

با استفاده از مدل شبکه عصبی بدون استفاده از واسنجی مخصوص برای هر خاک می‌توان به نتایج قابل قبولی در اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک به دست آورد. واژه‌های کلیدی: انعکاس سنج زمانی، بافت خاک، رطوبت حجمی خاک، شبکه عصبی مصنوعی و کانی‌های رسی

## برآورد رطوبت حجمی خاک با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

داود نامدار خجسته<sup>۱</sup>، مهدی شرفاء<sup>۲</sup> و محمود امید<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۸۹/۰۳/۱۲ تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۲/۲۵

### مقدمه

روش‌های سنتی آماری برای مدل کردن نظام‌های پیچیده و غیر خطی اغلب غیر قابل مدیریت هستند. به ویژه اگر رابطه بین خروجی و ویژگی‌های اندازه‌گیری شده مدل مشخص نباشد. یک نظامی که بدور از اشکالات موجود در روش‌های سنتی کاربرد دارد، روش‌های پیشگوکننده هوشمند نظیر شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌باشد. ویژگی‌هایی نظیر قابلیت یادگیری، قابلیت تعمیم، پراکندگی اطلاعات، پردازش موازی و مقاوم بودن، استفاده در تفکیک الگو، درجه بندی، تقریب تابع و معادله همبستگی و به طور کلی در هر جا که نیاز به یادگیری یک نگاشت خطی یا غیر خطی باشد، ممتاز می‌نماید [۳]. مدل‌های مختلفی برای ارتباط بین میزان ضریب دی‌الکتریک و میزان رطوبت حجمی از جمله مدل‌های بیرچاک و همکاران (۲)، دالر (۳)، مالیکی و همکاران (۴)، والی (۵)، تاپ و همکاران (۱) وجود دارد. مدل واسنجی در خاک‌های با بافت متوسط نیز توسط دیگر پژوهشگران انجام شده است [۱]. استفاده از این مدل‌ها هم وقت‌گیر بوده و احتیاج به هزینه زیاد دارد. هر چند که واسنجی‌های متفاوتی که برای این دستگاه انجام شده فقط برای بافت‌های مورد نظر کاربرد دارد و استفاده از آنها برای دیگر بافت‌ها ممکن است، خطای بیشتری را ایجاد کند. علاوه بر این مشکلات مقدار خطا برای هر یک از این مدل‌ها در شرایط متفاوت یکسان نبوده و مقدار خطا در این مدل‌ها نسبت به مدل شبکه عصبی بیشتر بوده است [۲۱]. هدف از این مطالعه مقایسه مدل‌های بیرچاک و همکاران (۲)، دالر (۳)، مالیکی و همکاران (۴)، والی (۵)، تاپ و همکاران (۱) در اندازه‌گیری میزان رطوبت خاک با استفاده از ضریب دی‌الکتریک و مقایسه این مدل‌ها با شبکه عصبی می‌باشد. همچنین سعی شده تاثیر عامل‌های فیزیکی و شیمیایی از جمله میزان شن، سیلت، رس، چگالی مخصوص ظاهری، ماده آلی خاک بر روی ضریب دی‌الکتریک مورد بررسی قرار گیرد.

دو روش اساسی از جمله روش تجربی و فیزیکی برای برقراری

### چکیده

اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک در مطالعات خاک‌شناسی و آب‌شناختی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. استفاده از فناوری زمان بازتاب امواج (TDR) برای اندازه‌گیری رطوبت خاک مطرح شده است. رطوبت خاک به عنوان یک محیط متخلخل را می‌توان به وسیله دستگاه TDR با استفاده از پالس (طول موج) برگشتی در پروب نصب شده در آن محیط اندازه‌گیری نمود. از آنجائی که انعکاس موج برگشتی تحت تاثیر محیط و نظام اندازه‌گیری می‌باشند، به کارگیری روش ساده و کاربردی می‌تواند کمک موثری در دستیابی به نتایج مورد نیاز و کاهش هزینه‌ها را دربرداشته 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. هدف از این مطالعه مقایسه مدل‌های موجود در بافت‌های (رسی، لوم رسی، لوم، رس شنی، رس سیلتی) و مقایسه این مدل‌ها با مدل شبکه عصبی برای اندازه‌گیری مقدار رطوبت حجمی خاک می‌باشد. در این پژوهش از مدل شبکه عصبی برای ارتباط بین ضریب دی‌الکتریک-رطوبت حجمی ( $K_a - \theta_p$ ) با استفاده از عامل‌های فیزیکی استفاده شد. عامل‌های چگالی مخصوص ظاهری و مقدار رس بیشترین تاثیر را در شبکه داشتند و شبکه با این دو عامل ورودی، کمترین مقدار RMSE را در بین توپولوژی‌های بررسی شده نشان داد. نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی بهتر از مدل‌های بیرچاک و همکاران، دالر، مالیکی و همکاران، والی، تاپ و همکاران با مقدار RMSE کمتر، مقدار رطوبت خاک را پیش‌بینی می‌کند. در میان مدل‌های بررسی شده معادله تاپ، نتایج ضعیف‌تری نسبت به دیگر مدل‌ها نشان داد.

۱- نویسنده مسئول و کارشناس ارشد خاک‌شناسی دانشگاه تهران  
davoodnamdar@gmail.com

۲- استادیار دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی دانشگاه تهران

۳- دانشیار دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی دانشگاه تهران

براین اساس یادگیری نزول گرادیان با گشتاور (GDM) استفاده یافته است. در این روش جهت سرعت بخشیدن به آموزش و پایداری آن یک عبارت گشتاور (حافظه) به آن افزوده شده است. رابطه به هنگام سازی چگالی‌ها در یادگیری GDM به صورت زیر است:

$$W_{ij}(n+1) = W_{ij}(n) + \eta \delta(n) X_j(n) + \alpha (W_{ij}(n) - W_{ij}(n-1)) \quad (6)$$

که در آن  $W_{ij}(n)$  چگالی بین گره‌های  $i$  و  $j$  در تکرار  $n$  و  $\delta(n)$  خطاهای محلی است که می‌توان آن را به صورت مستقیم از طریق عناصر پردازشی لایه خروجی یا به صورت مجموع چگالی خطاها در عناصر پردازش لایه مخفی به دست آورد. در این رابطه  $\alpha$  و  $\eta$  به ترتیب نرخ یادگیری و ضریب گشتاور بوده و بین ۰/۱ تا ۰/۹ در نوسان است. جزئیات بیشتر در خصوص MLP و الگوریتم GDM در کتاب بی شاب یافت می‌شود [۳].

