

METODA WYZNACZANIA STREFY CZUŁOŚCI SENSORÓW TDR

*Grzegorz Janik¹, Małgorzata Szpila², Joanna Słowińska², Gabriela Brej²,
Mateusz Turkiewicz², Wojciech Skierucha³, Tomasz Pastuszka³*

¹Instytut Kształtowania i Ochrony Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu,
Pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław
e-mail: grzegorz.janik@up.wroc.pl

²Koło Naukowe Meliorantów im. Profesora Stanisława Baca,
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław

³Instytut Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin
e-mail: w.skierucha@ipan.lublin.pl

Streszczenie. W niniejszej pracy przedstawiono metodę wyznaczania strefy czułości sensorów stosowanych do pomiaru wilgotności objętościowej w ośrodkach porowatych. Analizom poddano czujniki wykorzystujące reflektometrię domenowo-czasową (TDR), wyprodukowane w Instytucie Agrofizyki Polskiej Akademii Nauk w Lublinie. Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych stwierdzono, że zasięg strefy czułości sensorów typu laboratoryjnego i polowego jest zależny od zawartości wody w ośrodku, w którym prowadzone są pomiary. W przypadku czujnika laboratoryjnego (LP/ms), gdy oznaczenia prowadzone są w glebie całkowicie suchej, strefę czułości stanowi objętość prostopadłościanu o wymiarach 0,6 cm i 5,8 cm i grubości równej średnicy prętów sondy LP. Natomiast gdy gleba jest nasycona to strefę czułości stanowi walec eliptyczny o wysokości 5,5 cm i promieniach 0,5 cm i 0,8 cm. W przypadku czujnika polowego (FP/mts), gdy pomiary prowadzone są w glebie całkowicie suchej, strefę czułości stanowi walec eliptyczny o wysokości 10,2 cm i promieniach 0,3 cm i 0,4 cm. Natomiast gdy gleba jest nasycona wodą walec o wysokości 11,2 cm i podstawie koła o promieniu 1,7 cm.

Słowa kluczowe: sensory TDR, strefa czułości

WSTĘP

Podstawy naukowe zastosowania reflektometrii domenowo-czasowej do pomiaru wilgotności objętościowej w ośrodkach porowatych – w tym w glebie – obowiązują przy co najmniej dwóch założeniach. Dotyczą one przestrzeni zawartej wewnątrz strefy czułości stosowanych sensorów. Pojęcie „strefa czułości” zdefiniowano jako objętość badanego materiału jednorodnego w otoczeniu czuj-

nika TDR, którego zmiana wilgotności powoduje zmianę odczytu miernika TDR. Definicja ta narzuca podanie rozdzielczości pomiaru wilgotności miernikiem TDR oraz rozkładu linii pola elektrycznego wokół prętów czujnika dwuprętowego (Robinson i in. 2003). W pierwszym ze wspomnianych założeń przyjmuje się, że struktura materiału, w którym wykonuje się pomiar musi być jednorodna. W drugim wymagane jest, aby objętość wody w każdej reprezentatywnej przestrzeni zawartej wewnątrz strefy czułości była jednakowa. W konsekwencji, jednakowa jest również przenikalność elektryczna dla continuum faza stała – woda – powietrze. Konieczne jest zatem wyznaczenie przestrzeni, dla której powinny być spełnione powyższe warunki. Dotychczas, w przypadku większości zastosowań techniki TDR w trakcie prowadzonych badań polowych i laboratoryjnych przyjmuje się, że wpływ niejednorodności przenikalności elektrycznej jest nieistotny. W literaturze można znaleźć nieliczne prace dotyczące zasięgu strefy czułości sensorów (Bittelli i in. 2004, Blonquist i in. 2005, Jones i Or 2003). Zagadnienie to jest również, poza nielicznymi wyjątkami, pomijane przez producentów aparatury.

Podstawowymi elementami wpływającymi na zasięg strefy czułości sensorów są ich wymiary oraz kształt. Występują czujniki, w których linia transmisyjna jest w kształcie płaskiej, kołowej spirali o średnicy 4,2 cm (Bittelli i in. 2004) lub 2 kołowych pierścieni o średnicach 20 i 28 cm (Walker i in. 2004), bądź też jak w przypadku czujników „Campbell Scientific TDR100” liniami transmisyjnymi są 3 pręty o długości 15 cm (Blonquist i in. 2005) lub długości 60 cm (Johst i in. 2010). Linie transmisyjne występują również jako płaskowniki, zawierające się w 2 równoległych płaszczyznach (Jones i Or. 2003) lub jako 3 płaskowniki o długości od 15 cm do 40 cm i rozstawie od 6 cm do 12 cm, położone w jednej płaszczyźnie (Liu i in. 2008; Schlaeger, 2005). Najczęściej jednak, stosowane są sensory 2 szpilkowe o długościach od 5,3 cm do 30 cm (Leao i in. 2010, Malicki i Skierucha 1989; Malicki i in. 1992; Quinones i Ruelle 2001, Skierucha i in. 2006; Skierucha 2005). Ostatnio, dzięki zastosowaniu techniki FDR szpilki czujnika mogą być krótsze np. 1, 2 lub 3 cm (Skierucha i Wilczek 2010).

Podczas pomiarów aparatem TDR mamy często do czynienia z sytuacjami, gdy odczyty znacząco odbiegają od średniej na danym obszarze. Spowodowane jest to zakłóceniami jednorodności ośrodka w obrębie strefy czułości, np. kamienie bądź puste przestrzenie powstałe w wyniku obumierania korzeni roślin (Janik 2005, Janik 2008). Takie odbiegające od średniej odczyty należy w dalszych analizach pominąć, gdyż są one spowodowane niejednorodnością ośrodka w obrębie strefy czułości sensorów (Wasilewski i in. 2005). Aby to stwierdzić, należy wykazać, że zakłócenia jednorodności znajdują się w strefie czułości sensora. Znajomość zasięgu strefy czułości sensorów TDR ma również znaczenie w trakcie prowadzenia badań laboratoryjnych na próbkach glebowych o niewielkich rozmiarach, np. przy wprowadzenia procedur kalibracyjnych (Johst i in. 2010, Veld-

kamp i O'Brien 2000). Ważne jest, aby objętość strefy czułości była zawarta w objętości badanej próbki. Ponadto, badania polowe wymagają umieszczenia czujnika w taki sposób, żeby strefa jego czułości obejmowała jeden rodzaj gleby. Ma to znaczenie przy eksperymentach prowadzonych w glebach uwarstwionych. Zarówno w badaniach laboratoryjnych i polowych wymagane jest określenie wilgotności dla punktów leżących blisko siebie. Należy wtedy zadbać, aby sąsiadujące czujniki znajdowały się poza strefą czułości.

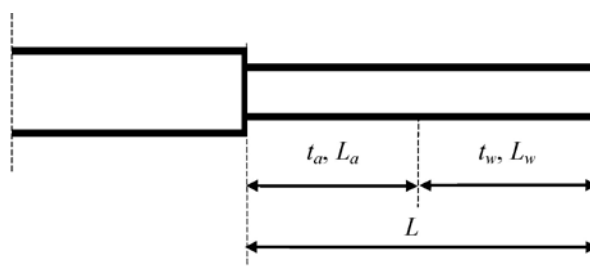
Celem pracy jest przedstawienie metody wyznaczania zasięgu strefy czułości sensorów TDR do pomiaru wilgotności objętościowej w materiałach porowatych.

METODYKA

Gleba jest systemem trójfazowym reprezentowanym przez fazę stałą (tzw. szkielet glebowy), fazę ciekłą (roztwór wody glebowej) oraz fazę gazową (powietrze glebowe) (Reinhard 2001). Technika TDR umożliwia pomiar wilgotności objętościowej w tak rozumianym ośrodku porowatym. Fizyczny model przenikalności elektrycznej opisujący mieszaninę ciała stałego, wody i powietrza opisano w szeregu prac (Kraszewski 2001, Nadler i in. 1991, Topp i in. 1982; Whalley 1993). Poniżej przedstawiono model dla mieszaniny wody i powietrza (faza stała nie występuje). Wtedy zgodnie z rysunkiem 1 można zapisać, że czas, t , w którym impuls elektromagnetyczny przebywa drogę L wynosi:

$$t = t_a + t_w, \quad (1)$$

gdzie: t_a , t_w – czas przepływu impulsu odpowiednio w fazie gazowej i ciekłej.



