

WYKORZYSTANIE METODY TDR DO CIĄGŁEGO POMIARU ZMIAN WARUNKÓW WILGOTNOŚCIOWYCH I TERMICZNYCH W PROFILU GLEBOWYM

Piotr Leciejewski

Streszczenie

W opracowaniu przedstawiono wyniki weryfikacji przyjętych równań kalibracyjnych sond TDR poprzez wyznaczenie zależności regresyjnej wyników pomiarów wilgotności metodą TDR z oznaczeniami wilgotności metodą grawimetryczną uznaną za standard. W latach 2005-2006 przeprowadzono badania terenowe ciągłego pomiaru wilgotności gleby na różnych głębokościach profilu glebowego oraz temperatury gleby. Otrzymane wyniki przedstawiono w formie wykresów zmiany uwilgotnienia gleby, na które dodatkowo nałożono wyniki pomiarów występujących w tym czasie opadów deszczu. Na podstawie analizy uzyskanych wyników można stwierdzić, że zastosowana w badaniach reflektometryczna metoda oznaczania wilgotności (TDR), cechowała się wysoką dokładnością i powtarzalnością pomiarów w zakresie badanej wilgotności gleby zmodyfikowanej dodatkiem hydrożelu. W pełni zautomatyzowany pomiar umożliwia zastosowanie techniki TDR do ciągłych pomiarów wilgotności gleby, zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i polowych.

Słowa kluczowe: TDR (reflektometria domenowo-czasowa), wilgotność gleby, sonda polowa do pomiaru wilgotności, temperatury i zasolenia gleby, hydrożel

APPLICATION OF TDR METHOD IN CONTINUOUS MEASUREMENT OF CHANGES IN MOISTURE AND TERMIC CONDITIONS OF A SOIL PROFILE

Abstract

In this paper the results of verification of the TDR probes calibration equations were presented. The estimation of regression dependence of the moisture measurement results using TDR in comparison to gravimetric methods (regarding as standard) was performed. In years 2005 and 2006 (from April to November) the field continues experiments of soil moisture measurements on different soil profile by using TDR probes as well as soil temperature on 5 cm depth were conducted. The results were shown as the changes of soil moisture plots on which the outcome of rainfalls on this time were placed. The analysis of the results suggested that time domain reflectometry technique is characterized by high accuracy and repeatability of measurements in the range of investigated soil moisture conditioned by hydrogel. Fully automatic measurement enables to use TDR technique for continuous measurements of soil moisture in both laboratory and field conditions.

Keywords: TDR (Time Domain Reflectometry), soil moisture, Field Probe for moisture, temperature and salinity of soil, hydrogel

Wstęp

Zawartość wody w glebie to jeden z najważniejszych parametrów decydujących o wzroście i rozwoju roślin. Stałe monitorowanie wilgotności jest szczególnie istotne w szkółkach leśnych zlokalizowanych na glebach lekkich i bardzo lekkich charakteryzujących się niską retencyjnością i bardzo szybkim tempem przesuszania. Dzięki stałemu monitoringowi można na czas reagować

na spadek zawartości wody w glebie i uzupełniać jej niedobory w wielkościach optymalnych. Pomiar wilgotności gleby prowadzone za pomocą prostych i niedrogich metod inwazyjnych, np. grawimetrycznej są trudne do wykonania na powierzchniach z rosnącym materiałem sadzeniowym, natomiast wynik pomiarów otrzymujemy dopiero po 24 godzinach od ich wykonania. W tym przypadku wysoką efektywnością charakteryzuje się technika reflektometrii domenowo – czasowej (TDR – Time Domain Reflectometry). Metoda ta polega na ocenie objętościowej wilgotności gleby w oparciu o pomiar jej względnej przenikalności elektrycznej i pozwala na przeprowadzenie szybkich, dokładnych, nieinwazyjnych (nie niszczących badanego obiektu) oraz w pełni automatycznych pomiarów zawartości wody w glebie. Sondy pomiarowe rozmieszczone na różnych głębokościach w profilu glebowym mogą mierzyć wilgotność i temperaturę gleby z zaprogramowanym krokiem czasowym (od kilku minut do kilkudziesięciu godzin) przez cały okres wegetacyjny. Reflektometryczny pomiar wilgotności stosowany od prawie 30 lat w fizyce gleby znalazł szerokie praktyczne zastosowanie, wykorzystuje się go m.in. do ustalania bilansów wodnych gleby czy określenia wielkości ewapotranspiracji. W niniejszej pracy oceniono jego przydatność do ciągłego pomiaru zmian warunków wilgotnościowych i termicznych w profilu glebowym w warunkach otwartej powierzchni szkółki leśnej w Julinku.

Cel i zakres pracy

Celem niniejszej pracy było określenie możliwości wykorzystania metody TDR do ciągłego monitorowania wilgotności i temperatury gleby w strefie korzeniowej w warunkach otwartej powierzchni szkółki leśnej.

Zakres prac obejmował:

- ocenę dokładności pomiaru wilgotności gleby metodą TDR w porównaniu do metody grawimetrycznej,
- pomiar wilgotności gleby w czasie i na różnych głębokościach profilu glebowego w warunkach terenowych.