کلیه شبکه‌های بررسی شده در محیط نرم‌افزاری NeuroSolution و MATLAB طراحی و اجرا شده‌اند. برای جلوگیری از آموزش بیش از حد شبکه که غالباً باعث یادگیری نامناسب مدل می‌شود، ۱۵ درصد از داده‌ها برای CV انتخاب، ۲۰ درصد برای یادگیری و ۶۵ درصد برای آزمون به مدل معرفی شدند. برای هدف معادله همبستگی، MLP شامل یک لایه ورودی، یک لایه پنهان و یک لایه خروجی کفایت می‌کند. شبکه دارای ۶ ورودی و یک خروجی (میزان رطوبت حجمی) است. تعداد نرون‌های در لایه پنهان از طریق سعی و خطا تعیین شدند. در لایه ورودی ۶ عامل وجود دارد که عامل ضریب دی‌الکتریک خاک توسط دستگاه TDR اندازه‌گیری شده و پنج عامل فیزیکی شامل: درصد سیلت، شن، رس، چگالی مخصوص ظاهری و ماده آلی می‌باشند (جدول ۲).

شبکه‌های متعددی با یک لایه مخفی برای مشخص کردن تعداد بهینه نرون‌ها در لایه مخفی آموزش داده شدند و تعداد نرون‌های لایه مخفی از ۲ شروع و افزایش یافتند تا زمانی که مدل بهترین عملکرد و کمترین خطا را داشته باشد. هر شبکه ۲۰ بار آموزش داده شد و برای خطای خروجی میانگین‌گیری گردید. مقدار خروجی شبکه با خروجی مطلوب مقایسه شد. مقادیر MSE و ضریب تبیین  $R^2$  برای شبکه‌ها محاسبه و نتایج با هم مقایسه گردید. شبکه‌ای که دارای کمترین MSE و بزرگترین  $R^2$  بود به عنوان مدل بهینه انتخاب شد. در نهایت، تجزیه و تحلیل حساسیت برای شبکه انتخاب شده انجام شد تا میزان تاثیر و اهمیت هر یک از ورودی‌ها بر مقدار رطوبت حجمی خاک بهتر نشان داده شود. هدف از این مطالعه واسنجی دستگاه TDR در بافت‌های سنگین و متوسط با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، همچنین مقایسه این مدل با مدل‌های فیزیکی و تجربی می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### ۱-۲ مشخصات منطقه نمونه برداری

تعیین محل‌های نمونه برداری با استفاده از اطلاعات نقشه‌های طبقه‌بندی خاک اراضی استان قزوین و تهران در سال ۱۳۸۸ مشخص

ارتباط میان ضریب دی‌الکتریک خاک ( $K_a$ ) و مقدار رطوبت حجمی خاک ( $\theta_v$ ) مورد استفاده قرار گرفته است. معادله تجربی زیر به دست آمد [۲۹]:

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} K - 5.5 \times 10^{-4} K^2 + 4.3 \times 10^{-6} K^3 \quad (1)$$

در این معادله  $K$  ضریب دی‌الکتریک و  $\theta$  مقدار رطوبت حجمی خاک می‌باشد. معادله تاپ و همکاران [۲۹] به وسیله تعدادی از پژوهشگران از جمله پاترسون و اسمیت [۱۹] برای خاک‌های لوم سیلتی و رسی، ندلر و همکاران [۱۷] و [۹] برای خاک لوم سیلتی غیر شور و شور و روث و همکاران [۲۵] برای خاک لوم شنی مورد بررسی قرار گرفت. بیرچاک و همکاران [۲] یک مدل ترکیبی نیمه تجربی زیر را ارائه نمودند:

$$K_a^\alpha = \theta_a K_a^\alpha + \theta_s K_s^\alpha + \theta_w K_w^\alpha \quad (2)$$

در این معادله  $\theta_a, \theta_s$  کسر فاز جامد و هوا در خاک بوده و  $K_a, K_s$  و  $K_w$  به ترتیب ضریب دی‌الکتریک در فازهای مایع، جامد و هوا می‌باشد. در این معادله  $\alpha$  عامل وابسته به نوع خاک بوده که به طور معمول آن را ۰/۵ در نظر می‌گیرند.

مدل دلر یک مدل فیزیکی به صورت زیر می‌باشد [۶]:

$$\theta = \frac{3(K_s - K_a) + 2(1 - \theta_s)(K_{air} - K_s) - K_a(1 - \theta_s) \left( \frac{K_s}{K_{air}} - 1 \right)}{K_a \left( \frac{K_a}{K_w} - \frac{K_a}{K_{air}} \right) + 2(K_s - K_w)} \quad (3)$$

در این معادله  $\theta_s$  کسر فاز جامد خاک است. چندین مطالعه نشان دادند که این مدل پیش‌بینی درست‌تری از مدل بیرچاک نشان می‌دهد [۸]، [۴]، [۲۲].

مالیکی و همکاران [۱۶] معادله ۴ را ارائه نمودند:

$$\theta = \frac{(K^{0.5} - 0.819 - 0.168\rho_b - 0.159\rho_b^2)}{(7.17 + 1.18\rho_b)} \quad (4)$$

در این معادله  $\rho_b$  چگالی مخصوص ظاهری برحسب (مگا گرم بر متر مکعب) است.

والی [۳۰] یک مدل ترکیبی به صورت زیر ارائه نمود:

$$K_a^\alpha = \theta K_w^\alpha + (1 - \theta) K_s^\alpha + (\theta - \theta) K_g^\alpha \quad (5)$$

در این معادله  $K_g, K_s, K_w$  ضریب دی‌الکتریک در جزء هوا، جامد و محلول خاک می‌باشد،  $\theta$  در این رابطه مقدار کل تخلخل و مقدار رطوبت حجمی خاک است.

