

ANDRZEJ GÓRNIK, MARIUSZ MATYKA¹

*Instytut Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy w Puławach
Zakład Systemów i Ekonomiki Produkcji Roślinnej*

METODY MONITORINGU WILGOTNOŚCI GLEBY

Nadesłany: 24.08.2015 Zaakceptowany do druku: 28.04.2015

1. Wstęp

Woda jest jednym z najczęściej występujących w środowisku przyrodniczym związków chemicznych. Charakteryzuje się wysokim potencjałem biologicznym i ma bardzo ważne znaczenie w cyklu wodnym. Należy również zaznaczyć, że woda stanowi nośnik substancji odżywczych, który jest dostarczany przy pomocy systemu korzeniowego znajdującego się w strefie ryzosfery [Chełmicki 2001, Lewak in. 2009]. Wzrost temperatury powietrza w okresie wegetacyjnym roślin, jak również występowanie okresów z opadami mniejszymi niż średnie oraz okresów bezopadowych powoduje występowanie zjawiska suszy [Kozyra 2009]. Przy niedostatecznym uwilgotnieniu gleby rośliny potrafią przez dłuższy czas być w stanie stresu wodnego, który objawia się więdnieniem, zahamowaniem wzrostu oraz chlorozą liści. Ze względu na fakt coraz częstszego występowania suszy, w wielu krajach pojawiła się potrzeba monitorowania tego zjawiska [Kręgiel i in. 2009]. Warto również zaznaczyć, że uprawa w warunkach nadmiernego uwilgotnienia gleby powoduje wyparcie tlenu z wolnych przestrzeni glebowych oraz w konsekwencji stres związany z deficytem tlenu. Uprawa roślin w takich warunkach skutkuje zamieraniem korzeni, spowolnieniem wzrostu oraz chlorozą liści [Sitarek i in. 2011]. Należy również podkreślić, że wyniki otrzymane z pomiarów wilgotności gleby stanowią cenną informację wykorzystywaną w systemach wspierania decyzji w nawodnieniach, będąc jednocześnie czynnikiem optymalizującym

¹ Wkład pracy: Andrzej Górnik – 80 %, Mariusz Matyka – 20 %.

wykorzystanie zasobów wody [Treder 2011]. Wilgotność gleby można definiować na wiele sposobów, jednak najbardziej odpowiednim jest określenie wilgotności zamieszczone w Międzynarodowym Słowniku Hydrologicznym, który opisuje ją jako wodę zawartą w strefie aeracji, znajdującą się powyżej zwierciadła wód gruntowych, razem z parą wodną występującą w porach gruntu [Międzynarodowy Słownik Hydrologiczny 2001]. Ogólnie wilgotność gleby można wyrażać w jednostkach masy [$\text{kg}^1 \cdot \text{kg}^{-1}$], [%wag] jako wilgotność wagową, lub w jednostkach objętościowych [$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$], [%obj] jako wilgotność objętościową. Według definicji wilgotność wagową opisuje stosunek masy wody zawartej w danej próbce gleby do suchej masy tej próbki. W praktyce wilgotność znacznie częściej wyrażana jest w jednostkach objętościowych. Można wówczas zdefiniować ją jako stosunek objętości wody w analizowanej próbce gleby do objętości całej próby. Należy również podkreślić, że zawartość wody nie jest jedynym parametrem umożliwiającym scharakteryzowanie stanu uwilgocenia gleby. Innym wyznacznikiem jest potencjał wodny w glebie, który umożliwia określenie siły z jaką woda jest zatrzymywana w glebie. Obniżanie się potencjału wody glebowej jest oznaką, że woda będzie trudniej dostępna dla roślin. Potencjał fazy ciekłej gleby może być wyrażony w jednostkach ciśnienia [Pa, bar, atm], natomiast przyjęło się określać go przy pomocy wskaźnika pF, jako dziesiętny logarytm ciśnienia ekwiwalentnego, który wyraża się w jednostkach długości [cm] [Turski M. i in. 2004, www.nawadnianie.inhort.pl].

Celem pracy jest zestawienie oraz porównanie metod pomiaru wilgotności gleby stanowiących istotne narzędzie do oceny coraz częściej nasilającego się zjawiska suszy, jak również optymalizacji wykorzystania zasobów wodnych stosowanych w systemach nawodnieniowych.

