شد. دمای آزمایشگاه در طول اندازه‌گیری‌ها حدود ۱۷±۲ درجه سانتی‌گراد بود. برای هر ستون خاک اندازه‌گیری در سه تکرار انجام پذیرفت و سپس از مقادیر تکرارها میانگین‌گیری شد.

۲-۶ اندازه‌گیری رطوبت حجمی خاک

در ستون‌های خاک مرطوب، سیلندرهای استیلی به طول ۱۵/۶ و قطر ۸/۵ سانتی‌متر، و در خاک خشک سیلندرهای استیلی به طول ۱۸ و قطر ۸/۵ سانتی‌متر برای برداشت نمونه خاک دست نخورده استفاده شد. خاک درون هر سیلندر را برای حفظ رطوبت، درون قوطی ریخته و درب آن را بسته و به آزمایشگاه منتقل گردید. نمونه‌های مرطوب توزین شدند و در آن با درجه حرارت ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. پس از ۴۸ ساعت نمونه‌ها را خارج کرده با ترازوی یک هزارم گرم توزین شدند و مقدار رطوبت حجمی آنها با توجه به آنکه چگالی آب 1000 Kg m^{-3} ، به دست آمد.

۲-۷ مینرالوژی رس‌ها

برای تجزیه‌های مینرالوژیکی، املاح محلول و گچ، کربنات‌ها، مواد آلی، اکسیدهای آهن، حذف شده و اجزاء مختلف ذرات خاک جداسازی گردید. نمونه‌های رس جداسازی شده به ترتیب با منیزیم، پتاسیم و گلیسرول اشباع شد. اسلاید‌های رس تهیه شده و مینرالوژی رس‌های هر نمونه خاک به وسیله دستگاه جذب اشعه ایکس^۲ انجام گردید.

نتایج و بحث

۳-۱ نتایج مینرالوژی رس‌ها در خاک‌های مورد مطالعه

فراوانی و نوع کانی‌های رس موجود در نقاط نمونه‌برداری شده در جدول ۲ نشان داده شده است. در بین خاک‌های مورد مطالعه خاک قرسن از نظر تنوع در نوع کانی‌های رسی کمترین میزان تنوع را دارا می‌باشد. ۹۰ درصد کانی‌های رسی این خاک را گروه کانی اسمکتایت تشکیل می‌دهند.

۳-۲ تأثیر میزان آب پیوندی و شوری در ضریب دی-

الکتریک خاک

محاسبه مقدار رطوبت با استفاده از معادله

1. Trace
2. Xrd

چسبیده‌اند. در این حالت حرکت چرخشی ملکول‌های آب حول نیروی الکتریکی در مزرعه محدود می‌شود در نتیجه قطبی شدن کم ملکول‌های آب در مقایسه با ملکول‌های آب آزاد را ایجاد می‌کند و این حالت باعث کاهش ضریب دی‌الکتریک خاک نیز می‌شود.

۲- شوری کل خاک

شوری کل خاک شامل شوری در سطح ذرات خاک (EC_b) و شوری در محلول خاک (ECs) می‌باشد. اثر شوری کل خاک در اندازه‌گیری رطوبت TDR در مطالعات دیگر نشان داده شده است. (تاپ و همکاران، ۱۹۸۰، ویت و همکاران، ۱۹۹۴، مالیکی و همکاران، ۱۹۹۴، سان و همکاران، ۲۰۰۰). شوری کل خاک باعث پراکنده شدن سیگنال منعکس شده در خاک می‌شود، در نتیجه باعث طولانی‌تر شدن زمان برگشت امواج و افزایش ضریب دی-الکتریک می‌شود.