### ۱-۲ توسعه مدل شبکه عصبی مصنوعی

در بین شبکه‌های عصبی، شبکه‌های پرسپترون چند لایه یا MLP<sup>۳</sup> یکی از ابزارهایی هستند که در توپولوژی شبکه‌های عصبی مصنوعی بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲]. الگوریتم BP معمولی‌ترین روش پیاده سازی از قانون یادگیری نزول گرادیان (GD) است که دست کم در ۸۵٪ از کاربردهای شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده می‌گردد.

1- Dielectric Constant  
2- Volumetric Water Content  
3- Multi Layer Perceptron

سنج فیلیپس<sup>۴</sup>، واکنش خاک<sup>۵</sup> دستگاه pH متر الکتریکی ییلای<sup>۶</sup>، کربنات آلی روش واکلی و بلاک، درصد اشباع (روش چگالی)، کربنات کلسیم معادل به روش حجم سنجی (گازومتری) اندازه گیری شد.

## ۲-۶ تجزیه های کانی شناسی

در مرحله اول حذف املاح محلول و گچ، حذف کربنات ها، حذف مواد آلی، حذف اکسیدهای آهن، جداسازی گروه های مختلف ذرات خاک صورت گرفت. در مرحله دوم، اشباع نمونه های رس با منیزیم، اشباع نمونه های رس با پتاسیم، اشباع نمونه های رس با گلیسرول، در مرحله سوم مبادرت به تهیه اسلایدهای رس جهت آزمایش XRD صورت گرفت.

## بحث و نتیجه گیری

### ۳-۱ نتایج کانی شناسی و ویژگی های فیزیکی و شیمیایی

در این مطالعه پس از حذف مواد آلی، کربنات ها و اکسیدهای آهن آزاد، رس خاک در بسیاری از افق های سطحی و زیر سطحی، تا حدودی در همه افق ها با روش سیفون کردن جداسازی و پس از تیمار با منیزیم و پتاسیم به روش اشعه X مورد شناسایی قرار گرفت.

### ۳-۲ نتایج مقایسه مدل ها

در این مطالعه از شبکه های عصبی برای ارتباط بین ضریب دی الکتریک و رطوبت حجمی ( $K_p - \theta$ ) درده بافت استفاده شد. برای هر یک از خاک ها از نه بافت دیگر برای واسنجی مدل شبکه عصبی استفاده شد. مدل شبکه عصبی با مدل های بیرچاک و همکاران (۲)، دلر (۳)، مالیکی و همکاران (۴)، والی (۵)، تاپ و همکاران (۱) مقایسه شد. جداول (۴) و (۵) مقدار  $R^2$  و RMSE را برای مدل های شبکه عصبی، دلر، بیرچاک و همکاران، مالیکی و همکاران، تاپ و همکاران و والی نشان می دهد. در این مطالعه از شبکه ها با توپولوژی متفاوت برای هر شبکه عصبی با تعداد لایه های ورودی ۳-۱-۱-K-۱، ۱-K-۱، ۴-۵-K-۱، ۶-K-۱ به کار برده شد. مقادیر متفاوت K (تعداد نرون در لایه مخفی) برای داده های استاندارد شده برای داده های آزمایش بین ۲۴-۱ و برای داده های آموزش بین ۶۰-۱ متغیر بود (شکل ۱). در بین این توپولوژی ها شبکه با توپولوژی سه لایه ورودی شامل ضریب دی الکتریک، میزان رس، چگالی مخصوص ظاهری و ۱۰ لایه مخفی دارای کمترین مقدار RMSE و بیشترین  $R^2$  بود (جدول ۴). نتایج نشان داد که عامل های فیزیکی از قبیل میزان سیلت، میزان شن، ماده آلی در این شبکه تاثیر زیادی نداشتند و به عنوان ورودی به شبکه انتخاب نشدند. نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت نشان می دهد که عامل های ضریب دی الکتریک، میزان رس و چگالی مخصوص ظاهری دارای بیشترین تاثیر می باشند (جدول ۳).

نتایج در جدول (۵) و (۶) نشان می دهد که شبکه عصبی با سه ورودی (ضریب دی الکتریک، میزان رس، چگالی مخصوص ظاهری)

گردید. منطقه مورد مطالعه در پنج سری مختلف: ۱- خاک قرسن از سری خاک های قرقشن از گروه خاک های رسوبی<sup>۱</sup> ۲- خاک تپه سلطان آباد از سری خاک های نظام آباد از گروه خاک های رسوبی<sup>۳</sup> ۳- خاک جنوب تاکستان از سری خاک تاکستان از گروه خاک های رسوبی<sup>۴</sup> ۴- خاک قریه شال از سری خاک خررود از گروه خاک های قهوه ای<sup>۵</sup> خاک مزرعه دانشگاه در شهرستان کرج در ۵ کیلومتری شهر کرج. نمونه برداری از دو عمق، سطحی (۳۰-۰) و زیر سطحی (۶۰-۳۰) انجام شد. پس از خشک کردن نمونه ها در هوای آزاد و کوبیدن آن ها، نمونه ها را از الک ۵ میلی متر عبور داده که در نهایت ده نمونه خاک آماده شد و آزمایشات لازم روی آنها انجام گردید.

## ۲-۲ تهیه ستون خاک

هر ده نمونه خاک به چند زیر (۲۰-۱۵) گروه تقسیم شدند و با مقدار آب حجمی به اندازه ۰/۰۲۵ متر مکعب در متر مکعب ازدامنه حدود هوا خشک تا نزدیک اشباع مرطوب شدند. در هر مقدار رطوبتی خاک ها در لوله های PVC با طول ۱۸ و قطر ۱۹ سانتی متر قرار داده شد. چگالی مخصوص ظاهری آنها به چگالی مخصوص مشابه که در مزرعه اندازه گیری شده بود، رسانده شدند.

## ۲-۳ اندازه گیری ضریب دی الکتریک خاک

ضریب دی الکتریک به وسیله دستگاه TDR نظام TRACE مدل ۶۰۵۰ X1 به وسیله دو میله موازی به طول ۱۵۰ و قطر ۶/۳۵ میلی مترو به فاصله ۵۱ میلی متر در داخل ستون ها قرار داده شده بودند، اندازه گیری گردید. اندازه گیری ضریب دی الکتریک در دمای آزمایشگاه در حدود  $2 \pm 17$  درجه سانتی گراد و ۲۰ ساعت بعد از قرارگیری میله در داخل خاک انجام شد. این زمان برای برطرف کردن گرادیان مقدار رطوبت در اطراف میله می باشد. برای هر ستون خاک، اندازه گیری سه بار انجام و سپس میانگین گیری شد.