Rys. 1. Dwufazowy model dla „teoretycznej” gleby wykorzystujący techniki reflektometryczne propagacji impulsu elektromagnetycznego; L_a , L_w – idealizowane części sondy umieszczone w fazach składowych mieszaniny powietrza i wody; t_a , t_w – czas propagacji impulsu elektromagnetycznego przez poszczególne fazy

Fig. 1. Two-phase model for a “theoretical” soil, based on reflectometric techniques of propagation of electromagnetic impulse; L_a , L_w – idealised elements of the probe positioned in the component phases of a mixture of air and water; t_a , t_w – time of propagation of electromagnetic impulse by particular phases

Dalej t można wyrazić, jako:

$$t = \frac{2L_a\sqrt{\varepsilon_a}}{c} + \frac{2L_w\sqrt{\varepsilon_w}}{c}, \quad (2)$$

gdzie: L_a, L_w są idealizowanymi częściami sondy, umieszczonymi w fazach składowych mieszaniny wody i powietrza, $\varepsilon_a, \varepsilon_w$ – przenikalność elektryczna odpowiednio dla powietrza i wody, c – prędkość światła w próżni.

Mnożąc prawą stronę równania 2 przez elementarny przekrój mieszaniny woda – powietrze, s , prostopadły do prętów sondy a następnie dzieląc przez objętość, V , stanowiącą strefę zasięgu pomiarowego sondy TDR, otrzymujemy 2 – fazowy elektryczny model:

$$\sqrt{\varepsilon_b} = \frac{V_a}{V}\sqrt{\varepsilon_a} + \frac{V_w}{V}\sqrt{\varepsilon_w} = \sqrt{\varepsilon_a}(\mu - \theta) + \sqrt{\varepsilon_w}\theta, \quad (3)$$

gdzie: ε_b – przenikalność elektryczna mieszaniny faz wyrażona za pomocą elementarnych składowych, μ – porowatość ośrodka (dla układu powietrze – woda $\mu = 1$), θ – wilgotność objętościowa. Ostatecznie można zapisać, że:

$$\sqrt{\varepsilon_b} = \sqrt{\varepsilon_a}(1 - \theta) + \sqrt{\varepsilon_w}\theta. \quad (4)$$

Ośrodek stanowiący mieszaninę wody i powietrza może osiągnąć 2 stany graniczne. Pierwszy, gdy występuje wyłącznie powietrze ($\theta = 0$), wtedy zależność 4 przyjmuje postać:

$$\sqrt{\varepsilon_b} = \sqrt{\varepsilon_a} \quad (5)$$

oraz drugi, gdy występuje wyłącznie woda ($\theta = 1$) wtedy:

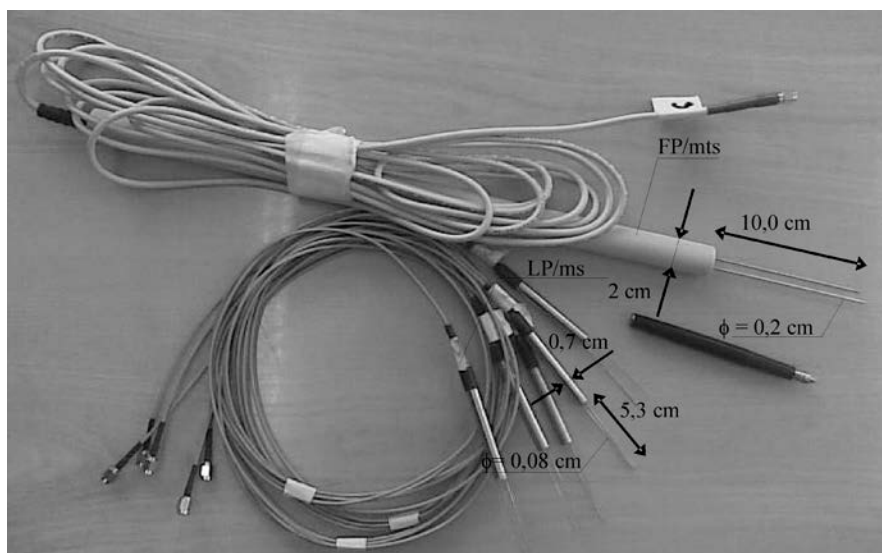
$$\sqrt{\varepsilon_b} = \sqrt{\varepsilon_w}. \quad (6)$$

Można ostatecznie przyjąć, że zależności 5 i 6 obowiązują dla szczególnego teoretycznego rodzaju gleby, w której nie występuje faza stała i wszystkie wolne przestrzenie wypełnione są powietrzem lub wodą. Gdy wolna przestrzeń wypełniona jest powietrzem jest to szczególny przypadek „gleby całkowicie suchej” (zał. 5). Natomiast zależność 6 reprezentuje szczególny przypadek „gleby całkowicie nasyconej”. W przyrodzie występują wyłącznie przypadki pośrednie. To znaczy w danej objętości gleby rzeczywistej nie może być ani więcej powietrza niż w „glebie całkowicie suchej” ani więcej wody niż w „glebie całkowicie nasy-

conej”. W związku z powyższym wyznaczenie strefy czułości sensorów dla „gleby całkowicie suchej” i „całkowicie nasyconej” pozwoli określić granicę strefy czułości dla gleby rzeczywistej w pełnym zakresie wilgotności.

Wyróżniono frontową i boczną strefę czułości. Strefę frontową zdefiniowano jako odległość i położenie płaszczyzn prostopadłych do osi podłużnej czujnika pomiędzy, którymi jakakolwiek zmiana stosunku objętości wody do objętości stanowiącej strefę zasięgu pomiarowego spowoduje zmiany odczytu aparatu TDR. Boczną strefę czułości zdefiniowano jako walec eliptyczny, którego środek leży w osi podłużnej czujnika.

W pracy użyto 2 typy czujników wyprodukowanych w Instytucie Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego Polskiej Akademii Nauk w Lublinie: czujniki laboratoryjne LP/ms oraz czujniki polowe FP/mts (rysunek 2).

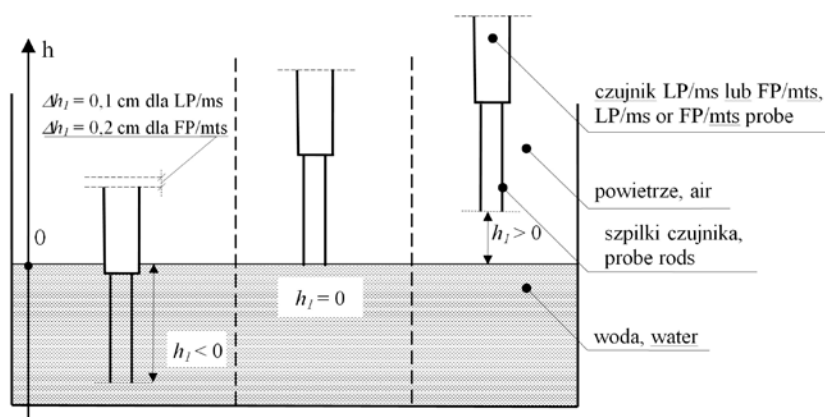


Rys. 2. Wymiary czujników TDR typu laboratoryjnego (LP/ms) i typu polowego (FP/mts)
Fig. 2. Dimensions of TDR probes of the laboratory (LP/ms) and field (FP/mts) types

OPIS EKSPERYMENTÓW

Dla realizacji postawionego zadania przeprowadzono 4 typy eksperymentów laboratoryjnych, w których czujniki zainstalowano w pojemnikach zaopatrzonych w urządzenie pozwalające na precyzyjne dozowanie wody. Taka konstrukcja umożliwia zmianę położenia granicy powietrze-woda względem szpilek czujnika. Wszystkie eksperymenty przeprowadzono w jednakowej temperaturze powietrza i wody, która wynosiła 20°C. Dokonywano odczytu wilgotności ręcznym mierni-

kiem (FOM/mts). Schematy eksperymentów przedstawiono na rysunkach od 3 do 6. Gdy szpilki czujnika były całkowicie zanurzone, wówczas zgodnie z wcześniej przyjętym założeniem określono zasięg strefy czułości dla „gleby nasyconej”. Natomiast, gdy szpilki czujnika znajdowały się w powietrzu badano strefę czułości dla „gleby całkowicie suchej”. Na pierwszym etapie każdego eksperymentu szpilki czujnika były całkowicie zanurzone w wodzie. W następnych etapach zwiększano wielkość h i powtarzano odczyt. Przyjęto, że strefa czułości rozpoczynała się wtedy, gdy różnica pomiędzy kolejnymi odczytami była różna od 0. Kontynuując eksperymenty wynurzano szpilki czujnika. Gdy różnica kolejnych odczytów wilgotności ponownie wynosiła 0 oznacza to koniec strefy czułości.