۳-۳ تخمین آب پیوندی

با استفاده از معادله زیر میزان رطوبت حجمی برای ده نوع خاک محاسبه شد:

(۳)

$$k^a = f_1 k_a^a + f_2 k_a^a + f_3 k_w^a + f_4 k_b^a$$

در این معادله f_4, f_3, f_2, f_1 بخش هوا، جامد، آب آزاد، آب پیوندی در خاک و ضریب دی‌الکتریک هوا، جامد، آب آزاد و آب پیوندی به ترتیب برابر $K_a=1$ ، $K_s=2/56$ ، $K_w=80/2$ ، $K_b=32/5$ بوده و پارامتر $\alpha=0/5$ می‌باشد. در این معادله K ضریب دی‌الکتریک کل خاک و α پارامتر متغیر وابسته به نوع خاک می‌باشد. با محاسبه مقدار حجمی برای هر یک از جزءها و ضریب دی-الکتریک برای هر جزء، تأثیر مقدار آب پیوندی در تخمین میزان رطوبت برای هر خاک محاسبه شده و نتایج آن در جدول ۴ آمده است. مقدار ضریب دی‌الکتریک محاسبه شده با استفاده از معادله ۳ و ضریب دی‌الکتریک اندازه‌گیری شده با دستگاه انعکاس سنج زمانی برای ده نوع خاک در دامنه خاصی از رطوبت در جداول ۴ و ۵ آمده است.

بیشترین اختلاف در مقدار ضریب دی‌الکتریک اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در خاک‌های سطحی و عمقی جنوب تاکستان، تپه سلطان آباد، شال و مزرعه مقدار $0/49$ به دست آمد. این نتیجه با یافته‌های گانگ و همکاران (۲۰۰۳) که در بافت‌های سنگین مقدار اختلاف در مقدار ضریب دی‌الکتریک اندازه‌گیری شده و محاسبه شده را $0/42$ به دست آورده بودند مطابقت دارد. اما در خاک‌های سطحی و عمقی قرسن و سطحی مزرعه این تفاوت $0/80$

نقطه می‌تواند زمانی که مقدار رس زیاد یا شوری خاک کمتر شود بیشتر شود و زمانی که مقدار رس کم یا مقدار شوری خاک زیادتر می‌شود به طرف رطوبت پایین حرکت می‌کند. مقدار شوری کل، کم خاک نمی‌تواند باعث تخمین بیش از حد مقدار رطوبت شود و مقدار آب پیوندی در دامنه رطوبت بالا نمی‌تواند باعث تخمین کمتر مقدار رطوبت خاک شود. از طرف دیگر اگر مقدار رطوبت خاک کم باشد بیشتر ملکول‌های آب پیوندی نزدیک سطح ذرات شده و در نتیجه و باعث کم شدن جریان یون‌ها و حرکت زیاد یون‌ها می‌شود، بنابراین حتی اگر مقدار شوری بالا باشد، سیگنال‌ها به طور قابل توجه تضعیف نمی‌شوند (در رطوبت پایین) پس تأثیر شوری در مقدار رطوبت پایین کمتر می‌گردد.

به طور کلی معادله خطی باعث تخمین بیشتر مقدار آب در شوری خاک بالا می‌گردد. مقدار آب پیوندی و شوری به دلایل زیر باعث تغییر در میزان ضریب دی-الکتریک می‌شوند:

۱- آب پیوندی

آب پیوندی مانع قطبی شدن ملکول‌های به وسیله جذب الکترواستاتیک بالا از بارهای منفی در سطح ذرات می‌شود شانگ (۱۹۹۴). قطبی بودن ملکول‌های آب عامل اصلی ضریب دی‌الکتریک این ماده است و هر عاملی که باعث تغییر در میزان قطبی شدن آب باشد باعث تغییر در ضریب دی‌الکتریک آب نیز می‌شود، کاهش قطبی شدن باعث کاهش ضریب دی‌الکتریک آب می‌شود. برای آب پیوندی که مقدار به طور مستقیم به سطح ذرات چسبیده است، ضریب دی‌الکتریک تنها مقدار $3/2$ به دست می‌آید (اور و راث، ۱۹۹۹) که این عامل باعث برگشت سریع‌تر موج و کوتاه شدن زمان عبور امواج یا زمان تأخیر می‌شود، بنابراین اثر آب پیوندی منجر به تخمین کمتر مقدار آب در خاک می‌شود. در خاک‌های شنی و لومی سطح ویژه و نیروی باند دهنده خیلی کم می‌باشند. بنابراین در خاک‌های رسی با سطح ویژه زیاد، جذب شدن ملکول‌های آب بیشتر و قوی‌تر شده و اثر آب‌های پیوندی در این خاک‌ها قابل توجه می‌شود (جاکوبسن و شونینگ، ۱۹۹۳). هیل هورست و همکاران (۲۰۰۱) در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که فاز مایع در داخل خاک می‌تواند به دو بخش آب آزاد و آب پیوندی تقسیم گردد. ضریب دی‌الکتریک آب آزاد در دمای 20 درجه سانتی‌گراد در حدود 80 می‌باشد، که این مقدار به خاطر درجه قطبیت زیاد ملکول‌های آب شرایط الکتریکی در مزرعه است و آب پیوندی شامل ملکول‌های آبی است که در سطح ذرات به وسیله نیروی دگردوستی، همدوستی و نیروی اسمزی