## ۲-۴ روش اندازه گیری رطوبت حجمی

در ستون های خاک و در داخل لوله های PVC در هر مقدار رطوبتی، سیلندرهای استیلی به طول ۱۵/۶ و قطر ۸/۵ سانتی متر استفاده شد، که به آهستگی در داخل خاک قرار گرفته و در خاک خشک سیلندرهای استیلی از طول ۱۸ سانتی متر برای نگهداری خاک دست نخورده استفاده شد. از نمونه خاک های داخل لوله ها نمونه برداری کرده و مقدار خاک درون هر لوله استوانه ای را برای حفظ رطوبت درون قوطی ریخته، درب آن را بسته و به سرعت به آزمایشگاه منتقل شد و رطوبت حجمی آن محاسبه گردید.

## ۲-۵ تجزیه های فیزیکی و شیمیایی

بافت خاک از روش هیدرومتری، چگالی مخصوص ظاهری از طریق روش سیلندر یا روش حلقه، هدایت الکتریکی<sup>۳</sup> از هدایت

4- PW-9527 Philips  
5- Soil Reaction  
6- EYELA-2000

1- Alluvial Soil  
2- Brown Soil  
3- Electric Conductivity

محل نمونه برداری	ایلیت	اسمکتیت	کائولینیت	کلریت	رس‌های مختلط	ورمی کولیت	پالی گورسکایت
تاکستان	***	**	*	***	-	*	-
تپه سلطان آباد	****	*	*	***	*	-	-
شال	***	***	*	***	-	-	-
قرسن	-	*****	-	*	-	-	-
مزرعه	***	*	*	***	*	*	-

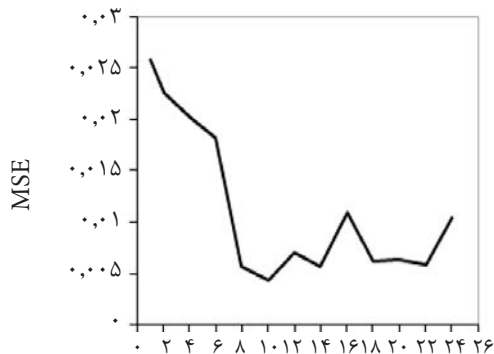
\* نشان دهنده ۱۰ درصد کل رس خاک است.

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

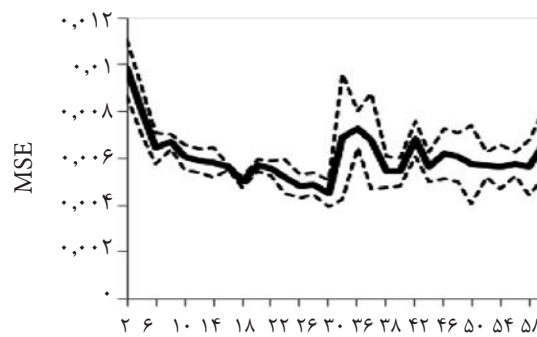
تعداد نمونه	بافت	pH	شوری dSm <sup>-1</sup>	چگالی مخصوص ظاهری Mgm <sup>-3</sup>	ماده آلی %	آهک %	شن %	سیلت %	رس %	محل نمونه برداری	
۱۷	لوم رسی	۷/۸	۱/۲۴	۱/۲۹	۲/۲۳	۱۰	۴۲/۱۴	۲۹/۲۲	۲۸/۶۴	سطحی (۰-۳۰)	جنوب تاکستان
۱۹	رسی	۸/۰	۱/۵۴	۱/۵۲	۱/۹۳	۱۱	۱۸/۱۴	۲۵/۲۲	۵۶/۶۴	عمقی (۳۰-۶۰)	
۱۶	رس شنی	۸/۱	۱/۱۱	۱/۴۴	۱/۸۶	۵	۴۶/۶۴	۱۷/۲۲	۳۶/۱۴	سطحی (۰-۳۰)	تپه سلطان آباد
۱۸	لوم رسی	۸/۰	۱/۸۶	۱/۴۵	۱/۳۴	۱۴	۳۶/۶۴	۲۴/۲۲	۳۹/۱۴	عمقی (۳۰-۶۰)	
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)	
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)	
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)	

جدول ۳- نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت

حساسیت	فاکتورهای موثر در اندازه گیری رطوبت	حساسیت	فاکتورهای موثر در اندازه گیری رطوبت
۱/۶۱۴	ضریب دی الکتریک	۰/۰۲۶	درصد شن
۰/۱۱۲	شوری کل خاک	۰/۴۱۲	ماده آلی خاک
۰/۶۱۰	درصد رس	۰/۵۷۷	چگالی مخصوص ظاهری
۰/۱۲۸	درصد سیلت		



تعداد نرون‌ها در لایه مخفی  
(b)



تعداد نرون‌ها در لایه مخفی  
(a)

شکل ۱- تعداد نرون و مقدار MSE برای داده‌های آزمون (a) و آموزش (b)

میزان رطوبت حجمی خاک - نرون در لایه منفی - ضریب دی الکتریک، میزان رس و چگالی مخصوص				توپولوژی	
RMSE	R <sup>2</sup>	۱-K-۳	RMSE	R <sup>2</sup>	۱-K-۳
۰/۰۰۵۷	۰/۹۹۸	۳-۱۴-۱	۰/۰۲۵۷	۰/۹۷۹	۳-۱-۱
۰/۰۱۰۹	۰/۹۹۴	۳-۱۶-۱	۰/۰۲۲۵	۰/۹۸۱	۳-۲-۱
۰/۰۰۶۱	۰/۹۹۶	۳-۱۸-۱	۰/۰۲۰۱	۰/۹۸۵	۳-۴-۱
۰/۰۰۶۳	۰/۹۹۷	۳-۲۰-۱	۰/۰۱۸۱	۰/۹۸۸	۳-۶-۱
۰/۰۰۵۸	۰/۹۹۸	۳-۲۲-۱	۰/۰۰۰۷	۰/۹۸۸	۳-۸-۱
۰/۰۱۰۳	۰/۹۹۶	۳-۲۴-۱	۰/۰۰۴۳	۰/۹۹۹	۳-۱۰-۱
			۰/۰۰۷۱	۰/۹۷۷	۳-۱۲-۱