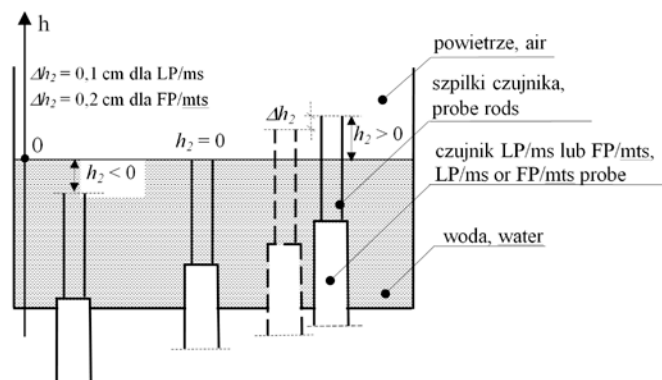
Rys. 3. Schemat eksperymentu nr 1; h_1 – współrzędna końców szpilek przy pionowym ułożeniu czujnika (szpilki skierowane w dół), Δh_1 – skok, z jakim wykonywano pomiary, LP/ms – czujnik laboratoryjny, FP/mts – czujnik polowy, zakres h_1 dla LP/ms: $-6 \text{ cm} < h_1 < 1 \text{ cm}$, zakres h_1 dla FP/mts: $-12 \text{ cm} < h_1 < 2 \text{ cm}$

Fig. 3. Schematic of experiment No. 1; h_1 – coordinate of rod tips at vertical orientation of the probe (rods pointing downwards), Δh_1 – stroke at which the measurements were taken, LP/ms – laboratory probe, FP/mts – field probe, range of h_1 for LP/ms: $-6 \text{ cm} < h_1 < 1 \text{ cm}$, range of h_1 for FP/mts: $-12 \text{ cm} < h_1 < 2 \text{ cm}$

Celem eksperymentów nr 1 i 2 było zbadanie frontowej strefy. W eksperymencie nr 1 (rys. 3) oś czujnika była pionowa (prostopadła do granicy powietrze-woda) i końce szpilek skierowane w dół. Współrzędne końców szpilek oznaczono symbolem h_1 i h_2 (indeksy: „1”, „2”, „3” i „4” – oznaczają nr. kolejnych eksperymentów, indeks „LP” – oznacza czujnik typu laboratoryjnego, natomiast indeks „FP” dotyczy czujnika polowego). W chwili początkowej szpilki w całości znajdowały się w wodzie, tzn. w „glebie nasyconej” ($h_1^{LP} = -6 \text{ cm}$ i $h_1^{FP} = -12 \text{ cm}$). W końcowej fazie eksperymentu: $h_1^{LP} = 1 \text{ cm}$ oraz $h_1^{FP} = 2 \text{ cm}$. Skok, z jakim zmieniano h_1^{LP} i h_1^{FP} wynosił odpowiednio $\Delta h_1^{LP} = 0,1 \text{ cm}$ oraz $\Delta h_1^{FP} = 0,2 \text{ cm}$. Etap począt-

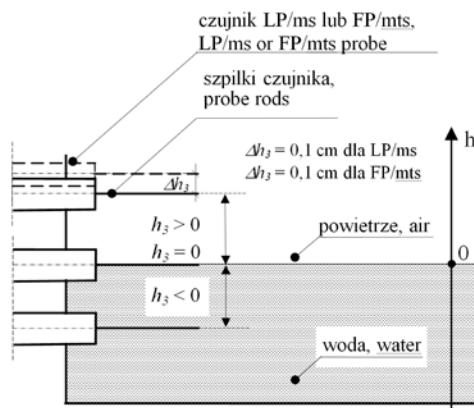
kowy eksperymentu nr 1 pozwolił na wyznaczenie frontowej strefy czułości przy początku szpilek dla „gleby nasyconej”. W końcowej fazie prowadzonego eksperymentu nr 1 badano frontową strefę czułości przy końcu szpilek, gdy gleba jest całkowicie sucha. W eksperymencie 2 czujnik również usytuowano pionowo, ale szpilki skierowano do góry (rys. 4). Na początku, podobnie jak w eksperymencie nr 1, szpilki czujnika były całkowicie zanurzone w wodzie ($h_2^{LP} = -1$ cm i $h_2^{FP} = -2$ cm). W pierwszej fazie zwiększając wielkość h_2 badano zasięg frontowej strefy czułości w pobliżu końców szpilek gdy „gleba jest całkowicie nasycona”. W końcowej fazie gdy $h_2^{LP} \geq 6$ cm i $h_2^{FP} \geq 12$ cm badano zasięg frontowej strefy czułości gdy gleba jest „całkowicie sucha”. Skok, z jakim zmieniano h_2^{LP} i h_2^{FP} wynosił odpowiednio $\Delta h_2^{LP} = 0,1$ cm oraz $\Delta h_2^{FP} = 0,2$ cm.

Celem eksperymentów nr 3 i 4 było zbadanie bocznej strefy czułości. W odróżnieniu od wcześniej opisanych eksperymentów oś symetrii czujnika była równoległa do granicy woda-powietrze. W eksperymencie 3 (rys. 5) płaszczyzna wyznaczona przez szpilki czujnika była pozioma, natomiast w eksperymencie 4 (rys. 6) pionowa. W eksperymentach 3 i 4 punkt przecięcia osi symetrii czujnika z osią 0h oznaczony symbolami h_3 i h_4 . Eksperymenty nr 3 i 4 prowadzono w analogiczny sposób jak eksperymenty nr 1 i 2. W eksperymentach tych na początku h_3^{LP} i h_4^{LP} miało wartość -1 cm, h_3^{FP} i h_4^{FP} miało wartość -2 cm, natomiast w ostatniej fazie h_3^{LP} i h_4^{LP} miało wartość 1 cm, h_3^{FP} i h_4^{FP} miało wartość 2 cm. Skok, z jakim zmieniano się h_3 i h_4 w eksperymentach 3 i 4 wynosił $0,1$ cm. W początkowej fazie tych eksperymentów badano boczną strefę czułości gdy gleba jest nasycona, a w końcowej gdy gleba jest sucha.