دارد و در رطوبت خاک بالاتر از ۰/۲ متر مکعب در متر مکعب اثرات آب پیوندی را می‌توان نادیده گرفت. روث و همکاران (۱۹۹۰) در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که مقدار رس زیاد منجر به سطح ویژه زیاد خاک شده و به خاطر وجود لایه‌های آب در اطراف ذرات خاک باعث آزادی کمتر ملکول‌های آب و در نهایت ضریب دی-الکتریک کمتر خاک می‌شود. در یک مقدار رطوبت مشخص ضریب دی‌الکتریک برای خاک‌های سنگین بافت کمتر از خاک‌های سبک بافت می‌باشد. کاهش قطبی شدن آب پیوندی، عامل اصلی کاهش ضریب دی‌الکتریک می‌باشد، که دلیل آن جذب الکترواستاتیک بالای بارهای منفی در سطح ذرات کلئیدی خاک می‌باشد (شانگ، ۱۹۹۴). بنابراین اثر آب پیوندی منجر به تخمین کمتر ملکول‌های آب در خاک می‌شود. در خاک‌های شنی و لومی سطح ویژه و نیروی باند دهنده خیلی کم می‌باشند، بنابراین تخمین مقدار رطوبت نزدیک به مقدار واقعی آن در خاک است (جاکوبسن و شونینگ، ۱۹۹۳).

نتیجه‌گیری

فاکتورهای مختلفی بر میزان ضریب دی‌الکتریک اندازه‌گیری شده مؤثر هستند، که مهمترین این پارامترها میزان و نوع رس و میزان شوری در خاک می‌باشد. که در این مطالعه این سه پارامتر بررسی شدند. مقدار رس به دلیل تأثیر مقدار آب پیوندی باعث تخمین کمتر رطوبت می‌شود و میزان شوری خاک منجر به تخمین زیاد در محتوای رطوبتی خاک اندازه‌گیری شده با TDR می‌شود، نتایج این تحقیق نشان داد که در رطوبت کم جزء حجمی آب پیوندی به آب آزاد و در نتیجه در مقدار رطوبت پایین تأثیر آب پیوندی زیادتر بوده، که باعث کمتر برآورد کردن مقدار رطوبت خاک شد. در رطوبت‌های بالا نسبت آب پیوندی به آب آزاد کمتر بوده و در نتیجه تأثیر آب پیوندی کمتر می‌شود. نتایج نشان داد که در خاک‌های شور تأثیر میزان آب پیوندی کم می‌باشد و این شوری بالا باعث زیادتر نشان دادن مقدار رطوبت خاک می‌شود و مقدار شوری و نوع رس تعیین کننده مقدار نقطه برگشت (نقطه‌ای که تأثیر این دو پارامتر یکسان است) در خاک هستند و معادله خطی ۲ فقط در این نقطه می‌تواند مقدار رطوبت حجمی خاک را به طور دقیق نشان دهد. در پایین این نقطه معادله خطی باعث کمتر نشان دادن مقدار رطوبت و بالای این نقطه معادله خطی باعث زیاد تر نشان دادن مقدار رطوبت می‌شود، افزایش یا کاهش مقدار این نقطه بستگی به مقدار رس، نوع رس، میزان شوری خاک و ماده آلی در خاک دارد. نتایج همچنین نشان دادند که میزان ضریب دی‌الکتریک با توجه به شوری‌های متفاوت، تغییر