جدول ۵- مقدار R<sup>2</sup> و RMSE برای مدل شبکه عصبی ۱-۱۰-۳، دلتا و بیرچاک و همکاران

بیرچاک و همکاران (۱۹۷۴)		دلتا (۱۹۶۴)		شبکه عصبی		محل نمونه برداری	شماره خاک
RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>		
۰/۰۲۳۶	۰/۹۷۱	۰/۰۲۳۸	۰/۹۶۷	۰/۰۰۵۷	۰/۹۹۶	سطحی جنوب تاکستان	۱
۰/۰۳۳۴	۰/۹۲۳	۰/۰۲۱۹	۰/۹۷۰	۰/۰۰۷۱	۰/۹۹۴	عمقی جنوب تاکستان	۲
۰/۰۱۷۰	۰/۹۸۷	۰/۰۱۵۱	۰/۹۸۸	۰/۰۰۴۳	۰/۹۹۸	سطحی تپه سلطان آباد	۳
۰/۰۳۰۶	۰/۹۵۷	۰/۰۲۸۹	۰/۹۵۶	۰/۰۱۲۵	۰/۹۸۴	عمقی تپه سلطان آباد	۴
۰/۰۲۰۹	۰/۹۷۵	۰/۰۲۱۲	۰/۹۷۲	۰/۰۱۲۹	۰/۹۸۸	سطحی شال	۵
۰/۰۱۲۴	۰/۹۷۶	۰/۰۱۳۰	۰/۹۶۷	۰/۰۰۶۱	۰/۹۹۳	عمقی شال	۶
۰/۰۲۲۰	۰/۹۳۷	۰/۰۲۲۵	۰/۹۱۹	۰/۰۱۰۹	۰/۹۶۱	سطحی قرسن	۷
۰/۰۲۸۶	۰/۹۰۱	۰/۰۲۸۹	۰/۸۷۶	۰/۰۱۳۴	۰/۹۲۳	عمقی قرسن	۸
۰/۰۳۵۷	۰/۹۳۷	۰/۰۳۴۰	۰/۹۳۶	۰/۰۲۳۲	۰/۹۴۷	سطحی مزرعه	۹
۰/۰۱۹۴	۰/۹۷۴	۰/۰۱۶۷	۰/۹۷۷	۰/۰۰۵۸	۰/۹۹۶	عمقی مزرعه	۱۰

جدول ۶- مقدار R<sup>2</sup> و RMSE برای مدل‌های مالیکی و همکاران، تاپ و همکاران و والی

والی (۱۹۹۳)		تاپ و همکاران (۱۹۸۰)		مالیکی و همکاران (۱۹۹۶)		محل نمونه برداری	شماره خاک
RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>		
۰/۰۲۴۲	۰/۹۷۰	۰/۰۲۴۶	۰/۹۶۳	۰/۰۲۴۰	۰/۹۷۰	سطحی جنوب تاکستان	۱
۰/۰۲۴۰	۰/۹۷۱	۰/۰۲۳۶	۰/۹۷۱	۰/۰۲۳۸	۰/۹۷۱	عمقی جنوب تاکستان	۲
۰/۰۱۶۷	۰/۹۸۸	۰/۰۱۷۳	۰/۹۸۴	۰/۰۱۶۷	۰/۹۸۸	سطحی تپه سلطان آباد	۳
۰/۰۳۰۹	۰/۹۵۷	۰/۰۲۹۶	۰/۹۵۳	۰/۰۳۰۸	۰/۹۵۷	عمقی تپه سلطان آباد	۴
۰/۰۲۱۲	۰/۹۷۵	۰/۰۱۹۲	۰/۹۷۶	۰/۰۲۰۹	۰/۹۷۵	سطحی شال	۵
۰/۰۱۲۹	۰/۹۷۵	۰/۰۱۳۲	۰/۹۷۲	۰/۰۲۱۸	۰/۹۷۵	عمقی شال	۶
۰/۰۲۲۸	۰/۹۳۴	۰/۰۲۱۷	۰/۹۳۲	۰/۰۲۲۶	۰/۹۳۴	سطحی قرسن	۷
۰/۰۲۹۵	۰/۸۹۶	۰/۰۲۷۸	۰/۸۹۶	۰/۰۲۹۳	۰/۸۹۶	عمقی قرسن	۸
۰/۰۳۵۹	۰/۹۳۸	۰/۰۳۱۶	۰/۹۴۴	۰/۰۳۵۶	۰/۹۳۸	سطحی مزرعه	۹
۰/۰۱۹۴	۰/۹۷۵	۰/۰۲۰۴	۰/۹۶۹	۰/۰۱۹۲	۰/۹۷۵	عمقی مزرعه	۱۰

پایین ماده آلی در خاک‌های مطالعه شده که این مقدار در مطالعات قبلی بسیار بالاتر بوده و این بالا بودن ماده آلی باعث تاثیر زیادی در رابطه دارد، احتمال دیگر تغییر بافت خاک است. یکی دیگر از فاکتورهای مهم در شبکه عصبی میزان رس است، که این عامل تاثیر زیادی در میزان ضریب دی الکتریک به دلایل: ۱- مقدار آب پیوندی همراه با ذرات رس، که به مقدار زیادی باعث کاهش ضریب

دارای بیشترین مقدار R<sup>2</sup> و کمترین مقدار RMSE نسبت به دیگر مدل‌ها نشان می‌دهد. این نتایج با یافته‌های پرسون و همکاران [۲۱] مطابقت دارد. ماده آلی تاثیر در رابطه بین ضریب دی الکتریک و میزان رطوبت دارد [۸]، [۱۰]، [۲۰]، [۱۳]. در حالی که در این مطالعه نشان داده شده که ماده آلی نمی‌تواند به عنوان فاکتور مهم در این رابطه باشد. که چند احتمال در این خصوص وجود دارد از جمله: سطح

ظاهری در مدل شبکه عصبی تا حدی توانسته است رابطه بین ضریب دی الکتریک و رطوبت حجمی را بهبود ببخشد. لدیو و همکاران [۱۵] گزارش کردند که چگالی مخصوص ظاهری خشک از دامنه حدود ۱/۳۸ تا ۱/۷۸ رابطه بین ضریب دی الکتریک و رطوبت حجمی را بهبود می بخشد ولی تاثیر آن مقدار کم می باشد.