2. Ogólny podział metod pomiaru wilgotności gleby

Zasoby wodne gleb stanowią rozległy temat zainteresowań badawczych. Wszelkie procesy jakie zachodzą w glebie są silnie powiązane z jej wilgotnością i w związku z tym pomiar zawartości wody w glebie jest jednym z najistotniejszych problemów w agrotechnice i meteorologii [Biniak-Pieróg i in. 2012, Szafranski i in. 2009]. Niegdyś uzyskanie rzetelnych informacji dotyczących stanu uwilgotnienia gleb było ograniczone niedostateczną wiedzą na ten temat. W miarę upływu czasu rozwój metod pomiaru wilgotności gleby spowodował, że stawały się one coraz mniej pracochłonne, nie powodowały trwałych zmian właściwości fizykochemicznych gleby, były łatwiejsze w obsłudze, dokładniejsze oraz bardziej zaawansowane technicznie [Malicki 1980]. Ogólnie metody pomiarowe można podzielić na bezpośrednie i pośrednie. Różnice w podziale wynikają ze sposobu

otrzymywania ostatecznego wyniku pomiaru wilgotności gleby. W metodach pośrednich wilgotność gleby jest wyliczana z wielkości wartości mierzonej np. przenikalności dielektrycznej gleby, elektrooporności, przewodnictwa elektrycznego, czy przepływu neutronów. Wyznaczanie wilgotności gleby w sposób bezpośredni można przeprowadzać przy zastosowaniu metody termograwimetrycznej zwanej potocznie „suszarkową”. Za pomocą odpowiednio dobranej metody monitorowania wilgotności gleby można racjonalnie gospodarować zasobami wodnymi oraz stosować się do dobrych praktyk występujących w rolnictwie [Duer i in. 2004].

2.1. Metoda termograwimetryczna

Metoda termograwimetryczna została uznana za referencyjną dla innych pośrednich metod pomiarowych ze względu na jej dużą dokładność oraz prawdopodobieństwo wystąpienia niskiego błędu przeliczeniowego przy określaniu wilgotności. Polega ona na obserwacji strat masy próbki gleby występujących na skutek ogrzewania w temperaturze około 105°C do momentu całkowitego wysuszenia [Skierucha i in. 2014]. Warto nadmienić, że wynik pomiaru wilgotności metodą termograwimetryczną otrzymywany jest w procentach wagowych, a ich konwersja na procentową wartość objętości wilgotności wiąże się z umiejętnym i starannym pobraniem próbek gleby bez naruszenia jej struktury. Bywa to często czynnością trudną do wykonania, zwłaszcza w sezonie wegetacyjnym, kiedy gleba jest pokryta rośliną uprawną, dlatego z uwagi na małą uniwersalność tej metody w praktyce odchodzi się od jej stosowania. Oznaczanie wilgotności gleby za pomocą metody termograwimetrycznej odbywa się w sposób destrukcyjny. Struktura łanu rośliny uprawnej w miejscu wykonywania pomiaru ulega zniszczeniu, a pobranie dużej liczby prób gleby w konsekwencji przyczynia się do obniżenia wielkości plonu. Warto również podkreślić, że struktura oraz właściwości prób glebowych analizowanych metodą termograwimetryczną ulegają zniszczeniu na skutek odparowywania wody w wysokiej temperaturze [Biniak-Pieróg 2008].

2.2 Metoda elektrometryczna

Jedną z wielu polowych metod oznaczania wilgotności gleby jest metoda elektrometryczna nazywana również „oporową”. Jest to metoda pośrednia, w której za pomocą określenia oporu elektrycznego gleby wyznaczana jest wilgotność. Początki jej zastosowania w praktyce sięgają końca XIX wieku [Whitney i in. 1897, Landa i in. 2003]. Zasada działania metody elektrometrycznej opiera się na pomiarze rezystancji gleby. Oznaczenia dokonuje się za pomocą omomierza prądu zmiennego, który jest podłączony w układzie mostka Wheatstone’a. Na odpowiedniej głębokości gleby umieszcza się dwie metalowe elektrody w odległości nie przekraczającej kilkunastu centymetrów od siebie. Powyżej wierzchniej warstwy

gleby wyprowadza się przewody, które stanowią bezpośrednie połączenie pomiędzy elektrodami zamieszczonymi na wyznaczonej głębokości, a przenośnym miernikiem pracującym w układzie mostka Wheatstone'a. Wartość wilgotności uzyskuje się na podstawie odczytu oporu elektrycznego gleby i zobrazowaniu go na krzywej wykonanej podczas przeprowadzanych polowych pomiarów kalibracyjnych [Baranowski 1971]. Metoda elektrometryczna dobrze sprawdza się podczas prowadzenia ciągłych pomiarów zmienności uwilgotnienia gleb [Domżał i in. 1965]. Zostało podjętych wiele badań korygujących oraz prób modernizacji metody elektrometrycznej. Zaproponowano, aby gleby lekkie umieszczać w specjalnie zaprojektowanej elektrodzie naczyniowej oraz wywierać na nie nacisk podczas wykonywania pomiaru za pomocą prasy. Procentową wartość wilgotności uzyskiwano na skutek pomiaru oporu elektrycznego porównywanego na krzywej kalibracji wykonanej uprzednio na danej próbce gleby. Wyniki otrzymywane za pomocą metody elektrometrycznej są bardzo precyzyjne przy tworzeniu dynamiki wilgotności gleby, a dokładność pomiarowa wykazuje zbieżność z metodą termograwimetryczną [Dobrzański i in. 1964]. Niestety istnieją uboczne czynniki mające negatywny wpływ na oznaczanie wilgotności metodą elektrometryczną. Cząsteczki gleby w wyniku procesu nawadniania oraz wysychania wykazują tendencje do zwiększania i zmniejszania swojej objętości. W następstwie tego występuje zmienne pokrycie elektrod przez warstwę gleby, co negatywnie wpływa na zmiany pomiaru oporności. Metoda elektrometryczna jest również wrażliwa na zmiany zasolenia roztworu glebowego. Oznaczanie wilgotności metodą elektrometryczną w terminach intensywnego nawożenia mineralnego obarczone jest pewnym niedoszacowaniem, które wynika z występowania zmienności stężenia elektrolitów oraz różnorodności składu glebowego [Baranowski 1971].