به دست آمد. که بیش از مقدار معمول در مطالعات قبلی و در مقایسه با خاک‌های دیگر می‌باشد. علت آن ممکن است به دلیل شوری زیاد این خاک‌ها در مقایسه با دیگر خاک باشد. چون بر اساس شوری عصاره اشباع در این خاک‌ها میزان شوری در خاک‌های سطحی و عمقی قرسن و مزرعه به ترتیب ۱۲/۶، ۱۰/۷، ۷/۱، ۵/۵ و مقدار شوری دیگر خاک‌ها کمتر از ۳ دسی‌زیمنی بر متر می‌باشد. همچنین نوع رس‌ها به دست آمده از خاک‌های سطحی و عمقی قرسن دارای مینرالوژی متفاوت از دیگر خاک‌ها می‌باشد (جدول ۲). این نتایج نشان می‌دهد که خاک‌های با اسمکتایت بالا بیش از دیگر کانی‌ها بر میزان ضریب دی‌الکتریک مؤثرند، در واقع اختلاف بین نتایج به دست آمده از معادله ۳ و دستگاه TDR نشان دهنده تأثیر مقدار آب پیوندی است. بنابراین، هر چه تأثیر آب پیوندی بر میزان ضریب دی‌الکتریک بیشتر باشد، اختلاف بین دو ضریب دی‌الکتریک (معادله و دستگاه TDR) بیشتر می‌شود. به طور کلی معادله ۳ به عنوان یک مدل که خاک را دارای چهار جزء جامد، هوا، آب آزاد و آب پیوندی و $\alpha=0.5$ در نظر می‌گیرد، از آن برای خاک‌های شور نمی‌توان بهره برد.

۳-۴ تأثیر آب پیوندی در ضریب دی‌الکتریک خاک

رابطه بین تأخیر زمانی ($\sqrt{k_a}^{0.5}$) و مقدار رطوبت حجمی برای بافت‌های متفاوت در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. در شکل ۲ رابطه بین تأخیر زمانی ($\sqrt{k_a}^{0.5}$) و مقدار رطوبت حجمی در بافت‌های رسی، رس شنی، لوم رسی به ترتیب (مقدار رس ۶۱/۶۴، ۳۶/۱۴، ۳۹/۱۴) با درصد رس متفاوت اما با مینرالوژی تقریباً یکسان نشان داده شده است. در واقع نمودار نشان می‌دهد که در خاک‌های با رس بالاتر تأثیر آب پیوندی بیشتر است. در شکل ۱ در خاک با بافت لوم رسی با درصد متفاوت رس نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود در خاک با رس بالاتر این تأثیر بیشتر می‌باشد. در این خصوص ماده آلی نیز بر میزان ضریب دی‌الکتریک مؤثر است و تأثیر ماده آلی همانند تأثیر مقدار رس می‌باشد. اما با توجه به آزمایشات انجام شده در این خاک‌ها مقدار ماده آلی در آنها تفاوت معنی داری ندارد و تأثیر ماده آلی را در این خاک‌ها نمی‌توان نادیده گرفت. شکل ۱ برای خاک لوم رسی نشان می‌دهد که اثرات آب پیوندی در خاک با رس بیشتر زیادتر می‌گردد.