Metodyka badań

W ramach badań wstępnych wykonano kalibrację aparatury pomiarowej TDR, czyli weryfikację równań wiążących objętościową wilgotność gleby z jej względną przenikalnością elektryczną (Malicki 1993 i 1999). Oznaczenia te wykonano w celu sprawdzenia czy dodatek hydrożelu nie wpływa istotnie na wyniki pomiaru wilgotności rejestrowanej za pomocą sond pomiarowych TDR. W tym celu pobrano wierzchnią warstwę gleby do głębokości 15 cm z kwatery nr 5 szkółki leśnej w Julinku, następnie wymieszano ją i podzielono na 5 części. Każdą część, oprócz próby kontrolnej, wymieszano z założonym dodatkiem hydrożelu (w dawce 0,5; 2; 4; i 6 gram na litr gleby). Następnie każdą część gleby z założonym dodatkiem hydrożelu oraz próbę kontrolną rozłożono do sześciu pojemników (łącznie 30 pojemników). W każdym wariancie do pierwszego pojemnika dodawano niewielkimi porcjami wodę destylowaną i mieszano z glebą, aż do uzyskania takiego stanu mieszaniny, że w trakcie mieszania na jej powierzchni zaczęła wydzielać się woda. W każdym przypadku dokładnie mierzono ilość dodawanej wody. Do pozostałych 5 pojemników dodawano wodę w następujących dodatkach 5/6, 4/6, 3/6, 2/6 i 1/6 ilości, która została dodana do pierwszego pojemnika. Tak przygotowane próbki poddano 3-krotnemu pomiarowi wilgotności sondą TDR w temp ok. 180C, a następnie pomiarowi grawimetrycznemu. W celu weryfikacji przyjętych równań kalibracyjnych sond TDR wyznaczono zależność regresyjną wyników pomiarów wilgotności metodą TDR i porównano z oznaczeniami wilgotności metodą grawimetryczną uznaną za standard. Następnie porównano stałe regresji i współczynniki kierunkowe.



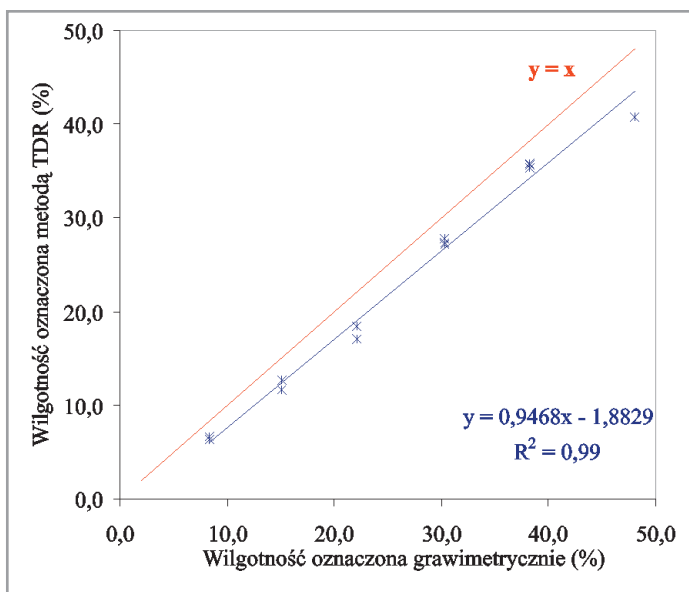
Fot. 1. Polowy system monitorowania parametrów fizykochemicznych gleb w trakcie instalacji
Photo 1. Field monitoring system of physico-chemical soil parameters during installation

W latach 2005 i 2006 (w okresie od końca kwietnia do listopada) dokonano ciągłych pomiarów wilgotności i temperatury gleby w warunkach otwartej powierzchni szkółki leśnej w Julinku. Do oznaczeń wykorzystano polowy system monitorowania parametrów fizykochemicznych gleb i gruntów (fot. 1), w całości zaprojektowany i wykonany w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie, składający się z: urządzenia pomiarowego MIDL – Multi Interface Data Loger i polowych sond pomiarowych FP/mts – (Field Probe for moisture, temperature and salinity of soil) (MIDL 2004; Skierucha 1999; Skierucha i in. 2004a i b; TDR 2005).

Wyniki pomiarów rejestrowano na przenośnych kartach pamięci MMC, które można odczytać i skopiować przy pomocy czytnika kart, dołączonego do stacjonarnego komputera PC.