نتایج نشان داد که مقدار  $R^2$  و RMSE در مدل شبکه عصبی به ترتیب بالاتر و کمتر از مدل های دیگر است (جدول ۴ و ۵). در مدل تاپ، مقدار RMSE در رابطه تجربی بین  $K_p - \theta_p$  و خاک ها از حالت هوا خشک تا اشباع با خطای ۰/۱۳ متر مکعب در متر مکعب بدون تاثیر دما، شوری، چگالی مخصوص ظاهری به دست آمد [۱۴]. در حالیکه در این مطالعه مقدار خطا بیشتر از مطالعات قبلی (۰/۳۵-۰/۱۶) می باشد. چند دلیل می تواند داشته باشد: ۱- به دلیل درصد رس زیاد در خاک های تحت مطالعه و در نتیجه تاثیر مقدار رس از طریق مقدار آب پیوندی و مقدار شوری در خاک های رسی، که این دو فاکتور در خاک های رسی تاثیر بیشتر از خاک های شنی دارند ۲- میزان شوری، تغییر میزان شوری در خاک باعث تغییر در ضریب دی الکتریک می شود ۳- میزان ماده آلی متفاوت در خاک ها. نتایج مدل شبکه عصبی با نتایج پرسون و همکاران [۲۱] مطابقت دارد. پرسون و همکاران در مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که مدل شبکه عصبی نتایج بهتر از مدل تاپ نشان می دهد در این مطالعه که در خاک ها با بافت سبک انجام شده میزان  $R^2$  برای مدل شبکه عصبی برای اکثر خاک ها ۰/۹۹ بوده در حالی که برای مدل تاپ ۰/۹۷-۰/۹۸ به دست آمده و مقدار RMSE برای مدل شبکه عصبی ۰/۰۱۵-۰/۰۰۳ متر مکعب در متر مکعب به دست آمد. برای مدل تاپ ۰/۱۰۱-۰/۰۱۹ متر مکعب در متر مکعب شد. که به احتمال زیاد به خاطر تاثیر میزان رس، چگالی مخصوص ظاهری در مدل شبکه عصبی در مقایسه با مدل تاپ می باشد. پرسون و همکاران [۲۱] در مدل شبکه عصبی با چهار عامل ورودی ضریب دی الکتریک، چگالی مخصوص ظاهری، میزان رس و ماده آلی به این نتیجه رسیدند که میزان خطا و در مدل شبکه عصبی نسبت به مدل تاپ کمتر بوده و مقدار  $R^2$  در مدل شبکه عصبی نسبت به تاپ بالاتر بوده است. همچنین در این مطالعه نتایج معادله تاپ نسبت به دیگر مدل ها ضعیف تر بوده به دلیل اینکه در مدل های ذکر شده عامل های فیزیکی (چگالی مخصوص ظاهری، میزان جزء حجمی آب پیوندی و آب آزاد) علاوه بر میزان ضریب دی الکتریک برای محاسبه مقدار رطوبت به کار برده شده است. همچنین نتایج مطالعه، خاک های سطحی و عمقی قرسن و سطحی مزرعه نتایج متفاوتی از دیگر خاک ها نشان می دهند، که علت آن به احتمال زیاد به دلیل شوری زیاد این خاک ها نسبت به خاک های دیگر است (جدول ۲). این شوری زیاد باعث خطای زیاد در اندازه گیری میزان رطوبت و تاثیر در میزان ضریب دی الکتریک می شود. همچنین این شوری باعث تضعیف سیگنال های منعکس شده در خاک شده در نتیجه مدت زمان برگشت این امواج طولانی تر شده و در نتیجه

دی الکتریک آب آزاد به دلیل سریع تر شدن سرعت برگشت امواج الکترومغناطیسی<sup>۱</sup> (EM) می شود، به ویژه در دامنه رطوبت های کم جایی که نسبت آب پیوندی به آب آزاد کمتر است ۲- رس به طور معمول دارای شوری بالاتر از خاک با بافت سبک است، این شوری کل خاک<sup>۲</sup> ناشی از غلظت یون ها در محلول خاک و سطح ذرات خاک است، که می تواند باعث تخمین بیش از حد رطوبت خاک شود، به ویژه در دامنه رطوبت بالا در جایی که شوری خاک بالا بوده و نسبت آب پیوندی به آب آزاد کمتر است [۲۷]. روث و همکاران [۲۶] در پژوهش های خود به این نتیجه رسیدند که مقدار رس زیاد منجر به سطح ویژه زیاد خاک و به خاطر وجود لایه های در اطراف ذرات خاک باعث آزادی کمتر ملکول های آب در اطراف ذرات خاک و در نتیجه ضریب دی الکتریک آب پیوندی نسبت به آب آزاد کمتر می شود. در یک مقدار مشخص رطوبت، ضریب دی الکتریک برای خاک های با بافت ریز پایین تر از ضریب دی الکتریک در بافت درشت است. زگلین و همکاران [۳۳] در خاک های غیر آلی و خاک های دارای رس بالا مطالعات زیادی انجام داده و به این نتیجه رسیدند که با افزایش مقدار رس خاک مقدار مشکل اندازه گیری رطوبت خاک به دلیل پراکنده شدن دی الکتریک<sup>۳</sup> و مقدار آب پیوندی<sup>۴</sup> افزایش پیدا می کند. دلور [۷] در مطالعات خود اثر آب پیوندی بر روی ویژگی های دی الکتریک به عنوان فاز جدا به حساب آوردند و به این نتیجه رسیدند که آب پیوندی در سطح ذرات رس می تواند تاثیر زیادی در ضریب دی الکتریک داشته باشد. دسبرگ و هوپمن [۵]، والی [۳۰]، هوک و لیونگتن [۱۲]، یو و همکاران [۳۲] گزارش داده اند که خاک های رسی دارای تفاوت جزئی در اندازه گیری رطوبت بین TDR و روش استاندارد آون خشک وجود دارد. رابطه بین رطوبت حجمی اندازه گیری شده، با ضریب دی الکتریک معادله درجه سه تاپ (۱) و بعضی از معادلات خطی انحراف دارد. یکی دیگر از فاکتورهای مهم در رابطه بین ضریب دی الکتریک و رطوبت حجمی در مدل شبکه عصبی چگالی مخصوص ظاهری است. نتایج این مطالعه با مطالعات تاپ و همکاران [۲۸]، لدیو و همکاران [۱۵]، جاکوبسن و شونینگ [۱۴، ۱۳] مالیکی و همکاران [۱۶]، هیل هورست و همکاران [۱۱] مطابقت دارد. نتایج این بررسی نشان داد که با افزایش چگالی مخصوص ظاهری و با تراکم کردن خاک ها، نسبت فاز جامد به هوا در خاک افزایش پیدا می کند. چنانچه چگالی مخصوص ظاهری کاهش یابد، این نسبت نیز کاهش می یابد. با توجه به اینکه ضریب دی الکتریک در فاز جامد خاک بین ۵-۲ و این مقدار برای هوا حدود ۱ می باشد، بنابراین با افزایش چگالی مخصوص ظاهری این نسبت افزایش یافته و مقدار ضریب دی الکتریک نیز افزایش می یابد، این افزایش ضریب دی الکتریک می تواند روی اندازه گیری میزان رطوبت تاثیر گذار باشد. بنابراین استفاده از چگالی مخصوص