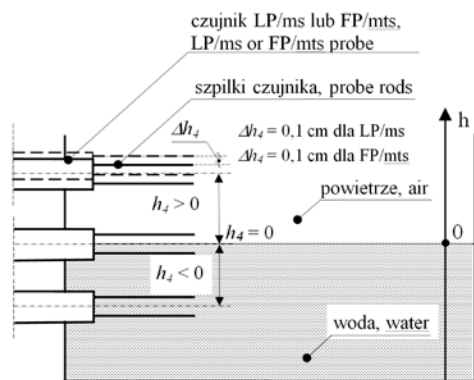
Rys. 4. Schemat eksperymentu nr 2; h_2 – współrzędna końców szpilek przy pionowym ułożeniu czujnika (szpilki skierowane do góry), Δh_2 – skok pomiaru, LP/ms – czujnik laboratoryjny, FP/mts – czujnik polowy, zakres h_2 dla LP/ms: -1 cm $< h_2 < 6$ cm, zakres h_2 dla FP/mts: -2 cm $< h_2 < 12$ cm

Fig. 4. Schematic of experiment No. 2; h_2 – coordinate of rod tips at vertical orientation of the probe (rods pointing upwards), Δh_2 – elementary measurement distance, LP/ms – laboratory probe, FP/mts – field probe, range of h_2 for LP/ms: -1 cm $< h_2 < 6$ cm, range of h_2 for FP/mts: -2 cm $< h_2 < 12$ cm



Rys. 5. Schemat eksperymentu nr 3; h_3 – współrzędna punktu przecięcia osi czujnika z osią $0h$ (płaszczyzna wyznaczona przez szpilki pozioma), Δh_3 – skok pomiaru, LP/ms – czujnik laboratoryjny, FP/mts – czujnik polowy, zakres h_3 dla LP/ms: $-2 \text{ cm} < h_3 < 1 \text{ cm}$, zakres h_3 dla FP/mts: $-2 \text{ cm} < h_3 < 2 \text{ cm}$

Fig. 5. Schematic of experiment No. 3; h_3 – coordinate of the point of intersection of the probe axis with axis $0h$ (plane created by the probe rods is horizontal), Δh_3 – elementary measurement distance, LP/ms – laboratory probe, FP/mts – field probe, range of h_3 for LP/ms: $-2 \text{ cm} < h_3 < 1 \text{ cm}$, range of h_3 for FP/mts: $-2 \text{ cm} < h_3 < 2 \text{ cm}$



Rys. 6. Schemat eksperymentu nr 4; h_4 – współrzędna punktu przecięcia osi czujnika z osią $0h$ (płaszczyzna wyznaczona przez szpilki pionowa), Δh_4 – skok pomiaru, LP/ms – czujnik laboratoryjny, FP/mts – czujnik polowy, zakres h_4 dla LP/ms: $-2 \text{ cm} < h_4 < 1 \text{ cm}$, zakres h_4 dla FP/mts: $-2 \text{ cm} < h_4 < 2 \text{ cm}$

Fig. 6. Schematic of experiment No. 4; h_4 – coordinate of the point of intersection of the probe axis with axis $0h$ (plane created by the probe rods is vertical), Δh_4 – elementary measurement distance, LP/ms – laboratory probe, FP/mts – field probe, range of h_4 for LP/ms: $-2 \text{ cm} < h_4 < 1 \text{ cm}$, range of h_4 for FP/mts: $-2 \text{ cm} < h_4 < 2 \text{ cm}$

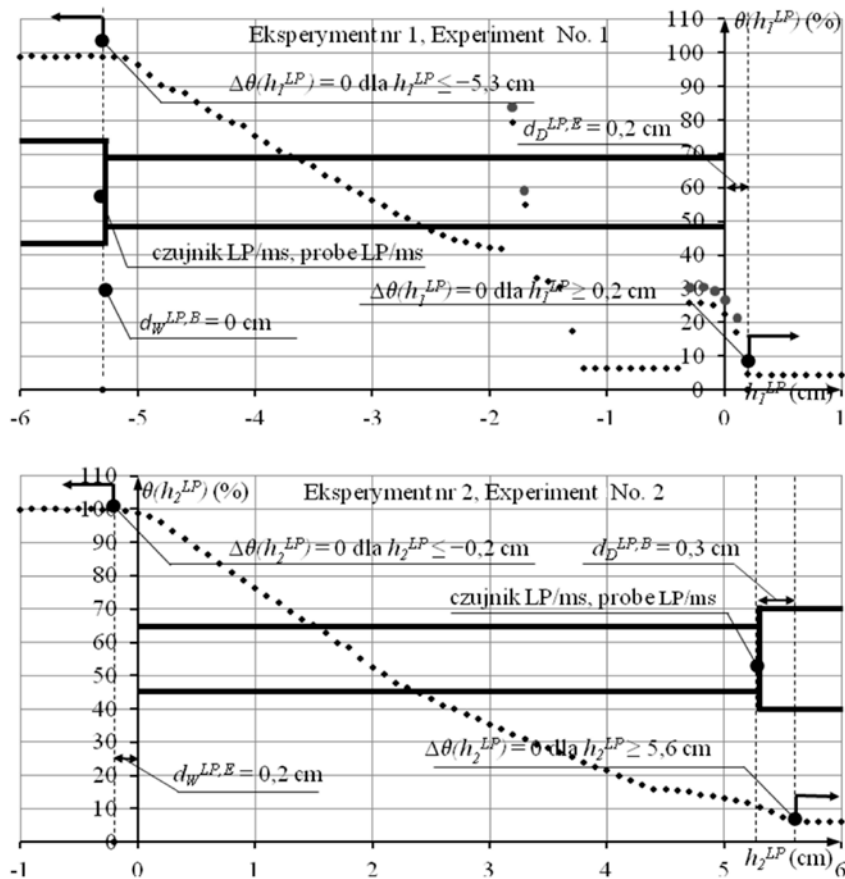
WYNIKI I DYSKUSJA

Na rysunkach od 7 do 10 przedstawiono odczyty wilgotności w zależności od usytuowania szpilek względem granicy woda-powietrze. W dalszej części pracy przyjęto następujące oznaczenia: indeksy „D” i „W” oznaczają ośrodek suchy i nasycony oraz indeksy „B” i „E” oznaczają odpowiednio początek i koniec szpilek. Na rysunku 7 (eksperyment nr 1 i 2) przedstawiono odczyty wilgotności do wyznaczenia frontowej strefy czułości dla czujnika laboratoryjnego przy początku i końcu szpilek, gdy gleba jest sucha i nasycona. W górnej części rysunku (eksperyment nr 1) zaznaczono te przedziały wielkości h_1^{LP} i h_2^{LP} , w których różnica pomiędzy kolejnymi wartościami wilgotności $\Delta\theta(h_1^{LP})$ i $\Delta\theta(h_2^{LP})$ jest równa 0 cm. Przedziały te występują dla $h_1^{LP} \in \langle -6,0 \text{ cm}; -5,3 \text{ cm} \rangle$ oraz gdy $h_1^{LP} \in \langle 0,2 \text{ cm}; 1,0 \text{ cm} \rangle$. Koniec pierwszego z przedziałów w punkcie $h_1^{LP} = -5,3 \text{ cm}$, stanowi początek strefy czułości przy początku szpilek gdy gleba jest nasycona. Natomiast początek drugiego z przedziałów w punkcie $h_1^{LP} = 0,2 \text{ cm}$ stanowi koniec strefy czułości przy końcu szpilek gdy gleba jest sucha. Zasięg strefy czułości mierzony jest od początku szpilek bądź od ich końca i oznaczony jest odpowiednio symbolem $d_w^{LP,B}$ i $d_D^{LP,E}$. Z rysunku 7 można odczytać, że $d_w^{LP,B} = 0 \text{ cm}$ i $d_D^{LP,E} = 0,2 \text{ cm}$. Ponadto analizując dane uzyskane podczas eksperymentu nr 1 można stwierdzić, że wilgotność objętościowa $\theta(h_1^{LP})$ zmienia się liniowo dla $h_1^{LP} \in \langle -5,3 \text{ cm}; -2,1 \text{ cm} \rangle$. Dla pozostałych wielkości h_1^{LP} , znajdujących się wewnątrz wyznaczonej strefy czułości, wartości $\theta(h_1^{LP})$ przyjmują charakter nieregularny (punkty w których odczyty silnie odbiegają od trendu zaznaczono kolorem czerwonym). Można to tłumaczyć tym, że gdy pręty sondy są częściowo w wodzie i w powietrzu, wtedy mamy sytuację niejednorodnego materiału, a miernik może rejestrować odbicie sygnałów od granicy ośrodków, co jest to trudne do interpretacji.

Rozważanie powyższe, jest co prawda nieistotne z punktu widzenia tematu pracy, wyjaśniają przyczynę przypadkowości nielicznych odczytów gdy oznaczenia wilgotności prowadzone są w glebie o niejednorodnej strukturze. Dane przedstawione na rysunku 7 (eksperyment 2) pozwoliły wyznaczyć frontową strefę czułości przy końcu szpilek gdy gleba jest nasycona oraz frontową strefę przy początku szpilek gdy gleba jest sucha. Wartość $d_w^{LP,E} = 0,2 \text{ cm}$ i $d_D^{LP,B} = 0,3 \text{ cm}$. Przebieg zmian wilgotności $\theta(h_2^{LP})$ w obrębie strefy czułości ma w przybliżeniu charakter liniowy i podobnie jak w opisie eksperymentu nr 1 z punktu widzenia tematu pracy jest niepotrzebny.