این نتایج با یافته‌های گانگ و همکاران (۲۰۰۳) مطابقت دارد. این محققین در مطالعات خود در یک نوع خاک رسی با ۳۵٪ رس نشان دادند که خاک رسی در مقایسه با خاک شنی تأثیر زیادتری در میزان آب پیوندی

جزء به دست می‌آید. بدین ترتیب تخمین دقیق‌تری از رطوبت خاک به وسیله TDR به دست خواهد آمد. بنابراین میزان اثر رس، نوع رس و شوری خاک تأثیر مهمی در میزان ضریب دی‌الکتریک نشان داد و این تأثیر در زمان استفاده از این ضریب دی‌الکتریک برای اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک بسیار حائز اهمیت است و بهتر است در استفاده از دستگاه TDR با مدل‌ها و منحنی واسنجی ارائه شده برای اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک، تأثیر این سه پارامتر نیز محاسبه شده و منحنی واسنجی مناسب برای خاک‌های با شوری متفاوت و مقدار و نوع رس متفاوت برای اندازه‌گیری دقیق رطوبت به کار ببریم.

می‌یابد. شوری بالای خاک نیز تأثیر زیادی در میزان ضریب دی‌الکتریک خواهد داشت به طوری که با افزایش شوری، ضریب دی‌الکتریک خاک افزایش می‌یابد. در واقع تعادل بین میزان آب پیوندی و میزان شوری خاک تعیین کننده میزان تغییر ضریب دی‌الکتریک در خاک می‌باشد. علاوه بر این، برای یافتن رطوبت دقیق خاک بر اساس ضریب دی‌الکتریک آن می‌توان از مدل ارائه شده در این مقاله بهره جست که در آن چها فاز برای خاک در نظر گرفته شده است (جامد، هوا، آب آزاد، آب پیوندی). ضریب دی‌الکتریک دقیق خاک بر اساس این مدل از مجموعه حاصلضرب هر جزء در ضریب دی‌الکتریک آن

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

تعداد نمونه	بافت	pH	شوری dSm ⁻¹	چگالی ظاهری Mgm ⁻³	ماده آلی %	آهک %	شن %	سیلت %	رس %	محل نمونه برداری	
۱۷	لوم رسی	۷/۸	۱/۲۴	۱/۲۹	۲/۲۳	۱۰	۴۲/۱۴	۲۹/۲۲	۲۸/۶۴	سطحی(۰-۳۰)	جنوب
۱۹	رسی	۸/۰	۱/۵۴	۱/۵۲	۱/۹۳	۱۱	۱۸/۱۴	۲۵/۲۲	۵۶/۶۴	عمقی(۳۰-۶۰)	تاکستان
۱۶	رس شنی	۸/۱	۱/۱۱	۱/۴۴	۱/۸۶	۵	۴۶/۶۴	۱۷/۲۲	۳۶/۱۴	سطحی(۰-۳۰)	تپه سلطان
۱۸	لوم رسی	۸/۰	۱/۸۶	۱/۴۵	۱/۳۴	۱۴	۳۶/۶۴	۲۴/۲۲	۳۹/۱۴	عمقی(۳۰-۶۰)	آباد
۲۱	رسی	۸/۲	۰/۷۳	۱/۱۸	۱/۸۶	۱۸	۱۲/۶۴	۲۵/۷۲	۶۱/۶۴	سطحی(۰-۳۰)	شال
۲۰	رسی	۸/۴	۳/۲۹	۱/۵۷	۱/۲۶	۲۰	۱۷/۶۴	۲۴/۷۲	۵۷/۶۴	عمقی(۳۰-۶۰)	قرسن
۱۷	لوم رسی	۷/۸	۱۲/۶۳	۱/۳۸	۱/۴۹	۲۱	۲۶/۶۴	۳۵/۲۲	۳۸/۱۴	سطحی(۰-۳۰)	قرسن
۱۸	رس سیلتی	۷/۸	۱۰/۷۲	۱/۴۹	۰/۶۷	۲۱	۱۸/۶۴	۴۱/۷	۳۹/۶۴	عمقی(۳۰-۶۰)	مزرعه
۱۶	لوم	۷/۷	۷/۱۹	۱/۴۱	۲/۳۳	۱۱	۲۶/۰۰	۴۸/۰۰	۲۶/۰۰	سطحی(۰-۳۰)	مزرعه
۱۶	لوم	۷/۷	۵/۵۰	۱/۶۵	۱/۱۲	۱۲	۳۴/۰۰	۴۰/۰۰	۲۶/۰۰	عمقی(۳۰-۶۰)	مزرعه