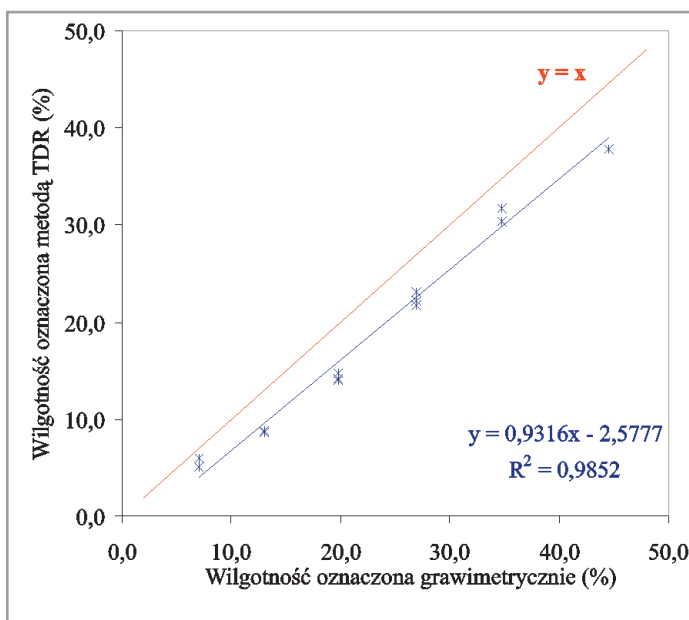
Wyniki

Zastosowany sprzęt pomiarowy miał zainstalowane standardowe funkcje kalibracyjne stosowane przy oznaczaniu wilgotności gleb mineralnych. Powstało zatem pytanie, czy dodatek hydrożelu do gleby nie spowoduje błędów pomiarowych (nie wpłynie na dokładność pomiarów). W celu wyjaśnienia tego zagadnienia dokonano oceny dokładności pomiarów metodą TDR porównując zależność regresyjną uzyskanych wyników pomiarów wilgotności [% obj.] metodą TDR i oznaczeń wilgotności metodą grawimetryczną uznanej za standard. Wyniki porównań przedstawiono (ryc. 1-5 i tab. 1) osobno dla próbek z poszczególnymi dodatkami hydrożelu w ilości 0,5; 2; 4 i 6 g/dm³ oraz wariantu kontrolnego – bez dodatku hydrożelu.



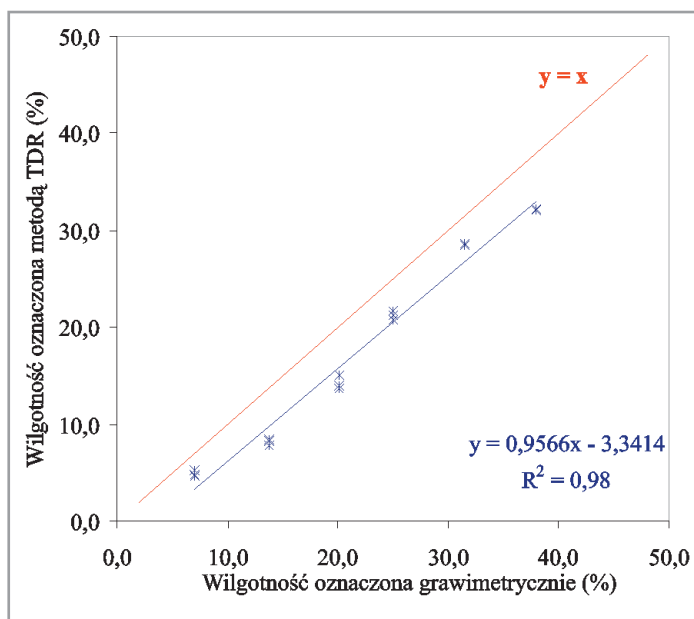
Ryc. 1. Porównanie wilgotności oznaczonej metodą TDR i gravimetryczną dla wariantu 6,0 g/dm³, n=18

Fig. 1. The comparison of the moisture determined by TDR and gravimetric methods for dose of 6,0 g/dm³ hydrogel, n=18



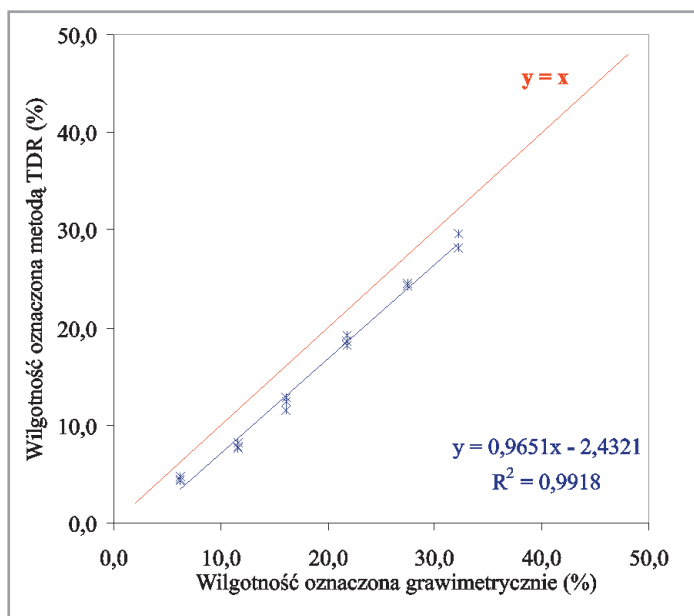
Ryc. 2. Porównanie wilgotności oznaczonej metodą TDR i gravimetryczną dla wariantu 4,0 /dm³, n=18

Fig. 2. The comparison of the moisture determined by TDR and gravimetric methods for dose of 4,0g/dm³ hydrogel, n=18