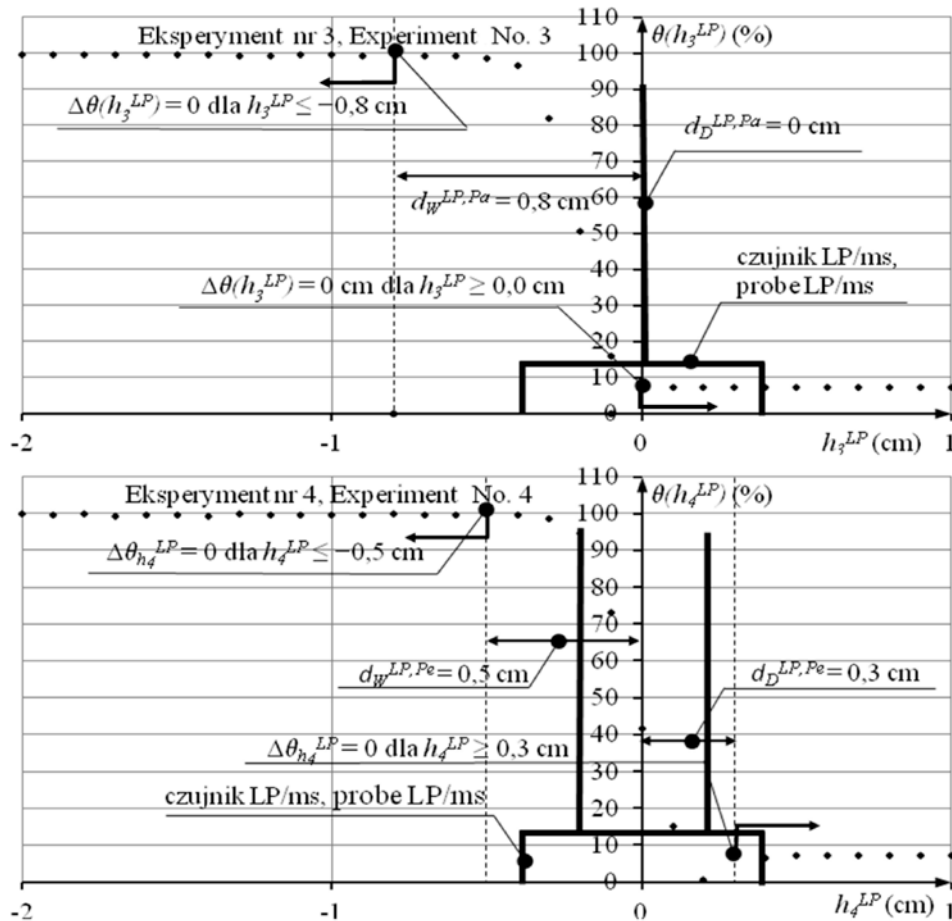
Dane na rysunku 8 pozwalają wyznaczyć boczną strefę czułości czujnika laboratoryjnego, mierzoną od osi czujnika w dwóch prostopadłych kierunkach. Indeks „Pa” oznacza ułożenie szpilek jak na rysunku 5 (eksperyment nr 3), a indeks „Pe” jak na rysunku 6 (eksperyment nr 4). Wartości zasięgu strefy czułości wynoszą

odpowiednio $d_W^{LP,Pa} = 0,8$ cm i $d_D^{LP,Pa} = 0$ cm (na podstawie eksperymentu nr 3) oraz $d_W^{LP,Pe} = 0,5$ cm i $d_D^{LP,Pe} = 0,3$ cm (na podstawie eksperymentu nr 4).



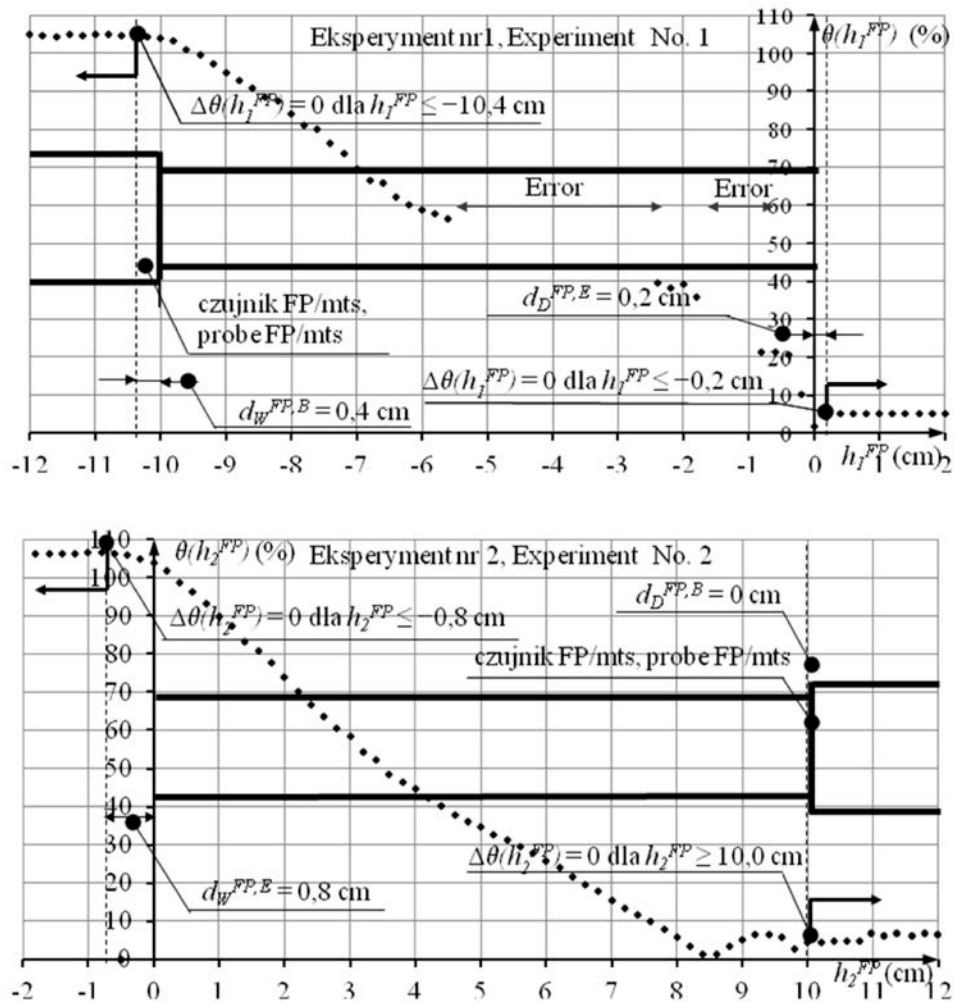
Rys. 7. Odczyty wilgotności dla eksperymentów nr 1 i 2 przy zastosowaniu czujnika laboratoryjnego LP/ms; $\theta(h_1^{LP})$ i $\theta(h_2^{LP})$ – wilgotność objętościowa; h_1^{LP} i h_2^{LP} – współrzędna końców szpilek w eksperymencie nr 1 i 2, $\Delta\theta(h_1^{LP})$ i $\Delta\theta(h_2^{LP})$ – różnica między kolejnymi odczytami w punktach odległych o $\Delta h_1^{LP} = 0,1$ cm i $\Delta h_2^{LP} = 0,1$ cm, d – zasięg strefy czułości (indeks „W” – gleba nasyciona, „D” – gleba sucha, „LP” – czujnik laboratoryjny, „E” – koniec szpilek, „B” – początek szpilek), ● – odczyty, w których wartości wilgotności są nieregularne