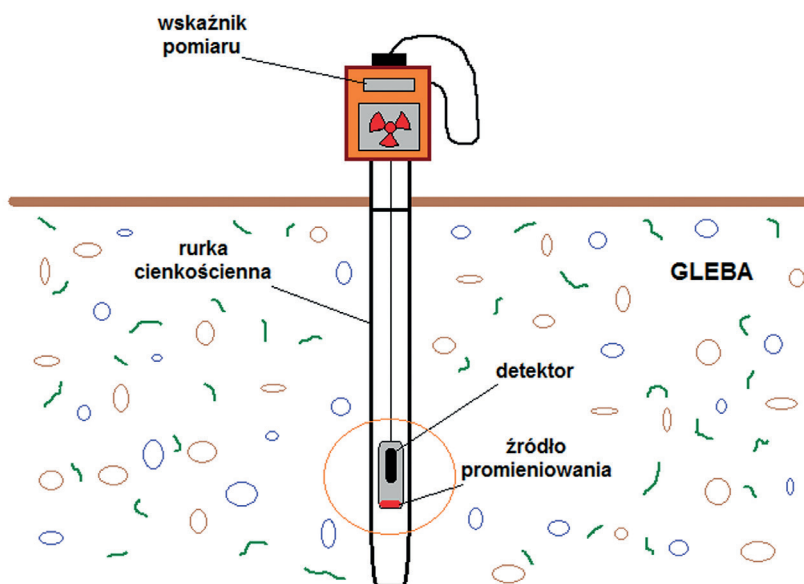
2.3 Metoda neutronowa

Wilgotność gleby można również monitorować za pomocą metody neutronowej, opracowanej w 1950 roku przez amerykańskich badaczy [Visvalingam i in. 1972]. Metoda neutronowa zaliczana jest do pośrednich metod pomiarowych, ponieważ zliczona przez detektor liczba spowolnionych neutronów jest przeliczana na wartość wilgotności po uprzedniej kalibracji metodą termograwimetryczną. Zasada działania metody neutronowej polega na penetracji gleby sondą, w której umieszczone jest źródło promieniowania oraz detektor. Materiały radioaktywne stanowiące źródło promieniowania w tego typu sondach stanowią izotopy ameryku oraz berylu. Źródło promieniowania oraz detektor wolnych neutronów są opuszczane oraz podnoszone w pionowej rurze zainstalowanej w glebie, dzięki czemu istnieje możliwość dokonania pomiaru na określonej głębokości. Szybkie neutrony emitowane przez źródło promieniowania są odbijane oraz spowalniane

przez jądra wodoru, znajdującego się głównie w cząsteczkach wody, a następnie zliczane są przez detektor wolnych neutronów [Trybała 1972, Klamkowski i in. 2010]. Z uwagi na fakt, że metoda neutronowa daje możliwość pomiaru w czasie rzeczywistym należy zaznaczyć, że przy jej pomocy można dokonać wielokrotnych obserwacji wilgotności na określonej głębokości profilu glebowego [Dorigo i in. 2011]. Pomiar wilgotności sondą neutronową trwa około dwóch minut. Wykonywany w powierzchniowej warstwie gleby do głębokości około 15 cm obarczony jest pewnym niedoszacowaniem, ze względu na uwalnianie części neutronów do atmosfery [Chanasyk i in. 1966]. W związku z tym konieczne jest wyrysowanie dodatkowej krzywej kalibracyjnej dla powierzchniowej warstwy gleby obarczonej niedoszacowaniem pomiaru [Hanson i in. 2007]. Zainstalowana sonda neutronowa do pomiaru wilgotności gleby została przedstawiona na rysunku 1.

Rysunek 1

Sonda neutronowa do pomiaru wilgotności gleby



Źródło: Opracowanie własne na podstawie [21].