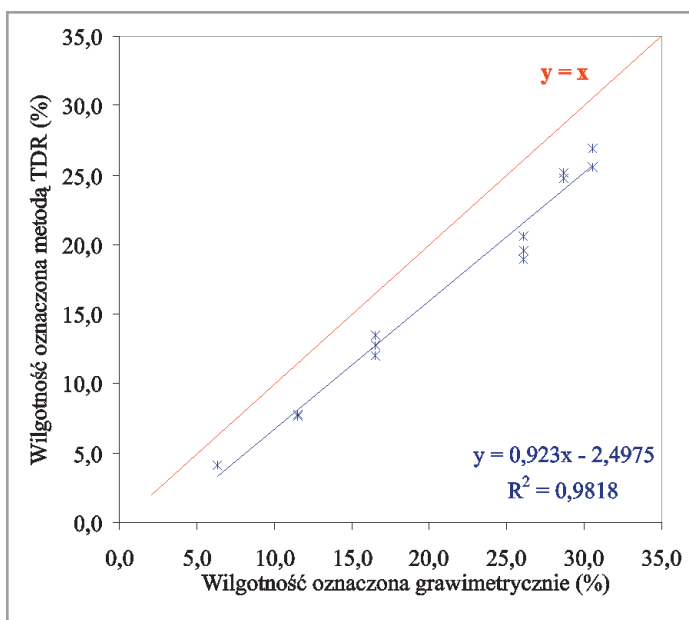
Ryc. 3. Porównanie wilgotności oznaczonej metodą TDR i grawimetryczną dla wariantu 2,0 g/dm³, n=18

Fig. 3. The comparison of the moisture determined by TDR and gravimetric methods for dose of 2,0 g/dm³ hydrogel, n=18



Ryc. 4. Porównanie wilgotności oznaczonej metodą TDR i grawimetryczną dla wariantu 0,5 g/dm³, n=18

Fig. 4. The comparison of the moisture determined by TDR and gravimetric methods for dose of 0,5 g/dm³ hydrogel, n=18



Ryc. 5. Porównanie wilgotności oznaczonej metodą TDR i grawimetryczną dla wariantu kontrolnego (bez dodatku hydrożelu), $n=18$

Fig. 5. The comparison of the moisture determined by TDR and gravimetric methods for control (no hydrogel), $n=18$

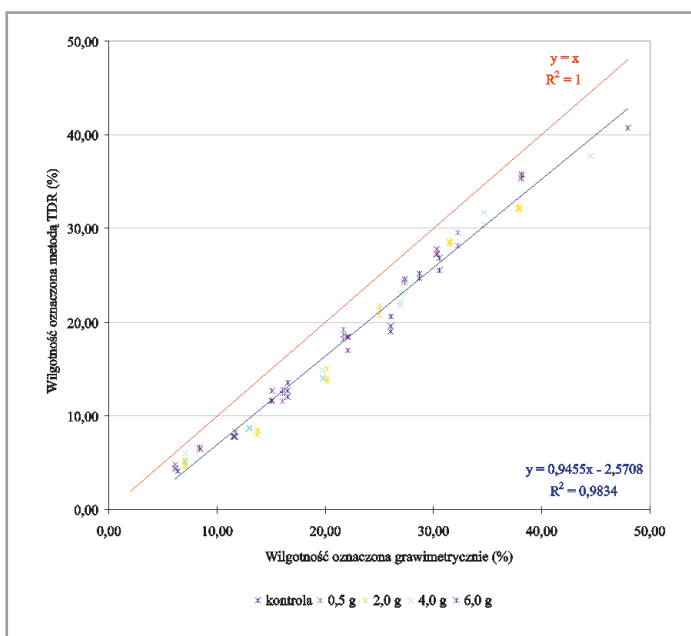
Tab. 1. Statystyczna istotność zależności regresyjnych wilgotności oznaczonej metodą TDR w porównaniu do grawimetrycznej, $\alpha=0,05$

Table 1. Statistical significance of regression dependence of the moisture determined by TDR method compared to gravimetric methods, $\alpha=0,05$

Wariant - dawka hydrożelu (g/dm ³)	stała	współczynnik kierunkowy	R ²	p-value (dla współczynnika kierunkowego)
0	-2,55732	0,933991	0,994	0,0254
0,5	-2,43213	0,965077	0,996	0,1209
2	-3,34138	0,956597	0,990	0,2135
4	-2,57769	0,931602	0,995	0,0329
6	-1,88287	0,946757	0,995	0,0459

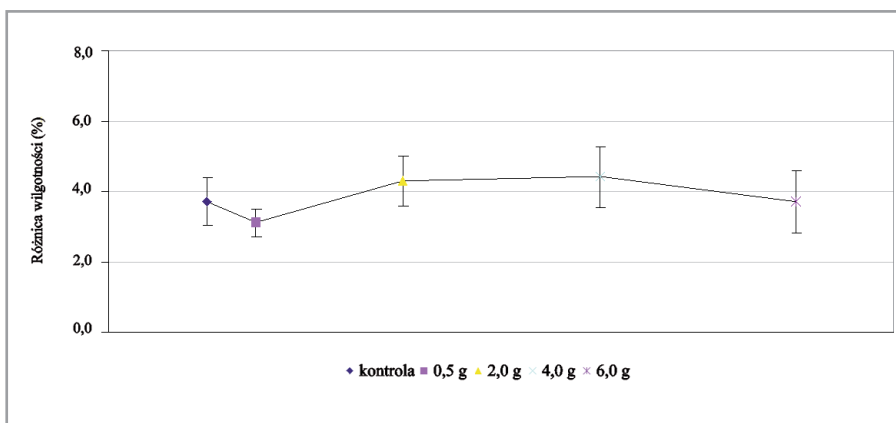
Na podstawie analizy zależności regresyjnych wilgotności oznaczonej metodą TDR i grawimetryczną stwierdzono występowanie statystycznie istotnych różnic pomiędzy obiema metodami pomiarów przy wariancie 6 g/dm³ ($p=0,0459$).