جدول ۲- فراوانی و نوع کانی‌های رس موجود در نقاط نمونه برداری شده

محل نمونه برداری	ایلیت	اسمکتیت	کانولینیت	کلریت	رس‌های مختلط	ورمی- کولیت	پالی‌گورسکایت
تاکستان	***	**	*	***	-	*	-
تپه سلطان آباد	****	*	*	***	*	-	-
شال	***	***	*	***	-	-	-
قرسن	-	*****	-	*	-	-	-
مزرعه	***	*	*	***	*	*	-

* نشان دهنده ۱۰ درصد کل رس خاک است

جدول ۳- محاسبه مقدار رطوبت با استفاده از معادله خطی و معادله لگاریتمی در خاک های لوم و رس سیلتی و لوم رسی با مقدار رس یکسان

لوم رسی با شوری ۱/۸۶	رس سیلتی با شوری ۱۰/۷	لوم با شوری ۵/۵	لوم با شوری ۷/۱۹	معادله خطی ۲	$0.5 \sqrt{k_a}$
***	***	**	*		
-۰/۰۲۳	-۰/۰۱۵	-۰/۰۰۶	-۰/۰۲۱	-۰/۰۵۰	۲
-۰/۰۸۵	-۰/۰۶۸	-۰/۱۰۲	-۰/۰۹۰	-۰/۱۱۳	۲/۵
-۰/۱۳۵	-۰/۱۱۱	-۰/۱۸۰	-۰/۱۴۷	-۰/۱۷۶	۳
-۰/۱۷۷	-۰/۱۴۷	-۰/۲۴۶	-۰/۱۹۵	-۰/۲۳۹	۳/۵
-۰/۲۱۳	-۰/۱۷۹	-۰/۳۰۳	-۰/۲۳۷	-۰/۳۰۲	۴
-۰/۲۴۶	-۰/۲۰۶	-۰/۳۵۳	-۰/۲۷۳	-۰/۳۶۵	۴/۵
-۰/۲۷۴	-۰/۲۳۱	-۰/۳۹۸	-۰/۳۰۶	-۰/۴۲۷	۵
-۰/۳۰۱	-۰/۲۵۴	-۰/۴۳۹	-۰/۳۳۶	-۰/۴۹۰	۵/۵
-۰/۳۲۴	-۰/۲۷۴	-۰/۴۷۶	-۰/۳۶۳	-۰/۵۵۳	۶
-۰/۳۴۶	-۰/۲۹۳	-۰/۵۱۱	-۰/۳۸۸	-۰/۶۱۶	۶/۵

• $-0.262***, \theta=0.236 \ln(0.5 \sqrt{k_a}) - 0.1480***, \theta=0.428 \ln(0.5 \sqrt{k_a}) - 0.332**, \theta=0.359 \ln(0.5 \sqrt{k_a}) - 0.242$
 $\theta=0.372 \ln(0.5 \sqrt{k_a})$

جدول ۴- محاسبه مقدار ضریب دی‌الکتریک اندازه‌گیری و محاسبه شده برای خاک سطحی و عمقی جنوب تاجستان