- 1- Electromagnetic Wave
- 2- Bulk Solution Electrical Conductivity
- 3- Dielectric Dispersion
- 4- Bound Water

دی الکتریک، میزان رس، چگالی مخصوص ظاهری به عنوان ورودی انتخاب شد. نتایج نشان می‌دهد که دیگر فاکتورهای فیزیکی از قبیل میزان سیلت، میزان شن، ماده آلی در این شبکه تاثیر زیادی نداشتند و به عنوان ورودی به شبکه انتخاب نشدند. علت آن به احتمال زیاد، پایین بودن ماده آلی و سطح ویژه در سیلت و شن می‌باشد. همچنین مدل شبکه عصبی در اکثر خاک‌ها دارای نتایج بهتر از مدل‌های بیرچاک و همکاران (۲)، دالر (۳)، مالیکی و همکاران (۴)، والی (۵)، تاپ و همکاران (۱) نشان داد. در بین مدل‌های بررسی شده، مدل تاپ دارای نتایج تا حدودی ضعیف‌تری نسبت به دیگر مدل‌ها بود. در بین خاک‌های تحت مطالعه، خاک‌های سطحی و عمقی قرسن و سطحی مزرعه دارای نتایج ضعیف‌تری نسبت به دیگر خاک‌ها بودند، علت آن به احتمال زیاد به دلیل شوری زیاد یا رس متفاوت این خاک‌ها بوده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد با استفاده از شبکه‌های عصبی و عامل‌های زود یافت فیزیکی، می‌توان مقدار رطوبت خاک را با دقت زیادتری اندازه‌گیری کرد.

### منابع

- ۱- عباسی، ف. ۱۳۷۸. واسنجی دستگاه TDR با استفاده از محفظه‌های مشکن آب جهت اندازه‌گیری غلظت املاح در دو خاک لومی و لوم ماسه‌ای. مجله تحقیقات آب و خاک ایران (مجله علوم کشاورزی ایران)، (۱) ۳۹، صفحات ۱۵۱-۱۶۲.
- 1- Birchak, J.R. Gardner, C.G., Hipp, J.E. and Victor, J.M. 1974. High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture. Proc. IEEE 62:93-98.
- 2- Bishop, C.M. 1995. Neural Network for Pattern Recognition, Oxford University Press, New York
- 3- Bohl, H. and Roth, K. 1994. Evaluation of dielectric mixing models to describe the ( $\Theta$ -Ka)-relation. p. 294-308. In Proceedings of Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications. Evanston, Illinois, 7-9 Sept. 1994.
- 4- Dasberg, S. and Hopmans, J.W. 1992. Time-domain reflectometry calibration for uniformly and none uniformly wetted sandy and clayey loam soils. Soil Science Society of America Journal. 56, pp. 1341-1345.
- 5- De Loor, G.P. 1964. Dielectric properties of heterogeneous mixtures. Appl. Sci. Res. B3:479-482
- 6- De Loor, G.P. 1968. Dielectric properties of heterogeneous mixtures containing water. J. Microwave Power 3(2):67-73.
- 7- Dirksen, C. and Dasberg, S. 1993. Improved Calibration of Time Domain Reflectometry Soil water Content Measurements. Soil Science Society of America Journal. 57: 660-667.
- 8- Dobson, M.C. Ulaby, F.T., Hallikainen, M.T. and

میزان ضریب دی الکتریک در مقدار رطوبت معین بیشتر نشان داده می‌شود [۱۸]، [۳۱]، [۲۷]، [۲۹]، [۲۴]. نتایج کانی‌شناسی در این مطالعه نشان داد که خاک سطحی و عمقی قرسن نوع رس متفاوت با بقیه خاک‌ها دارند (جدول ۱) و ممکن است علت نتایج ضعیف در این خاک‌ها به علت نوع رس باشد. نتایج مطالعات دیگر نشان داده است که رس‌های اسمکتایت بیشتر از دیگر کانی‌ها در میزان ضریب دی الکتریک موثر است [۲۳].