Podobne zależności zaobserwowano w przypadku wariantu 4 g/dm³ ($p=0,0329$) i grupy kontrolnej ($p=0,0254$). Stałe równań regresji statystycznie nie różniły się między sobą. Różnice pomiędzy zależnościami dotyczyły tylko współczynników kierunkowych. Oznacza to, że proste nie są równoległe i różnią się tangensem kąta nachylenia względem osi „x”. Powyższych obserwacji nie potwierdzają porównania wilgotności oznaczonej obiema metodami w wariantach 0,5 g/dm³ i 2 g/dm³. W tych przypadkach liniowe zależności pomiarów wilgotności metodą TDR i grawimetryczną nie różniły się między sobą.



Ryc. 6. Porównanie wilgotności oznaczanej metodą TDR i grawimetryczną dla różnych dodatków hydrożelu w ilości 0,5; 2,0; 4,0 i 6,0 g/dm³ oraz kontrola (bez dodatku hydrożelu), n=90

Fig. 6. The comparison of the moisture determined by TDR and gravimetric methods for different doses 0,5; 2,0; 4,0 i 6,0 g/dm³ of hydrogel and control (no hydrogel), n=90



Ryc. 7. Średnie różnice w wynikach pomiaru wilgotności metodą TDR w stosunku do grawimetrycznej dla próbek z dodatkiem hydrożelu w ilości 0,5; 2,0; 4,0 i 6,0 g/dm³ oraz kontrola bez dodatku hydrożelu, $\pm 2*SE$, n=90

*Fig. 7. Mean differences in the results of moisture measurements by TDR methods in comparing to gravimetric method for samples conditioned by the dose of 0,5; 2,0; 4,0 i 6,0 g/dm³ of hydrogel, $\pm 2*SE$, n=90*

Tab. 2. Statystyczna charakterystyka średnich różnic wilgotności oznaczanej metodą grawimetryczną i TDR dla próbek z różnymi dodatkami hydrożelu ($p=0,6109$, $\alpha=0,05$)

Table 2. Statistical properties of the mean differences between the moisture determined by gravimetric and TDR methods for samples conditioned by different doses of hydrogel ($p=0,6109$, $\alpha=0,05$)

Wariant – dawka hydrożelu (g/dm ³)	Średnia różnica wilgotności (% objętościowy)	Błąd Standardowy	Statystyczna istotność różnic
0,5	3,1	0,3292	X
6	3,7	0,2047	X
0	3,7	0,3614	X
2	4,3	0,4219	X
4	4,4	0,4433	X

Biorąc pod uwagę powyższe analizy wyznaczono także zależność regresyjną wyników pomiarów wilgotności metodą TDR łącznie dla wszystkich wariantów doświadczenia i porównano ją z metodą grawimetryczną.

Zależność regresyjna wilgotności oznaczanej metodą TDR łącznie dla wszystkich wariantów doświadczenia istotnie statystycznie różni się od standardu ($p=0,0001$). Różnice te dotyczą zarówno stałych regresji, jak i współczynników kierunkowych, co oznacza, że obie linie regresji nie są równoległe.

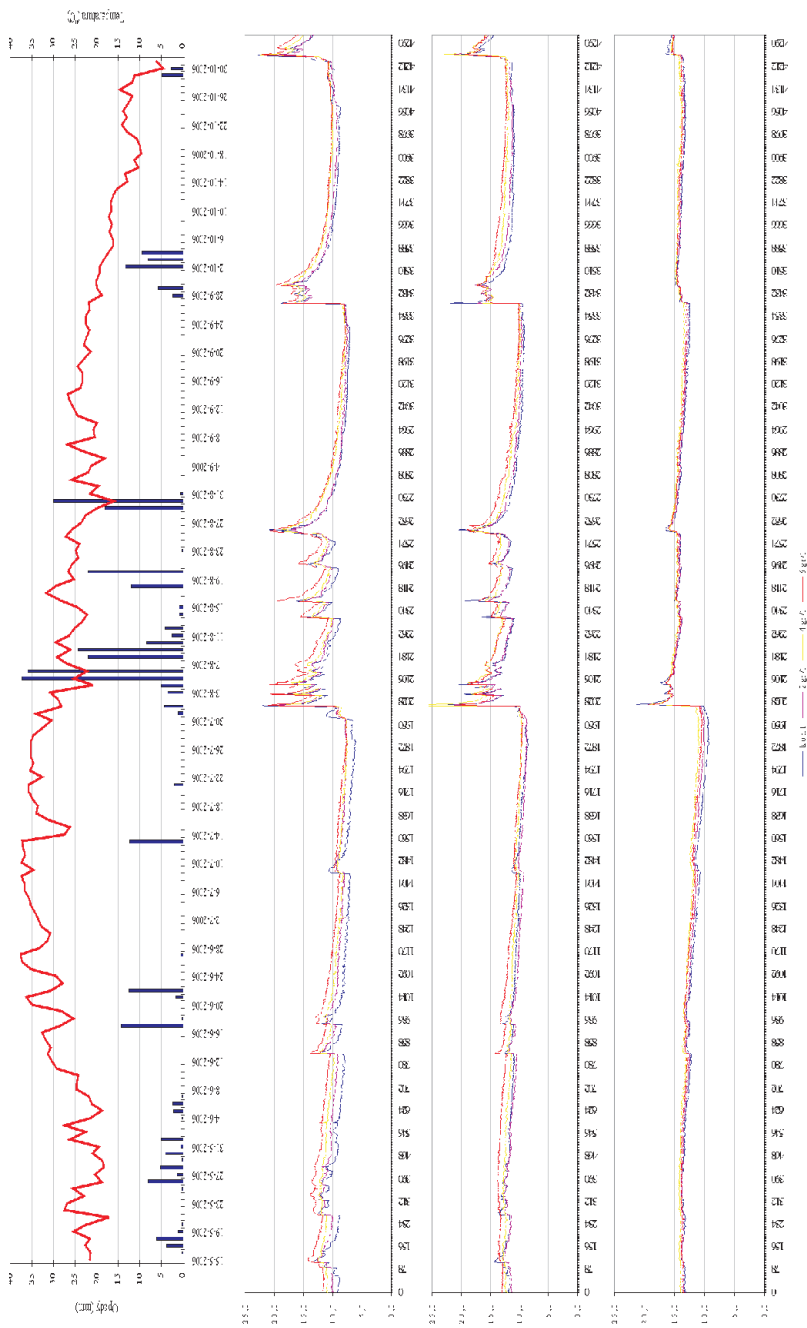
Nie zaobserwowano natomiast istotnych różnic pomiędzy współczynnikami kierunkowymi zależności regresyjnych w poszczególnych wariantach doświadczenia (0,5; 2; 4 i 6 g/dm³ oraz wariantu kontrolnego – bez dodatku hydrożelu) – $p=0,9974$, co oznacza, że liniowe zależności są równoległe i nie różnią się między sobą tangensem kąta nachylenia względem osi „x”. Na tej podstawie można założyć, że wielkość dodatku hydrożelu nie wpływa na dokładność pomiaru wilgotności metodą TDR, co potwierdza także rozkład wyników przedstawionych na (ryc. 6) oraz wysoki współczynnik korelacji R^2 wszystkich pomiarów dla poszczególnych wariantów doświadczenia.