Pomiar wilgotności gleby sondą neutronową powinien być skorygowany poprawkami kalibracyjnymi wynikającymi z różnego rodzaju gleb. Zmienna wartość ciężaru objętościowego gleby istotnie wpływa na pomiar wilgotności gleby metodą neutronową [Baranowski 1971]. Niewątpliwie wadą metody neutronowej są wysokie koszty związane z zakupem zestawu pomiarowego. Również dosyć poważnym mankamentem stosowania metody neutronowej jest konieczność prze-

prowadzania dodatkowej kalibracji sondy pomiarowej w przypadku pomiarów wilgotności gleb o zwiększonej zawartości materii organicznej [Klamkowski i in. 2010]. Do monitorowania wilgotności gleb przy zastosowaniu metody neutronowej personel obsługujący sondę powinien być odpowiednio przeszkolony do pracy z materiałami radioaktywnymi. Powinien również znać zasady bezpiecznego transportowania oraz przechowywania sond neutronowych.

2.4 Metoda TDR

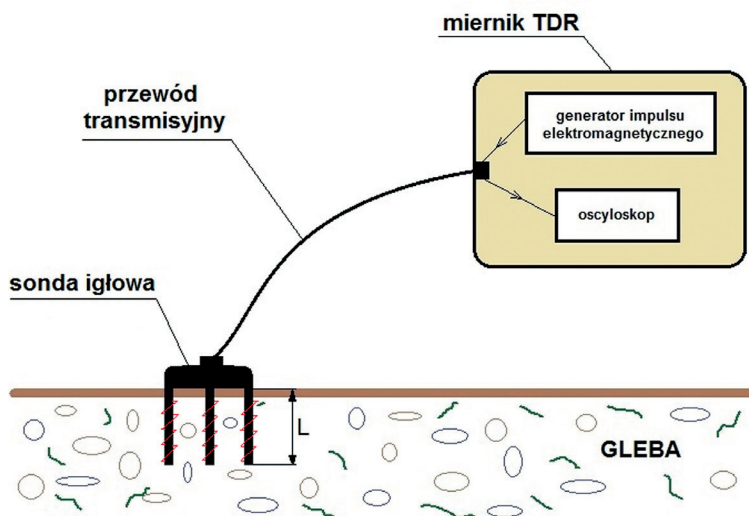
Kolejną metodą, za pomocą której można ocenić stopień uwilgotnienia gleby jest metoda TDR (*ang.: Time Domain Reflectometry*). Bazuje ona na pomiarze reflektometrycznym sygnału elektrycznego przeprowadzonym w domenie czasu. Metoda TDR jest stosowana od wielu lat w badaniach dotyczących oceny zawartości wody w suchej masie gleby. TDR zalicza się do pośrednich metod pomiarowych, ponieważ zasada działania oparta jest na oznaczeniu przenikalności dielektrycznej (stałej dielektrycznej) gleby, a następnie jej konwersji na wartość wilgotności. W trakcie wykonywania pomiaru mierzone jest opóźnienie impulsu fali elektromagnetycznej przebiegającej wzdłuż sond lub przewodników mających bezpośredni kontakt z glebą. W miarę wzrostu wilgotności w glebie następuje spadek prędkości rozchodzenia się impulsu fali elektromagnetycznej. Wynika to w głównej mierze ze zwiększonych strat energii do gleby [Gąsior i in. 2013]. Warto nadmienić, że względna przenikalność dielektryczna jest silnie powiązana z zawartością wody w różnych ośrodkach i dla ośrodka w fazie gazowej (powietrze) wynosi ok. 1, dla ośrodka w fazie stałej (sucha masa gleby) ok. 2-5, natomiast dla ośrodka w stanie ciekłym (woda w temperaturze 20°C) ok. 80. Przy zastosowaniu metody TDR można w sposób bezpośredni określić pozorną przenikalność dielektryczną gleby (ϵ_b) oraz pośrednio wyliczyć z niej wilgotność objętościową (θ_v). Na rysunku 2. został zobrazowany schemat aparatury do pomiaru wilgotności gleby metodą TDR.

Metoda TDR jest przydatnym rozwiązaniem w przypadku prowadzenia ciągłych pomiarów polowych dotyczących nawadniania oraz wysychania gleb [Pastuszka i in. 2014]. Ponadto należy podkreślić, że metoda TDR charakteryzuje się wieloma zaletami. Wynik objętościowej zawartości wody obarczony jest niewielkim błędem pomiarowym w granicach 1-2%. Przy zastosowaniu metody TDR istnieje możliwość sieciowego połączenia wielu sond i wykonywania pomiaru w tym samym czasie. Warto również nadmienić, że temperatura oraz zasolenie gleb nie wpływają istotnie na wynik pomiaru przy zastosowaniu metody TDR [Dalton i in. 1986]. Istnieją natomiast czynniki zakłócające wskazania aparatury pomiarowej. Zaliczyć należy do nich: przyleganie kamieni oraz korzeni roślinnych do elektrod sondy, zróżnicowanie gęstości gleby oraz występowanie niekontrolowanych przestrzeni powietrznych, jakie pozostawia po sobie woda i flora gle-