Fig. 7. Moisture readings for experiments No. 1 and 2 obtained with the use of the laboratory probe LP/ms; $\theta(h_1^{LP})$ and $\theta(h_2^{LP})$ – volumetric moisture; h_1^{LP} and h_2^{LP} – coordinate of probe rod tips in experiments No. 1 and 2, $\Delta\theta(h_1^{LP})$ and $\Delta\theta(h_2^{LP})$ – differences between successive readings at points distant by $\Delta h_1^{LP} = 0.1$ cm and $\Delta h_2^{LP} = 0.1$ cm, d – extent of sensitivity zone (index „W” – saturated soil, „D” – dry soil, „LP” – laboratory probe, „E” – probe rod tip, „B” – probe rod beginning), ● – readings with irregular moisture readings



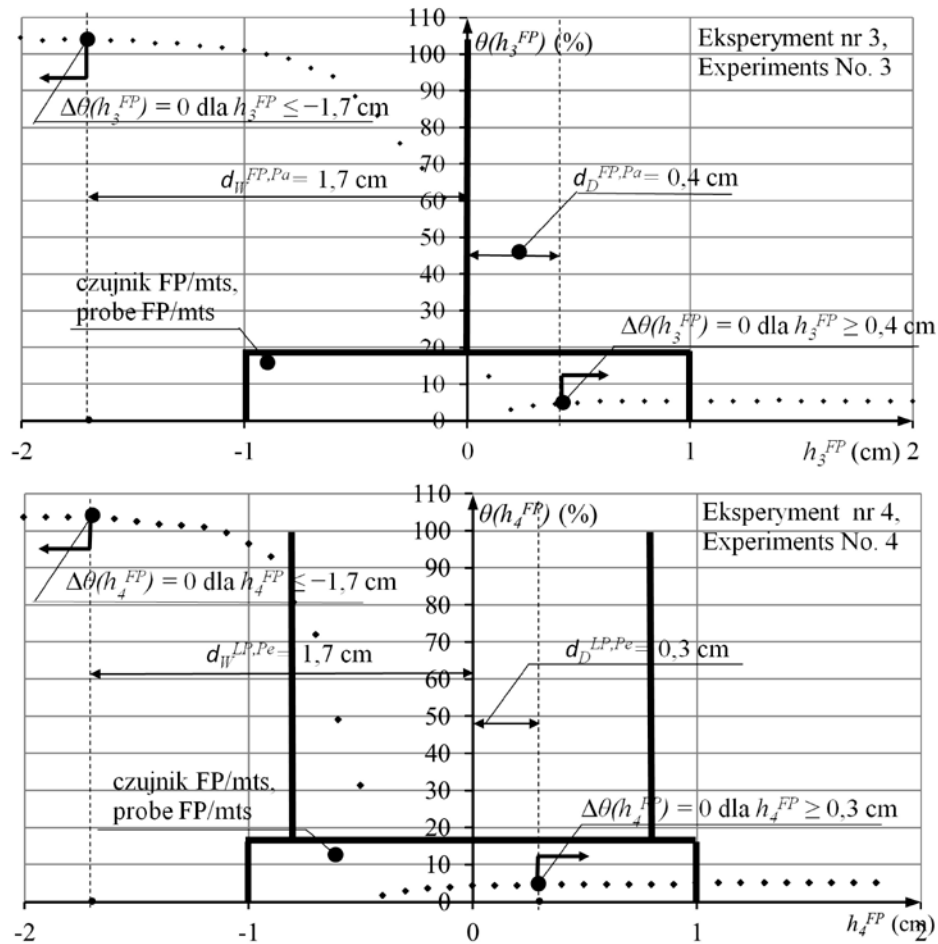
Rys. 8. Odczyty wilgotności dla eksperymentów nr 3 i 4 przy zastosowaniu czujnika laboratoryjnego LP/ms; $\theta(h_3^{LP})$ i $\theta(h_4^{LP})$ – wilgotność objętościowa; h_3^{LP} i h_4^{LP} – współrzędna punktu przecięcia osi czujnika z osią 0h w eksperymencie nr 3 i 4), $\Delta\theta(h_3^{LP})$ i $\Delta\theta(h_4^{LP})$ – różnica między kolejnymi odczytami w punktach odległych o $\Delta h_3 = 0,1$ cm i $\Delta h_4 = 0,1$ cm, d – zasięg strefy czułości (indeks „W” – gleba nasycona, „D” – gleba sucha, „LP” – czujnik laboratoryjny, „Pa” – płaszczyzna wyznaczona przez szpilki równoległa do zwierciadła wody, „Pe” – płaszczyzna wyznaczona przez szpilki prostopadła do zwierciadła wody)

Fig. 8. Moisture readings for experiments No. 3 and 4 obtained with the use of the laboratory probe LP/ms; $\theta(h_3^{LP})$ and $\theta(h_4^{LP})$ – volumetric moisture; h_3^{LP} and h_4^{LP} – coordinate of the point of intersection of the probe axis with axis 0h in experiments No. 3 and 4, $\Delta\theta(h_3^{LP})$ and $\Delta\theta(h_4^{LP})$ – differences between successive readings at points distant by $\Delta h_3 = 0.1$ cm and $\Delta h_4 = 0.1$ cm, d – extent of sensitivity zone (index „W” – saturated soil, „D” – dry soil, „LP” – laboratory probe, „Pa” – plane created by probe rods is parallel to the water table, „Pe” – plane created by probe rods is perpendicular to the water table)



Rys. 9. Odczyty wilgotności dla eksperymentów nr 1 i 2 przy zastosowaniu czujnika polowego FP/mts; $\theta(h_1^{FP})$ i $\theta(h_2^{FP})$ – wilgotność objętościowa; h_1^{FP} i h_2^{FP} – współrzędna końców szpilek w eksperymencie nr 1 i 2, $\Delta\theta(h_1^{FP})$ $\Delta\theta(h_2^{FP})$ – różnica między kolejnymi odczytami w punktach odległych o $\Delta h_1 = 0,2$ cm i $\Delta h_2 = 0,2$ cm, d – zasięg strefy czułości (indeks „W” – gleba nasycona, „D” – gleba sucha, „FP” – czujnik polowy, „E” – koniec szpilek, „B” – początek szpilek; $\leftarrow \rightarrow$ – odczyty „error”

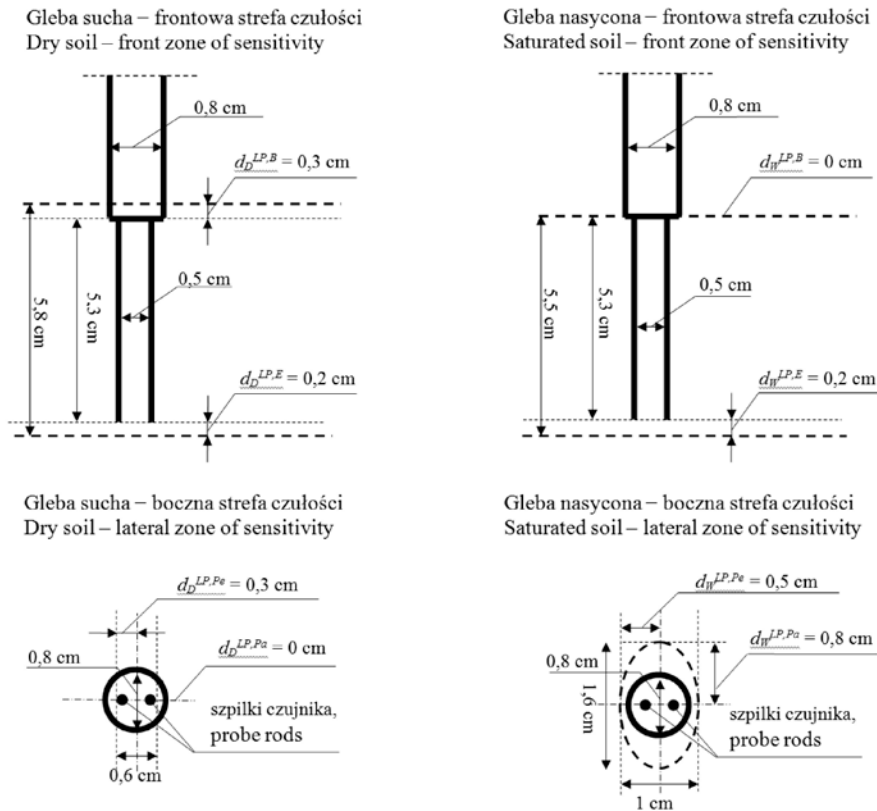
Rys. 9. Moisture readings for experiments No. 1 and 2 obtained with the use of the field probe FP/mts; $\theta(h_1^{FP})$ and $\theta(h_2^{FP})$ – volumetric moisture; h_1^{FP} and h_2^{FP} – coordinate of probe rod tips in experiments No. 1 and 2, $\Delta\theta(h_1^{FP})$ $\Delta\theta(h_2^{FP})$ – differences between successive readings at points distant by $\Delta h_1 = 0,2$ cm and $\Delta h_2 = 0,2$ cm, d – extent of sensitivity zone (index „W” – saturated soil, „D” – dry soil, „FP” – field probe, „E” – probe rod tip, „B” – probe rod beginning); $\leftarrow \rightarrow$ – “error” readings