W celu zweryfikowania powyższych obserwacji, obliczono i analizowano statystycznie procentową różnicę w wynikach pomiarów uzyskiwanych metodą TDR w porównaniu do grawimetrycznej dla wszystkich dodatków hydrożelu i wariantu kontrolnego (ryc. 7 i tab. 2).

Analizy wariancji i test Tukeya ostatecznie potwierdzają, że wielkość dodatku hydrożelu nie wpływa na dokładność pomiarów wykonywanych metodą TDR, czego dowodem jest brak istotnych różnic między wynikami uzyskiwanymi w grupie kontrolnej i wariantach doświadczenia z dodatkiem hydrożelu. Nie zaobserwowano też istotnego zróżnicowania badanej cechy pomiędzy poszczególnymi wariantami z dodatkiem hydrożelu.

W latach 2005-2006 (w okresie od końca kwietnia do listopada) przeprowadzono badania terenowe ciągłego (w odstępach 2-godzinnych) pomiaru wilgotności gleby (na kwaterze nr 5 szkółki leśnej w Julinku) na różnych głębokościach profilu glebowego za pomocą sond TDR oraz temperatury gleby na głębokości 5 cm.

Otrzymane wyniki przedstawiono w formie wykresów zmiany uwilgotnienia gleby, na które dodatkowo nałożono wyniki pomiarów występujących w tym czasie opadów deszczu. Wyniki pomiarów z 2006 r. w formie poglądowej przedstawiono na ryc. 8.



Ryc. 8. Rozkład opadów i temperatury gleby (na głębokości ok. 5 cm) oraz wykresy zmian uwilgotnienia w kolejnych godzinach pomiaru na głębokości ok. 5, 10 i 20 cm profilu glebowego wzbogaconego dodatkiem hydrożelu w ilości 2,0; 4,0 i 6,0 g/dm³ oraz kontrola bez dodatku hydrożelu w 2006 r.

Fig. 8. Distribution of rainfalls and soil temperature (on 5 cm depth) and changes of soil moisture charts in the following measurement hours on 5, 10 i 20 cm depth of soil profile conditioned by the dose of 2,0; 4,0 i 6,0 g/dm³ of hydrogel and control (no hydrogel) in 2006 year

Porównując krzywe uwilgotnienia gleby na głębokości ok 5 i 10 cm (ryc. 8) można stwierdzić, że dodatek hydrożelu korzystnie wpływał na poprawę właściwości wilgotnościowych gleby w całym analizowanym okresie, czego wyrazem są wyższe wartości średniej wilgotności w całym okresie obserwacji dla wszystkich wariantów z hydrożelem w porównaniu do kontroli. Tempo przesychnienia gleby odzwierciedla układ zmian uwilgotnienia gleby bezpośrednio po zanotowanym opadzie deszczu. Gleba bez dodatku hydrożelu charakteryzowała się największym ubytkiem wody i przesychniała najszybciej w pierwszych dniach po wystąpieniu opadu deszczu, w następnych dniach tempo przesychnienia gleby zmniejszyło się i było zbliżone do pozostałych wariantów doświadczenia.