bowa [Kollarova i in. 2007]. Metoda TDR daje możliwość prowadzenia ciągłych serii pomiarów w określonych interwałach czasowych w różnych lokalizacjach, co jest niewątpliwie istotną zaletą podczas monitorowania procesów hydrologicznych zachodzących w glebie [Scott i in. 2002]. Należy również zaznaczyć, że monitorowanie wilgotności gleby przy zastosowaniu najnowszych technik transmisji danych może odbywać się poprzez sieć telefonii komórkowej, na drodze radiowej lub za pośrednictwem Internetu. Nowatorskie wykorzystanie technik transmisji danych daje możliwość prowadzenia ciągłych pomiarów wilgotności gleby z każdego miejsca na świecie [Skierucha i in. 2004].

Rysunek 2

Aparatura do pomiaru wilgotności gleby metodą TDR



Źródło: Opracowanie własne na podstawie [Dalton i in. 1986].

2.5 Metoda pojemnościowa i metoda FDR

Do pośrednich sposobów polowego pomiaru zawartości wody w glebie stosuje się wilgotnościowe sondy pojemnościowe. Metoda pojemnościowa polega na wyznaczeniu stałej dielektrycznej, która otrzymywana jest na podstawie czasu ładowania kondensatora zainstalowanego w badanym ośrodku glebowym. Sondy pojemnościowe są zbudowane z pary elektrod, które stanowią czujnik wilgotności, a stosowane zakresy częstotliwości pola elektrycznego występują w przedziale 10-150 MHz. Należy również podkreślić, że zasada działania metody pojemnościowej jest bardzo zbliżona do metody FDR (*ang.*: *Frequency Domain Reflectometry*).

Metoda FDR opiera się głównie na pomiarze odbicia impulsu elektromagnetycznego przeprowadzonego w domenie częstotliwości. Sygnał emitowany przez oscylator w zakresie wysokich częstotliwości 10-500 MHz jest nadawany do kondensatora w odpowiednio dostrojonym obwodzie elektrycznym. Wysoki zakres częstotliwości wysyłania impulsu elektromagnetycznego sprawia, że metoda FDR daje możliwość dokładnego pomiaru wilgotności. Rozmieszczenie czujników na całej długości sondy FDR, daje możliwość pomiaru wilgotności na określonej głębokości danego profilu glebowego. Na rynku istnieje szeroka gama aparatury do pomiaru wilgotności gleby metodą FDR. Firma Delta – T dostarcza między innymi czteroczujnikowe sondy PR2/4 pozwalające na pomiar wilgotności w profilu gleby do 40 cm oraz sześcioczujnikowe sondy PR2/6 umożliwiające pomiar do 100 cm głębokości profilu glebowego. Pomiary przy pomocy sond wykonywane są w uprzednio wytyczonych miejscach na polu, w których instaluje się cienkościenne kompozytowe rurki wykonane z włókien szklanych. Poprzez wybranie ziemi za pomocą próbnika żłobkowego wykonuje się otwór, w którym umieszcza się cienkościenne rurki. Sondy pojemnościowe oraz FDR umożliwiają pomiar wilgotności wszystkich typów gleb, a zmiany temperatury oraz zasolenia gleby nie wpływają istotnie na wynik otrzymywanego pomiaru [User manual 2004]. Istnieją również czynniki, które istotnie wpływają na precyzję pomiaru. Ważne jest aby cienkościenne rurki były ściśle dopasowane do otworu w glebie i zostały zainstalowane w pozycji pionowej. Wolne przestrzenie powietrzne powstające w glebie są przyczyną uzyskania nieprawidłowych danych pomiarowych, natomiast ukośnie zainstalowana cienkościenne rurka wilgotnościowa powoduje, że pomiar wykonywany jest na niewłaściwej głębokości. Warto również zaznaczyć, że na skutek gradientu temperatur wewnątrz cienkościennych rurek pojawiać się może skondensowana skroplona woda, która negatywnie wpływa na precyzyjność pomiaru. Przed pomiarem należy wówczas sprawdzić za pomocą tyczki owiniętej bawełnianą tkaniną, czy w rurkach występuje skroplona woda. W przypadku wystąpienia wody należy usunąć jej nadmiar przed dokonaniem pomiaru [Instrukcja obsługi sondy PR2 2009]. Pomiar wilgotności może być zapisywany na czytniku danych (np. HH2 firmy Delta – T) pojedynczo w sposób manualny, bądź seriami w określonym czasie przy zastosowaniu rejestratorów danych (np. DL6 firmy Delta – T) [www.delta-t.co.uk]. Za pomocą czytnika HH2 można dokonać kalibracji sondy do danego rodzaju gleby, bądź też wybrać kalibrację zalecaną przez producenta dla gleb organicznych lub mineralnych. Na rysunku 3 została przedstawiona sześcioczujnikowa profilowa sonda FDR typu PR2/6 oraz dwuigłowa sonda pojemnościowa SM200.