Rys. 10. Odczyty wilgotności dla eksperymentów nr 3 i 4 przy zastosowaniu czujnika polowego FP/ms; $\theta(h_3^{FP})$ i $\theta(h_4^{FP})$ – wilgotność objętościowa; h_3^{LP} i h_4^{LP} – współrzędna punktu przecięcia osi czujnika z osią 0h w eksperymencie nr 3 i 4, $\Delta\theta(h_3^{LP})$ i $\Delta\theta(h_4^{LP})$ – różnica między kolejnymi odczytami w punktach odległych o $\Delta h_3 = 0,1$ cm i $\Delta h_4 = 0,1$ cm, d – zasięg strefy czułości (indeks „w” – gleba nasyciona, „D” – gleba sucha, „FP” – czujnik polowy, „Pa” – płaszczyzna wyznaczona przez szpilki równoległa do zwierciadła wody, „Pe” – płaszczyzna wyznaczona przez szpilki prostopadła do zwierciadła wody)

Fig. 10. Moisture readings for experiments No. 3 and 4 obtained with the use of the field probe FP/ms; $\theta(h_3^{FP})$ and $\theta(h_4^{FP})$ – volumetric moisture; h_3^{LP} and h_4^{LP} – coordinate of the point of intersection of the probe axis with axis 0h in experiments No. 3 and 4, $\Delta\theta(h_3^{LP})$ and $\Delta\theta(h_4^{LP})$ – differences between successive readings at points distant by $\Delta h_3 = 0,1$ cm and $\Delta h_4 = 0,1$ cm, d – extent of sensitivity zone (index „w” – saturated soil, „D” – dry soil, „FP” – field probe, „Pa” – plane created by probe rods is parallel to the water table, „Pe” – plane created by probe rods is perpendicular to the water table)

Rysunki 9 i 10 są sporządzone identycznie jak rysunki 7 i 8, z tym że dane pomiarowe dotyczą czujnika polowego (FP/mts). Wartości zasięgu frontowej strefy czułości wynoszą: $d_W^{FP,B} = 0,4$ cm i $d_D^{FP,E} = 0,2$ cm (wyznaczone na podstawie eksperymentu 1) oraz $d_W^{FP,E} = 0,8$ cm i $d_D^{FP,B} = 0$ cm (wyznaczone na podstawie eksperymentu 2). Wartości wilgotności $\theta(h_1^{FP})$ zmieniają się w obrębie strefy czułości regularnie (w przybliżeniu liniowo) w przedziale dla $h_1^{FP} \in (-10,4$ cm; $-5,6$ cm). Natomiast dla $h_1^{FP} \in (-5,6$ cm; $-0,2$ cm) wartości wilgotności są nieregularne lub wskazania są nieprawidłowe („error”). Przyczynę wystąpienia wartości nieregularnych oraz wskazań „error” wyjaśniono przy opisie eksperymentów dotyczących czujnika laboratoryjnego. W eksperymencie 2 wskazania są w przybliżeniu liniowe dla $h_2^{FP} \in (-0,8$ cm; $-10,0$ cm).

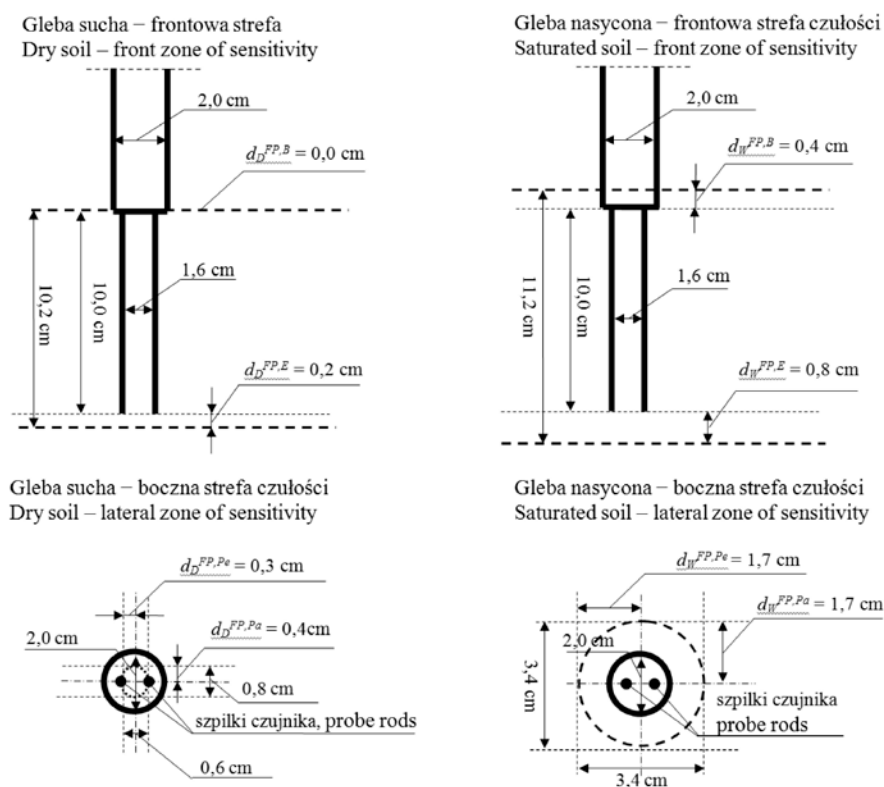


Rys. 11. Frontowa i boczna strefa czułości dla czujnika laboratoryjnego LP/ms; oznaczenia jak na rysunkach 7 i 8

Fig. 11. Front and lateral zone of sensitivity for the laboratory probe LP/ms; symbols and indices as in Figures 7 and 8

Wykorzystując dane zawarte na rysunkach od 7 do 10 sporządzono przekroje podłużne i poprzeczne brył stanowiących strefę czułości czujników typu laboratoryjnego i polowego gdy gleba jest sucha i nasycona. Dla czujnika laboratoryjnego (rysunek 11) gdy gleba jest sucha, strefę czułości stanowi objętość prostopadłościanu o wymiarach 0,6 cm i 5,8 cm i grubości równej średnicy prętów sondy LP. Natomiast gdy gleba jest nasycona to strefę czułości stanowi walec eliptyczny o wysokości 5,5 cm i promieniach 0,5 cm i 0,8 cm. W przypadku czujnika polowego (rysunek 12) dla gleby suchej, strefę czułości stanowi walec eliptyczny o wysokości 10,2 cm i promieniach 0,3 cm i 0,4 cm. Natomiast gdy gleba jest nasycona walec o wysokości 11,2 cm i podstawie koła o promieniu 1,7 cm.

Czujnik polowy FP/mts - the field probe FP/mts



Rys. 12. Frontowa i boczna strefa czułości dla czujnika polowego FP/mts; oznaczenia jak na rysunkach 9 i 10

Fig. 12. Front and lateral zone of sensitivity for the field probe FP/mts; symbols and indices as in Figures 9 and 10

WNIOSKI

1. Zasięg strefy czułości sensorów dielektrycznych typu laboratoryjnego i polowego wyprodukowanych w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie jest zależny od zawartości wody w ośrodku, w którym prowadzone są pomiary.