Wpływ superabsorbenta na uwilgotnienie gleby zaznaczył się także na głębokości ok. 20 cm, czyli w strefie pod warstwą gleby wymieszanej z hydrożelem. W całym okresie pomiarowym wilgotność gleby w wariantach pod warstwą z dodatkiem hydrożelu była zbliżona i nieco wyższa od kontroli. Zasadnicze różnice dotyczyły natomiast tempa przesychnienia gleby, które było najwyższe dla wariantu 2 g/dm³ i dla kontroli, co skutkowało największą procentową utratą wody na koniec okresu pomiarowego ok. 5%. Gleby w wariantach 4 i 6 g/dm³ charakteryzowały się najniższym tempem przesychnienia, tracąc minimalne ilości wody w całym analizowanym okresie.

Dyskusja

Analiza wpływu dodatku hydrożelu do gleby na dokładność pomiaru metody TDR nie potwierdziła fabrycznie zainstalowanych funkcji kalibracyjnych miernika. Wyniki uzyskane metodą reflektometryczną w porównaniu do metody grawimetrycznej (uznanej za standard) były średnio o ok. 3% niższe. Najmniejsze zróżnicowanie pomiędzy obiema metodami zaobserwowano przy niskiej wilgotności próbek pomiarowych. Wraz ze wzrostem wilgotności gleby zwiększała się różnica pomiędzy wilgotnością oznaczaną za pomocą obu metod, co potwierdziła analiza porównawcza liniowych zależności regresyjnych. Wyniki pomiarów metodą TDR układały się pod linią regresji wyznaczoną dla metody grawimetrycznej i wraz ze wzrostem wilgotności znacznie od niej odbiegały, na co wskazują statystycznie istotne różnice współczynników kierunkowych jak i wielkość stałych regresji.

Porównanie zależności regresyjnych poszczególnych wariantów doświadczenia wskazuje na brak zróżnicowania między nimi, co świadczy o dokładności oznaczeń i braku istotnego wpływu dodatku hydrożelu na dokładność pomiarów metodą TDR. Natomiast wyniki oznaczeń wilgotności uzyskiwane metodą TDR w porównaniu do metody grawimetrycznej były obarczone stałym błędem niedoszacowania. Różnice w wynikach oznaczeń zwiększały się wraz ze wzrostem wilgotności gleby, co można tłumaczyć niedopasowaniem krzywej kalibracyjnej do rodzaju gleby. Uzyskane wyniki wskazują na potrzebę skorygowania krzywych kalibracyjnych miernika, jednocześnie pokazując, że technika TDR jest dokładna i może być przydatna w badaniach dynamiki warunków wilgotnościowych gleby w warunkach polowych. Według Mojid i Cho (2004) metoda TDR przeszacowuje pomiary wilgotności w piasku zawierającym korzenie roślin, a niedoszacowuje w glebie ilastej z korzeniami. TDR jest bardziej dokładny w glebach o niskiej zawartości wody niż przy wyższej wilgotności. Jak podaje Walker i in. (2004) zgodnie z deklaracją producentów metoda TDR pozwala na uzyskanie wyników pomiarów wilgotności z dokładnością $\pm 2,5\%$ w stosunku do metody grawimetrycznej. Choć w praktyce przy różnej wilgotności wyniki pomiarów metodą TDR mogą odbiegać od standardu, zwłaszcza w glebach bardzo suchych lub zbyt wilgotnych.

Z kolei Mastrorilli i in. (1998) oraz Feichtinger i Scheidl (2004) podkreślają wysokie dopasowanie metody TDR do pomiarów grawimetrycznych w szerokim zakresie wilgotności gleby. W doświadczeniu laboratoryjnym prowadzono pomiar wilgotności za pomocą miernika wilgotności TDR. Odpowiednie zawartości wody w glebie były dostępne za pomiarów grawimetrycznej zawartości wody oraz gęstości objętościowej gleb. Uzyskane wyniki potwierdziły fabrycznie zainstalowane funkcje kalibracyjne miernika oraz wykazały brak przesunięcia czasowego w zastosowanym systemie TDR. Dlatego większość autorów podkreśla, że pomiar wilgotności gleby metodą TDR jest powszechnie stosowany i uznany za sprawdzoną i przyjętą metodę pomiaru wilgotności gleb, pomimo relatywnie krótkiej, bo około 20 letniej historii stosowania w fizyce gleb (Wraith i Das 1998; Skierucha i Malicki 2004a i b). Technika TDR jest wykorzystywana w warunkach laboratoryjnych, jak i polowych, np.: do oznaczeń wilgotności gruntu w wybranych profilach glebowych. Pomiar można wykonywać jednocześnie na różnych głębokościach, w warstwach charakteryzujących się dużymi różnicami zawartości wody (Larossa Rodriguez i in. 1999; Somorowska 2004). Dodatkową zaletą techniki TDR jest jej nieinwazyjność, co pozwala na wielokrotny pomiar tego samego obszaru. Reflektometria w domenie czasu lub w domenie częstotliwości umożliwia ciągle monitorowanie statusu wody, dla dowolnie krótkich przedziałów czasowych (Malicki 1999). W badaniach Janik (2006) wykazano jej przydatność do ustalenia bilansu wodnego wierzchniej warstwy gleby, co pozwala na oszacowanie parowania z powierzchni gleby bez roślin.

Metoda reflektometryczna wykorzystywana jest także do pomiarów zawartości wody w strefie korzeniowej, ułatwiając określenie bilansu wodnego (Li i in. 2002; Gácsi i in. 2004; Mojid i Cho 2004). Pomiar wilgotności metodą TDR są w pełni zautomatyzowane i cechują się dużą dokładnością oraz niezawodnością oznaczeń (Skierucha i Malicki 2004a i b; Skierucha 2005).