Rysunek 3

Sonda FDR typu PR2/6 oraz sonda pojemnościowa SM200 firmy Delta-T

Źródło: Opracowanie własne.

Dużym ułatwieniem monitoringu wilgotności gleby prowadzonego przy pomocy sond FDR jest możliwość kompatybilnego połączenia z inteligentnymi interfejsami, dzięki którym na drodze radiowej, za pośrednictwem Internetu lub poprzez sieć telefonii komórkowej można gromadzić dane [Skierucha i in. 2004].

3. Porównanie wad i zalet metod pomiarowych

Ocena wilgotności gleby za pomocą tradycyjnej metody termograwimetrycznej jest procesem czasochłonnym, pracochłonnym oraz kosztownym. Duża dokładność określania wilgotności gleb jaką zapewnia metoda termograwimetryczna stanowi referencyjne odniesienie dla innych metod pomiarowych. Jednakże destrukcyjny sposób oceny wilgotności gleby metodą termograwimetryczną, oparty na naruszeniu struktury powierzchni badanej gleby oraz wysoka temperatura usuwania wody w próbach glebowych wpływająca na nieodwracalne zmiany w ich właściwościach fizycznych oraz składzie chemicznym, spowodowały odejście od stosowania jej w praktyce. Monitorowanie wilgotności gleby za pomocą metod pośrednich daje możliwość otrzymania wyniku w krótkim czasie bez konieczności większej inżynierii.

rencji w strukturę badanego obiektu [Suchorab i in. 2011]. Zastosowanie pojemnościowych sond igłowych oraz profilowych znacznie zrewolucjonizowało strefę badań polowych prowadzonych nad zmiennością przestrzenną wilgotności gleby. Stosowane od wielu lat metody TDR oraz FDR cieszą się dużą popularnością i niezawodnością szczególnie w przypadku pomiarów wilgotności gleby o luźnej strukturze. Należy zaznaczyć, że różna gęstość gleby, przyleganie kamieni oraz korzeni roślinnych do elektrod sondy, występowanie niekontrolowanych przestrzeni powietrznych, jakie pozostawia po sobie woda i flora glebowa, zalicza się do czynników, które mają negatywny wpływ na wskazania przyrządów pomiarowych opartych na przewodnictwie elektrostatycznym. Prowadzenie monitoringu wilgotności gleby przy użyciu TDR czy FDR daje możliwość precyzyjnej oceny stopnia zaopatrzenia roślin w wodę w tym samym czasie w wielu miejscach na polu, co ma szczególne znaczenie w przypadku obszarów o zróżnicowanym ukształtowaniu oraz zmiennym rodzaju gleby. Metoda elektrometryczna jest precyzyjnym narzędziem podczas tworzenia zmiennej dynamiki uwilgotnienia gleb. Jej dokładność pomiarowa jest wysoce porównywalna z metodą termograwimetryczną, jednak zmiany zasolenia oraz struktury gleb wynikające z ich nadmiernego nawadniania lub wysuszenia obarczone są pewnym niedoszacowaniem. Opracowanie metody neutronowej było nowatorskim podejściem do pomiarów wilgotności gleb, jednak szereg kalibracji, który był uzależniony od rodzaju gleby oraz zmienna wartość ciężaru objętościowego gleby sprawiły, że zaczęto szukać nowych rozwiązań pomiarowych. Ponadto eksploatacja materiału radioaktywnego wykorzystywanego w tej metodzie badawczej była powiązana z ryzykiem pracy w warunkach szkodliwych dla zdrowia operatora. Dobór odpowiedniej aparatury pomiarowej często stanowi istotne zagadnienie związane z problematyką monitoringu uwilgotnienia gleb [Williams 2002].

4. Podsumowanie

Prowadzone prace nad oceną zasobów wodnych gleb spowodowały gwałtowny postęp w rozwoju metod pomiarowych. Począwszy od tradycyjnej metody termograwimetrycznej zwanej potocznie „suszarkową” rozwój metod pomiarowych prowadził w kierunku bardziej zaawansowanych technik, do których należy zaliczyć: TDR, FDR, pojemnościową, neutronową, czy elektrometryczną (oporową). Dobór odpowiedniej metody monitorowania wilgotności gleby jest warunkowany przede wszystkim cechami takimi jak: wysoka dokładność pomiaru, możliwość prowadzenia ciągłych pomiarów w wielu miejscach jednocześnie, niedestrukcyjność metody oraz względnie niski koszt aparatury pomiarowej. W pomiarach polowych coraz większą popularność znajdują metody oparte na zjawiskach przewodności elektrostatycznej. Opisane w opracowaniu metody monitoringu wilgotności gleby charak-

teryzują się różnymi sposobami wykonywania pomiarów. Za pomocą opisanych metod pomiarowych można przyczynić się do poprawy efektywności wykorzystania wody w procesie nawadniania gleb, jak również zapobiegać skutkom występowania zjawiska suszy. Nowatorskie wykorzystanie technik transmisji danych daje możliwość monitorowania wilgotności gleby w każdym miejscu na świecie przy wykorzystaniu sieci internetu lub telefonii komórkowej. Koncepcje opisanych metod otwierają drogę w kierunku ich dalszego udoskonalania.