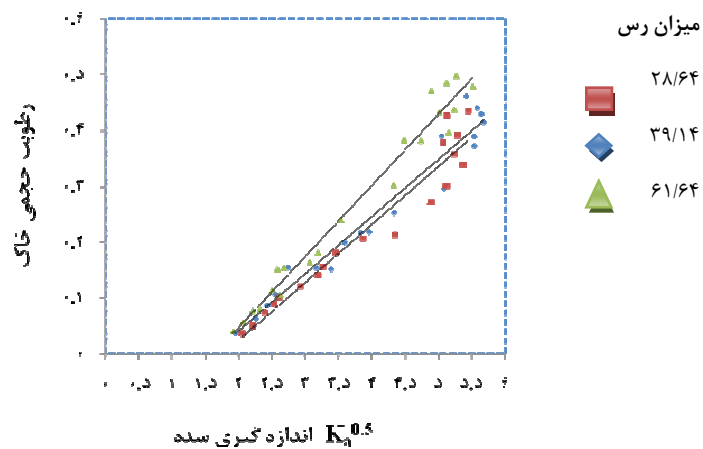
نوع خاک	مقدار رطوبت حجمی	*	**	***
	-۰/۰۷	۲/۲۱	۲/۰۵	-۰/۱۵
سطحی	-۰/۱۰	۲/۵۴	۲/۲۷	-۰/۲۷
جنوب تاجستان	-۰/۱۵	۲/۷۳	۲/۵۸	-۰/۱۵
	-۰/۳۹	۵/۰۴	۴/۷۲	-۰/۳۲
	-۰/۴۴	۵/۵۸	۵/۱۲	-۰/۴۵
عمقی جنوب تاجستان	-۰/۰۵	۱/۰۷۳	۱/۹۴	-۰/۱۲
	-۰/۱۲	۲/۷۵	۲/۳۸	-۰/۳۶
	-۰/۴۹	۵/۹۱	۵/۴۶	-۰/۴۴
	-۰/۵۲	۵/۶۶	۵/۶۷	-۰/۰۶

* $0.5 \sqrt{k_a}$ اندازه‌گیری شده، ** $0.5 \sqrt{k_a}$ محاسبه شده با معادله ۳، *** تفاوت بین $0.5 \sqrt{k_a}$ محاسبه شده و اندازه‌گیری شده

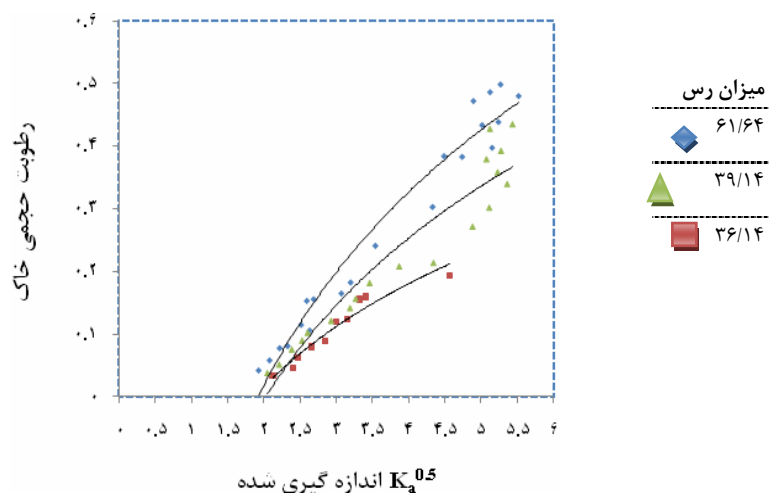
جدول ۵- تفاوت مقدار ضریب دی‌الکتریک اندازه‌گیری و محاسبه شده برای خاک‌های، تپه سلطان آباد، شال، قرسن و مزرعه

نوع خاک	نوع خاک	**	نوع خاک	**	نوع خاک	**
		-۰/۱۱		-۰/۳۴		-۰/۴۷
		-۰/۳۱		-۰/۲۱		-۰/۴۶
سطحی تپه سلطان آباد	سطحی شال	-۰/۴۵	سطحی قرسن	-۰/۳۴	سطحی مزرعه	-۰/۱۰
		-۰/۴۹		-۰/۱۳		-۰/۶۴
		-۰/۰۷		-۰/۵۴		-۰/۸۰
		-۰/۳۵		-۰/۲۷		-۰/۳۹
		-۰/۴۲		-۰/۱۵		-۰/۰۵
عمقی تپه سلطان آباد	عمقی شال	-۰/۰۷	عمقی قرسن	-۰/۱۸	عمقی مزرعه	-۰/۰۰۸
		-۰/۳۲		-۰/۵۶		-۰/۰۵