### ۳-۳ مقایسه مدل شبکه عصبی با مدل دالر، مدل بیرچاک و همکاران، مدل مالیکی و همکاران، مدل والی

مدل شبکه عصبی نتایج بهتر از مدل‌های بیرچاک و همکاران (۲)، دالر (۳)، مالیکی و همکاران (۴)، والی (۵)، تاپ و همکاران (۱) نشان می‌دهد. همان‌طوری که از جداول (۴) و (۵) مشخص است مقدار  $R^2$  و RMSE برای مدل‌های ذکر شده تفاوت معنی داری را نشان نمی‌دهد. باید توجه داشت که در مدل‌های ذکر شده مقدار RMSE نسبت به مدل شبکه عصبی در تمام خاک‌ها بیشتر می‌باشد. این موضوع نشان دهنده این است که مدل شبکه عصبی پیش بینی دقیق‌تری از مدل‌های ذکر شده نشان می‌دهد. مقدار دامنه خطا در مدل شبکه عصبی  $0.023-0.043$  و در مدل‌های دیگر میزان  $0.012-0.035$  متر مکعب در متر مکعب است. این یافته با نتایج پرسون و همکاران [۲۱] مطابقت دارد. یکی از مشکلات استفاده از مدل‌های مذکور اندازه‌گیری عامل‌های دیر یافت (از جمله  $K_p$ ) در این مدل‌ها است، که اندازه‌گیری این عامل‌ها در خاک بسیار مشکل می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از شبکه عصبی، بدون احتیاج به اندازه‌گیری عامل‌های دیر یافت و وقت گیر، مقدار رطوبت خاک با دقت زیاد اندازه‌گیری کرد. با توجه به مشکلات ذکر شده مقایسه این مدل‌ها با مدل شبکه عصبی مقدار  $R^2$  و RMSE در این مدل‌ها به ترتیب کمتر و بیشتر از دیگر مدل‌ها به دست آمد. دقت آن در مقایسه با مدل شبکه عصبی کمتر است. شبکه‌های عصبی یک روش یادگیری داده‌ها می‌باشد و همیشه ممکن است نتایج قابل قبولی ندهد. زمانی که یک نوع خاک مورد بررسی قرار می‌گیرد بهتر است تا برخلاف آخرین رابطه بین  $K_p-\theta$  بررسی شود. اگر شبکه عصبی نتایج خوبی برای پیش‌بینی رطوبت در این خاک ندهد، نباید از آن برای خاک مورد نظر استفاده کرد. اعتقاد بر این است که پیش‌بینی شبکه عصبی اگر داده‌های انتخاب شده با دامنه گسترده از بافت خاک و عامل‌های فیزیکی به کار برده شود بهبود پیدا می‌کند. دیگر عامل‌های تاثیرگذار بر روی ضریب دی الکتریک شامل شوری خاک، CEC، دما می‌باشند، که در این مطالعه بررسی نشده است.

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه از شبکه‌ها با توپولوژی متفاوت برای هر شبکه عصبی با تعداد لایه‌های ورودی متفاوت استفاده شد. در بین این توپولوژی‌ها، شبکه با توپولوژی سه لایه ورودی و ۱۰ لایه مخفی دارای کمترین RMSE بود. شبکه با سه ورودی شامل ضریب

2001. Using neural networks for calibration of time domain reflectometry measurements. *Hydrol. Sci. J.* 46:389–398.

21- Cosenza, Ph. and Tabbagh, A. 2004. Electromagnetic determination of clay water content: role of the microporosity. *Clay Science* 26: 21–36.

22- Rhoades, J.D., Manteghi, N.A., Shouse, P.J. and Alves, W.J. 1989. Soil electrical conductivity and salinity: new formulations and calibrations. *Soil Science Society of America Journal.* 53:433–439.

23- Roth, C. H., Malicki, M. A. and Plagge, R. 1992. Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements. *Journal of Soil Science*, 43:13–1:

24- 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.

25- Sun, Z.J., Young, G.D., McFarlane, R. and Chambers, B.M. 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.

26- Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research* 16: 574–582.

27- Topp, G.C., Zeglin, S. and 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.

28- Whalley, W.R. 1993. Considerations on the use of time-domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content. *Journal of Soil Science* 44: 1–9.

29- 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.

30- Yu, C., Warrick, W. and Conklin, M.H. 1999. Derived Functions of Time Domain Reflectometry for Soil Moisture Measurement. *Water Res. Res.* 35(6): 1789–1796.

31- Zegelin, S.J., White, I. and Russel, G.F. 1992. A critique of the Time Domain Reflectometry Technique for determining soil water content. In: Topp, G.C. (Ed.), *Advances in the measurement of soil physical*

El-Rayes, M.A. 1985. Microwave dielectric behavior of wet soil—Part II: Dielectric mixing models. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* GE-23:35–46.

9- Herkelrath, W.N., Hamburg, S.P. and Murphy, F. 1991. Automatic real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry. *Water Resources Research* 27: 857–864.

10- Hilhorst, M.A. Dirksen, C. Kampers, F.W.H. Feddes R.A. 2001. Dielectric relaxation of bound water versus soil matric pressure. *Soil Science Society of America Journal* 65: 311–314.

11- Hook, W.R. and Livingston, N.J. 1996. Errors in converting time domain reflectometry measurements of propagation velocity to estimates of soil water content. *Soil Science Society of America Journal.* 59: 35–41.

12- Jacobsen, O.H. and Schjønning, P. 1993a. A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture. *J. Hydrol.* 151: 147–157.

13- Jacobsen, O.H. and Schjønning, P. 1993b. Field evaluation of time domain reflectometry for soil water measurement. *J. Hydrol.* 151: 159–172.

14- Ledieu, J., de Ridder, P. and Dautrebande, S. 1986. A method of measuring soil moisture by time-domain reflectometry. *Journal of Hydrology* 88:319–328.

15- Malicki, M.A., Plagge, R. and Roth, C.H. 1996. Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil. *European Journal of Soil Science* 47: 357–366.

16- Nadler, A. 1991. Effect of soil structure on bulk electrical conductivity (ECa) using the TDR and 4P techniques. *Soil Science.* 152: 199–203.

17- O'Konski, C.T. 1955. Effect of Interfacial Conductivity on Dielectric Properties. *J. Chem. Phys.* 23: 1559

18- Patterson, D.E. and Smith, M.W. 1981. The measurement of frozen water content by time domain reflectometry: results from laboratory tests. *Can. Geotech. J.* 18: 131–144.

Pepin, S., Plamondon, A.P. and Stein, J. 1992. Peat water content measurement using time domain reflectometry. *Can. J. For. Res.* 22: 534–540.

19- Persson, M., Bellie, S. Ronny, B., Ole, Jacobsen, H. and Per Schjønning. 2002. Predicting the Dielectric Constant–Water Content Relationship Using Artificial Neural Networks. *Soil Science Society of America Journal.* 66:1424–1429.

20- Persson, M., Berndtsson, R. and Sivakumar, B.