LITERATURA

1. Baranowski R. (1971): „Polowe metody oznaczania wilgotności gleby”, Roczniki Gleboznawcze, t. XXII, z. 1, Warszawa.
2. Biniak-Pieróg M. (2008): Wpływ elementów agrometeorologicznych na zmienność zasobów wodnych gleby w półroczu zimowym, Współczesne problemy inżynierii środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wrocław.
3. Biniak-Pieróg M., Żyromski A., Baryła A. (2012): Ocena efektywności opadów atmosferycznych w kształtowaniu zasobów wody w glebie brunatnej nieporośniętej, Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie, (X–XII). T. 12. Z. 4(40) s. 45–58.
4. Chanasyk D.S., Naeth M.A. (1996): Field measurement of soil moisture using neutron probes, Canadian Journal of Soil Science, 76(3): 317-323.
5. Chelmicki W. (2001): Woda. Zasoby, degradacja, ochrona, Wydawnictwo Naukowe PWN.
6. Dalton F.N., Van Genuchten M. T. (1986): The Time - Domain Reflectometry method for measuring soil water content and salinity, Geoderma 38, 237-250.
7. Dobrzański B., Gliński J., Malicki M. (1964): Soil Science Annual, „Electrical resistance method for measuring moisture dynamics in sandy soils”, Vol. 14, p. 15-21.
8. Domżał H., Malicki M. (1965): Stacjonarna elektroda-sonda do pomiarów dynamiki wilgotności gleb wytworzonych z piasków, Roczniki gleboznawcze tom15: 193-197.
9. Dorigo W.A., Wagner W., Hohensinn R., Hahn S., Paulik C., Xaver A., Gruber A., Drusch M., Mecklenburg S., Oevelen P., Robock A., Jackson T. (2011): The International Soil Moisture Network: a data hosting facility for global in situ soil moisture measurements, Hydrology and Earth System Sciences, 15:1675-1698.
10. Duer I., Fotyma M., Madej A. (2004): Kodeks Dobrej Praktyki Rolniczej, Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi, Ministerstwo Środowiska, Warszawa.
11. Gąsior J., Kaniuczek J., Hajduk E., Właśniewski S., Nazarkiewicz M., Bilek M. (2013): Metody badań fizycznych właściwości gleb, Acta Carpathica 6:43-50.
12. Hanson B., Orloff S., Sanden B. (2007): Monitoring soil moisture for irrigation water management, University of California, Agriculture and Natural Resources 27-30.
13. Instrukcja obsługi sondy profilowe PR2. (2009): Pomiar wilgotności gleby na 4/6 poziomach (PR2/4 – PR2/6), Szczecin.
14. Jones B.S., Wraith M.J., Or D. (2002): Time domain reflectometry measurement principles and applications, Hydrological processes 16: 141-153.
15. Klamkowski K., Treder W. (2010): Metody pomiaru wilgotności gleby, Hasło ogrodnicze 6:12-16.