*** تفاوت بین $0.5 \sqrt{k_a}$ محاسبه شده و اندازه‌گیری شده



شکل ۱- رابطه بین $K_a^{0.5}$ و رطوبت حجمی خاک برای بافت لوم رسی



شکل ۲- رابطه بین $K_a^{0.5}$ و رطوبت حجمی خاک برای بافت لوم

رسی، رس سیلتی، رس

فهرست منابع:

1. De Looer, G.P. 1968. Dielectric properties of heterogeneous mixtures containing water. J. Microwave Power 3(2):67-73.
2. Dirksen, C., and Dasberg, S. 1993. Improved Calibration of Time Domain Reflectometry Soil water Content Measurements. Soil Sci. Soc. Am. J. 57: 660-667.
3. Friedman, S.P., 1998. A saturation degree-dependent composite spheres model for describing the effective dielectric constant of unsaturated porous media. Water Resour. Res. 34 (11): 2949-2961.

4. Gong, Y. Q., and Z. Sun. 2003. The effects of soil bulk density, clay content and temperature on soil water content measurement using time-domain reflectometry. *Hydrol. Process.* 17: 3601–3614.
5. Gur, Y.I., Ravina, I., and Babchin, A. J. 1978, On the Electric Double Layer Theory. II. The Poisson – Boltzmann Equation Including Hydration Forces. *J. Colloid Interface Sci.* 64:333-341.
6. Hilhorst MA, Dirksen C, Kämpers FWH, Feddes RA. 2001. Dielectric relaxation of bound water versus soil matric pressure. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 311–314.
7. Hook, W.R. and Livingston, N.J. 1995. Propagating Velocity Errors in Time Domain Reflectometry Measurement of Soil Water. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:92-96.
8. Jacobsen, O.H., Schjønning, P. 1993. A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture. *J. Hydrol.* 151: 147–157.
9. Malicki MA, Walczak RT, Koch S, Fluhler H. 1994. Determining soil salinity from simultaneous readings of its electrical conductivity and permittivity using TDR. In *Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications*, United States Department of Interior Bureau of Mines: 328–336.
10. Metsik, M.S. 1972. Properties of water films between mica plates. In: *Surface forces in the thin films and disperse systems. (Svojstva vodnich plenok mezhduraz plastinkami slyudy. In: Poverkhnostniye sily v tonkikh plenkakh)* (In Russian). Nauka Publishers, Moscow, pp.189–196.
11. Or D, Wraith JM. 1999. Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: a physical model. *Resources Research* 35: 371–833 Water.
12. Ph. Cosenza, A. Tabbagh. 2004. Electromagnetic determination of clay water content: role of the microporosity. *Clay Science* 26: 21– 36.
13. Rhoades, J.D., Manteghi, N.A., Shouse, P.J., Alves, W.J., 1989. Soil electrical conductivity and salinity: new formulations and calibrations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 433–439.
14. Roth, K., Schulin, R., Fluhler, H., and Attinger, W. 1990. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resour. Res.* 26:2267-2273
15. Shang, J. Q. 1994. Quantitative Determination of Potential Distribution in Stern-Gouy Double layer Model. *Can. Geotech. J.* 31: 624-636.
16. Sun ZJ, Young GD, McFarlane R, Chambers BM. 2000. The effect of soil electrical conductivity on moisture determination using time domain- reflectometry in sandy soil. *Canadian Journal of Soil Science* 80(1): 13–22.
17. Topp GC, Davis JL, Annan AP. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research* 16: 574–582.
18. Topp GC, Zeglin S, White I. 2000. Impacts of real and imaginary components of relative permittivity on time domain reflectometry measurements in soil. *Soil Science Society of America Journal* 64: 1244–1252.
19. White, I., Knight, J.H., Zegelin, S.J., and Topp, G.C. 1994, Comments on ‘Consideration on the use of time-domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content’ by W.R. Whalley. *Euro. J. Soil Sci.* 45: 503-508.
20. Wyseure, G.C.L., Mojid, M.A., Malik, M.A. 1997. Measurement of volumetric water content by TDR in saline soils. *Eur. J. Soil Sci.* 48: 347–354.