2. W przypadku czujnika laboratoryjnego (LP/ms), gdy pomiary prowadzone są w glebie całkowicie suchej strefę czułości stanowi strefę czułości stanowi objętość prostopadłościanu o wymiarach 0,6 cm i 5,8 cm i grubości równej średnicy prętów sondy LP. Natomiast gdy gleba jest nasycona wodą to strefę czułości stanowi walec eliptyczny o wysokości 5,5 cm i promieniach 0,5 cm i 0,8 cm.

3. W przypadku czujnika polowego (FP/mts), gdy pomiary prowadzone są w glebie całkowicie suchej strefę czułości stanowi walec eliptyczny o wysokości 10,2 cm i promieniach 0,3 cm i 0,4 cm. Natomiast gdy gleba jest nasycona wodą walec o wysokości 11,2 cm i podstawie koła o promieniu 1,7 cm.

4. Przeprowadzone eksperymenty laboratoryjne wyjaśniają przyczynę przypadkowych odczytów aparatu TDR oraz wskazań „error” w trakcie prowadzonych badań polowych. Mogą one wystąpić w przypadku gdy pręty sondy znajdują się w niejednorodnym materiale i miernik może rejestrować odbicie sygnałów od granicy ośrodków.

5. Zaproponowana metoda wyznaczania strefy czułości sensorów TDR typu laboratoryjnego (LP/ms) i typu polowego (FP/mts) może być zastosowana do sensorów TDR o innej geometrii np. sensorów dwuprętowych lub wieloprętowych.

PIŚMIENNICTWO

- Bittelli M., Flury M., Campbell Gaylon S., Schulz V., 2004. Characterization of a spiral-shaped time domain reflectometry probe. *Water Resour. Res.*, Vol. 40., W09205.
- Blonquist Jr. J. M., Jones S. B., Robinson D. A., 2005. A time domain transmission sensor with TDR performance characteristics. *J. Hydrology* 314, 235-245.
- Janik G., 2005. Spatial variability of soil moisture in grassland. *Int. Agrophysics* 19, 37-45.
- Janik G., 2008. Spatial variability of soil moisture as information on variability of selected physical properties of soil. *Int. Agrophysics* 22, 35-43.
- Johst M., Casper M.C., Schlaeger S., 2010. Reliability of Inversely Reconstructed Soil Moisture Profiles and Consequences for Field Applications. *The Open Hydrology Journal*, 4, 35-43.
- Jones S.B., Or D., 2003. Modeled effects on permittivity measurements of water content in high surface area Poros media. *Physica B* 338, 284-290.
- Kraszewski A., 2001. Microwave aquametry: An Effective Tool for Non-destructive Moisture Sensing. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 2(4), 347-362.
- Leao Tairone P., Perfect E., Tyner John S., 2010. New semi-empirical formulae for predicting soil solution conductivity from dielectric properties at 50 MHz. *J. Hydrol.* 393, 321-330.
- Liu X., Ren T., Horton R., 2008. Determination of Soil Bulk Density with Thermo-Time Domain Reflectometry Sensors. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 72, 1000-1005.

- Malicki M. A., Skierucha W. M., 1989. A manually controlled TDR soil moisture meter operating with 300 ps rise-time needle pulse. *Irrig. Sci.*, 10, 153-163.
- Malicki M.A., Plagge R., Renger M., Walczak R.T., 1992. Application of time-domain reflectometry (TDR) soil moisture miniprobe for the determination of unsaturated soil water characteristics from undisturbed soil cores. *Irrig. Sci.*, 13, 65-72.
- Nadler A., Dasberg S., Lapid I., 1991. Time domain reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55, 938-943.
- Quinones H., Ruelle P., 2001. Operative Calibration Methodology of a TDR Sensor for Soil Moisture Monitoring under Irrigated Crops. *Subsurface Sensing Technologies and Applications Vol. 2*, No. 1, 31-45.
- Reinhard A., 2000. Regulacja i matematyczne modelowanie ruchu wody w glebie. Wyd. AR we Wrocławiu. Skrypty nr 462, 118.
- Robinson, D.A., Jones, S.B., Wraith, J.M., Or, D., Friedman, S.P., 2003. A Review of Advances in Dielectric and Electrical Conductivity Measurement in Soils Using Time Domain Reflectometry. *Vadose Zone J.*, 2, 444-475.
- Schlaeger S., 2005. A fast TDR-inversion technique for the reconstruction of spatial soil moisture content. *Hydrol. Earth Sys. Sci. Discuss.*, 2, 971-1009.
- Skierucha W., 2005. Wpływ temperatury na pomiar wilgotności gleby metodą reflektometryczną. *Acta Agrophysica 122*, Rozprawy i Monografie, (5), 99.
- Skierucha W., Wilczek A., 2010. A FDR Sensor for Measuring Complex Soil Dielectric Permittivity in the 10–500 MHz Frequency Range. *Sensors*, 10, 3314-3329.
- Skierucha W., Wilczek A., Walczak R.T., 2006. Recent software improvements in moisture (TDR method), matric pressure, electrical conductivity and temperature meters of porous media. *Int. Agrophysics* 20, 229-235.
- Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P., 1982. Electromagnetic determination of soil water content using TDR: I. Applications to wetting fronts and steep gradients. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46, 672-678.
- Veldkamp E., O'Brien J.J., 2000. Calibration of a Frequency Domain Reflectometry Sensor for Humid Tropical Soils of Volcanic Origin. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, 1549-1553.
- Wagner N., Trinks E., Kupfer K., 2007. Determination of the spatial TDR- sensor characteristics in strong dispersive subsoil using 3D-FEM frequency domain simulations in combination with microwave dielectric spectroscopy. *Measurement Science and Technology*, 18, 1137-1146.
- Walker J.P., Willgoose G. R., Kalma J.D., 2004. In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques. *J. Hydrol.*, 293, 85-99.
- Wasilewski M., Franczak E., Janik G., 2005. Pomiar wilgotnością gleby techniką TDR w warunkach niejednorodności ośrodka. Środowiskowe aspekty melioracji wodnych. Wyd. AR we Wrocławiu, s. 33–40. (Recenzowane Materiały I Międzynarodowej Konf. Mel. i Inż. Środ. zorganizowanej przez Instytut Inżynierii i Kształtowania Środowiska oraz Koło Naukowe Meliorantów im. prof. S. Baca, w dniach 14–15. 04. 2005).
- Whalley W.R., 1993. Considerations on the use of time-domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content. *J. Soil Sci.*, 44, 1-9.

METHOD FOR THE DETERMINATION OF THE SENSITIVITY
ZONE OF TDR PROBE

*Grzegorz Janik¹, Małgorzata Szpila², Joanna Słowińska², Gabriela Brej²,
Mateusz Turkiewicz², Wojciech Skierucha³, Tomasz Pastuszka³*

¹Institute of Environmental Protection and Development,
Wrocław University of Environmental and Life Sciences
Pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław
e-mail: grzegorz.janik@up.wroc.pl

²Prof. S. Bac Students' Science Organization, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
Pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław

³Department of Metrology and Modeling of Agrophysical Processes, Institute of Agrophysics PAS
ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin

Abstract. The paper presents a method for the determination of the zone of sensitivity of probes used for the measurement of volumetric moisture in porous media. The probes under analysis were TDR (Time-Domain Reflectometry) probes manufactured at the Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, Lublin. Based on the laboratory studies performed it was found that the extent of the sensitivity zone of the field- and laboratory-type probes depends on the water content of the medium in which measurements are conducted. In the case of the laboratory probe (LP/ms), when the measurements are conducted in a completely dry soil, the zone of sensitivity of the probe is the volume of a cuboid with dimensions of 0.6 cm by 5.8 cm and a thickness equal to the diameter of the rods of the LP probe. Whereas, when the soil is saturated with water the zone of sensitivity of the probe is an elliptical cylinder with height of 5.5 cm and radii of 0.5 cm and 0.8 cm. In the case of the field probe (FP/mts), when the measurements are conducted in a completely dry soil, the probe sensitivity zone is an elliptical cylinder with height of 10.2 cm and radii of 0.3 cm and 0.4 cm. Whereas, when the soil is saturated with water that zone is a cylinder with height of 11.2 cm and a circular base with a radius of 1.7 cm.

Keywords: TDR probes, sensitivity zone