Wnioski

- Wyniki pomiaru wilgotności uzyskane metodą refraktometryczną za pomocą aparatury TDR ze standardową kalibracją (dla gleb mineralnych) w porównaniu do metody grawimetrycznej, były średnio o ok. 3% niższe, co wskazuje na potrzebę skorygowania fabrycznie zainstalowanych krzywych kalibracyjnych miernika. Jest to szczególnie ważne, jeżeli porównywane są wyniki pomiarów wykonywanych na różnych glebach.
- Zastosowana w badaniach reflektometryczna metoda oznaczania wilgotności (TDR), cechowała się wysoką dokładnością i powtarzalnością pomiarów w zakresie badanej wilgotności gleby z różnymi dodatkami hydrożelu. Możliwość automatyzacji pomiarów sprawia, że technikę TDR można stosować do ciągłych pomiarów wilgotności gleby zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i polowych.

Literatura

- Feichtinger F., Scheidl A. 2004. Experiences with a TDR-moisture in laboratory investigations. *Acta Agrophysica* 4 (1): 37-41.
- Gácsi Z., Rajkai K., Hagyó A. 2004. TDR detected and simulated soil water content dynamics of managed forest stands. *Acta Ahrophysica* 1: 43-50.
- Janik G. 2006. Dynamika wilgotności wierzchniej warstwy gleby jako informacja o intensywności parowania. *Acta Agrophysica* 8 (1): 103-117.

- Larossa Rodriguez C.G., da Cunha Neto J.A.B., Prata A.T. 1999. Using time domain reflectometry to measure moisture content discontinuity. *Experimental Thermal and Fluid Science* 20: 25-33.
- Li Y., Wallach R., Cohen Y. 2002. The role of soil hydraulic conductivity on the spatial and temporal variation of root water uptake in drip-irrigated corn. *Plant and Soil* 243: 131-142.
- Malicki M.A. 1993. Wpływ fizycznych właściwości gleby na elektryczne parametry układu elektrody/gleba w aspekcie pomiaru jej wilgotności i zasolenia. *Acta Agrophysica*, rozprawa habilitacyjna, Instytut Agrofizyki PAN w Lublinie.
- Malicki M.A. 1996. Elektryczny pomiar wilgotności i zasolenia gleby z zastosowaniem techniki reflektometrycznej (TDR). *Zeszyty Problemowe Postępu Nauk Rolniczych* 429: 215-221.
- Mastrorilli M., Katerji N., Rana G., Nuona B.B. 1998. Daily actual evapotranspiration measured with TDR technique in Mediterranean conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* 90: 81-89.
- MIDL 2004. Urządzenie do polowego systemu monitorowania parametrów fizyko-chemicznych gleb i gruntów z zastosowaniem komunikacji bezprzewodowej. *INSTRUKCJA OBSŁUGI*. Instytut Agrofizyki PAN, Lublin.
- Mojid M.A., Cho H. 2004. Evaluation of the time-domain reflectometry (TDR)- measured composite dielectric constant of root-mixed soils for estimating soil-water content and root density. *Journal of Hydrology* 295: 263-275.
- Skierucha W. 1999. Wpływ temperatury na przenikalność dielektryczną gleby w aspekcie reflektometrycznego (TDR) pomiaru jej wilgotności objętościowej. *Acta Agrophysica* 22, 163-172.
- Skierucha W. 2005. Wpływ temperatury na pomiar wilgotności gleby metodą reflektometryczną. *Acta Agrophysica* 122. Monografia. Instytut Agrofizyki PAN, Lublin.
- Skierucha W., Malicki M.A. 2004a. TDR method for the measurement of water content and salinity of porous media. Monografia. Instytut Agrofizyki PAN, Lublin.
- Skierucha W., Malicki M.A., 2004b: Zintegrowany przełącznik mikrofalowy w systemie automatycznego pomiaru wilgotności gleby metoda TDR. *Acta Agrophysica* 4 (3): 803-808.
- Skierucha W., Wilczek A., Walczak R.T. 2004a. Polowy system monitorowania parametrów fizykochemicznych gleb i gruntów. *Acta Agrophysica* 4 (2): 533-545.
- Skierucha W., Wilczek A., Walczak R.T. 2004b. Monitoring systems for verification of mass and energy transport models in porous media. Monografia. Instytut Agrofizyki PAN, Lublin.
- Somorowska U. 2004. Water storage in the vadose zone evaluated from TDR soil moisture measurements. *Acta Agrophysica* 1: 169-176.
- TDR. 2005. *MANUAL – FOM/mts and TDR/MUX/mpts*. Instytut Agrofizyki PAN, Lublin.
- Walker J.P., Wilgoose G.R., Kalma J.D. 2004. In situ measurements of soil moisture: a comparison of techniques. *Journal of Hydrology* 293: 85-99.
- Wraith J.M., Das B.S. 1998. Monitoring soil water and ionic solute distributions using time-domain reflectometry. *Soil & Tillage Research* 47: 145-150.

Piotr Leciejewski

Katedra Użytkowania Lasu
Wydział Leśny SGGW
Piotr.leciejewski@wl.sggw.pl