16. Kollarova K., Krajco J., Placko M., Rutkowski K. (2007): Ocena zmienności przestrzennej wilgotności gleby na podstawie map konduktywności elektrycznej, *Inżynieria Rolnicza* 6(94): 73-79.
17. Kozyra J., Doroszewski A., Nieróbca A. (2009): Zmiany klimatyczne i ich przewidywalny wpływ na rolnictwo w Polsce, *Studia i Raporty IUNG-PIB Puławy*, z.14 s.243-257.
18. Kręgiel B., Jarosińska E. (2009): Obecny stan monitoringu zjawiska suszy w Polsce i na świecie, *Czasopismo Techniczne*, 3-Ś/2009, zeszyt 11, rok 106.
19. Landa E.R., Nimmo J.R. (2003): *Soil Science Society of America*, "Soil history", No. 3, Vol. 67.
20. Lewak S., Kopcewicz J. (2009): *Fizjologia roślin: Wprowadzenie*, Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN.
21. Malicki M. (1980): Przegląd metod pomiaru wilgotności gleby i ocena ich przydatności w badaniach polowych, *Problemy Agrofizyki* 31: 47-55.
22. *Międzynarodowy Słownik Hydrologiczny* (2001): Wydawnictwo Nauka PWN SA, Warszawa.
23. Pastuszka T., Krzyszczak J., Sławiński C., Lamorski K. (2014): Effect of Time-Domain Reflectometry probe location on soil moisture measurement during wetting and drying processes, *Measurement* 49: 182–186.
24. Scott B. Jones, Jon, M. Wraith, Dani Or (2002): Time domain reflectometry measurement principles and applications, *Hydrological Processes* 16, 141–153.
25. Sitarek M., Nowak J., Wysocka-Owczarek M. (2011): Nowe technologie w ogrodnictwie 12:50-55.
26. Skierucha W., Wilczek A., Szyplowska A. (2014): Fizyczne metody badania gleb i środowiska przyrodniczego, s. 197-209, red. Gliński J., Horabik J., Lipiec J., Sławiński C., *Agrofizyka, procesy właściwości, metody*, Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN w Lublinie.
27. Skierucha W., Wilczek A., Walczak R.T. (2004): Polowy system monitorowania parametrów fizykochemicznych gleb i gruntów, *Acta Agrophysica* 4(2): 533-545.
28. Suchorab Z., Pavlik Z., Cerny R. (2011): Zastosowanie techniki pomiarowej TDR w badaniach terenowych przy wykorzystaniu sond powierzchniowych, *Budownictwo i Architektura* 8:97-106.
29. Szafranski C., Stachowski P., Kozaczyk P. (2009): Zasoby wodne użytkowanych rolniczo gleb wytworzonych z gruntów pogórnicych, *Zeszyty problemowe postępów nauk rolniczych*, 535: 405-414.
30. Topp G.C., Annan L.J., Davis A.P. (1980): Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines, *Water Resources Research*, 16: 574-582.
31. Treder W. (2011): Najnowsze badania i rozwiązania techniczne stosowane w nawadnianiu roślin, *Ekspertyza*, Instytut Ogrodnictwa w Skierniewicach.
32. Trybała M. (1972): Wstępne porównanie niektórych polowych metod pomiaru wilgotności gleb na utworach piaskowych, *Roczniki gleboznawcze* 23(1): 367-379.
33. Turski M., Witkowska – Walczak B. (2004): Fizyczne właściwości gleb pływowych wytworzonych z utworów pyłowych różnej genezy, *Acta Agrophysica* 101: 25-29.
34. User manual for the Profile Probe type PR2. (2004): Delta-T Devices Ltd.
35. Visvalingam M., Tandy J.D. (1972): The neutron method for measuring soil moisture content – A review, *Journal of Soil Science*, 23: 499-511.

36. Whitney M., Gardner F.D., Briggs L.J. (1897): An electrical method of determining the moisture content of arable soils, U.S. Department of Agriculture, Bulletin no. 6.
37. Williams D. (2002): Soil water monitoring: choosing the right device, Agfact AC27.
38. www.delta-t.co.uk/product-support-material.asp (17.06.2015).
39. www.nawadnianie.inhort.pl/slownik/Slownik-1/ (30.06.2015).
40. Xinbao Y., Xiong Y. (2006): "Time Domain Reflectometry Tests of Multilayered Soils", TDR 2006 Purdue University, West Lafayette, USA, Paper ID 3, p.16.

ANDRZEJ GÓRNIK, MARIUSZ MATYKA

METODY MONITORINGU WILGOTNOŚCI GLEBY

Słowa kluczowe: *wilgotność gleby, metoda elektrometryczna, metoda pojemnościowa, FDR, TDR, metoda neutronowa*

STRESZCZENIE

W dobie coraz częściej występującego zjawiska suszy na całym świecie pojawia się problem kontrolowania zawartości wody w glebie, jak również optymalizacji nawadniania roślin. W opracowaniu przedstawiono charakterystykę metod pomiarowych służących do oceny wilgotności gleb. W zestawieniu została opisana bezpośrednia metoda termogravimetryczna, jak również pośrednie: metoda elektrometryczna, metoda pojemnościowa, metoda FDR, metoda TDR oraz metoda neutronowa. Metody zestawione w opracowaniu stanowią istotną rolę w procesie monitorowania wilgotności gleb oraz w znacznym stopniu przyczyniają się do poprawy efektywności wykorzystania wody w celu zrównoważonego nawadniania gleb.

ANDRZEJ GÓRNIK, MARIUSZ MATYKA

THE ADVANTAGE SOIL MOISTURE MONITORING METHODS

Keywords: *soil moisture, electrometric method, capacity method, FDR, TDR, neutron method*

SUMMARY

Due to the increasing share of droughts all around the world, there is a major need of controlling and optimizing the water content in the soil. The presented review contains characteristics of soil moisture measuring methods. The termogravimetric direct method, as well as indirect methods such as: electrometric method, capacity method, frequency domain reflectometry method, time domain reflectometry method and neutron method have been described in this paper. Methods shown in this paper have significant influence on soil moisture monitoring as well as on the increased efficiency of water usage in order to achieve sustainable irrigation of the soil.

e-mail: agornik@iung.pulawy.pl
e-mail: mmatyka@iung.pulawy.pl