

OCENA STOSOWANYCH MODELI PRZENIKALNOŚCI DIELEKTRYCZNEJ GLEB MINERALNYCH

W. Skierucha¹, M.A. Malicki²

Instytut Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego, Polska Akademia Nauk
ul. Doświadczalna 4, P.O. Box 201, 20-290 Lublin 27

E-mail: ¹skieruch@demeter.ipan.lublin.pl, ²mmal@demeter.ipan.lublin.pl

S t r e s z c z e n i e. Dokonano oceny stosowanych modeli przenikalności dielektrycznej gleby mineralnej: 3-fazowego α , 4-fazowego α , 4-fazowego α z przenikalnością dielektryczną wody związanej zależną od wilgotności gleby, 4-fazowego de Loor'a oraz regresyjnego. Znalezione, że model 4-fazowy α z przenikalnością dielektryczną wody związanej zależną od wilgotności gleby funkcjonuje porównywalnie z modelem regresyjnym, co pozwala uniknąć indywidualnej kalibracji dielektrycznych pomiarów wilgotności gleby.

S ł o w a k l u c z o w e: reflektometria czasowa, TDR, przenikalność dielektryczna gleby, wilgotność objętościowa gleby

WSTĘP

Rosnące zainteresowanie reflektometrią czasową (TDR - time domain reflectometry) w zastosowaniu do dielektrycznego pomiaru wilgotności gleby, gdzie wilgotność gleby wylicza się z jej stałej dielektrycznej [7,11] powoduje potrzebę weryfikacji stosowanych modeli stałej dielektrycznej mieszaniny składników o różnej przenikalności dielektrycznej. Wśród wielu modeli przenikalności dielektrycznej opisujących glebę jako mieszaninę ciała stałego, wody oraz powietrza najczęściej stosowane są: model α [1,16], model de Loor'a [2] oraz modele empiryczne [9,10,14,17].

Czujnikami wilgotności w metodzie TDR są dwa równoległe pręty metalowe o długości L , będące w kontakcie galwanicznym z glebą [7,10]. Czas t propagacji impulsu elektromagnetycznego wzdłuż umieszczonych w glebie prętów czujnika można przedstawić jako sumę czasów propagacji tego impulsu przez poszczególne fazy gleby [8]:

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

gdzie indeksy s , a oraz w oznaczają odpowiednio fazę stałą, gazową i ciekłą.

Przyjmując przenikalność magnetyczną gleby równą jedności oraz pomijając wpływ strat dielektrycznych [12], prędkość propagacji fal elektromagnetycznych w glebie, v , można wyrazić następująco:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} = \frac{2L}{t} \quad (2)$$

gdzie c jest prędkością światła w próżni, ϵ jest częścią rzeczywistą zespolonej przenikalności dielektrycznej gleby, zaś L jest drogą, jaką impuls elektromagnetyczny pokonuje w glebie w czasie t .

Wychodząc z równania (1) można otrzymać trójfazowy model α , o wartości współczynnika $\alpha=0,5$ [8,19]:

$$\epsilon^{0,5} = (1 - \phi) \epsilon_s^{0,5} + (\phi - \theta) \epsilon_a^{0,5} + \theta \epsilon_w^{0,5} \quad (3)$$

gdzie ϕ jest porowatością gleby, θ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) natomiast jej wilgotnością objętościową.

Przedstawiony uproszczony model przenikalności dielektrycznej gleby nie uwzględnia efektów powstających na granicy faz, w szczególności na styku fazy stałej i ciekłej. Wzbogacając przedstawiony model 3-fazowy (3) o składnik związany z interfejsem faza stała/faza ciekła, otrzymujemy model α dla czterech faz:

$$\epsilon^\alpha = (1 - \phi) \epsilon_s^\alpha + (\phi - \theta) \epsilon_a^\alpha + (\theta - \theta_{bw}) \epsilon_w^\alpha + \theta_{bw} \epsilon_{bw}^\alpha, \quad (4)$$

w którym woda występuje w dwóch fazach, tzn. w fazie wody swobodnej, (w), jak woda kapilarna oraz wody związanej, (bw - bound water), jak woda molekularna oraz błonkowa. Ogólniej, model przenikalności dielektrycznej jako mieszaniny dielektryków można wyrazić następująco:

$$\epsilon^\alpha = \sum_i V_i \epsilon_i^\alpha \quad (5)$$

gdzie α jest współczynnikiem o warstwach w przedziale $-1, +1$, wynoszącym dla większości gleb $0,5$ [13], V_i jest objętościową koncentracją i -tej fazy, zaś ϵ_i jest wartością przenikalności dielektrycznej tej fazy.

Stosowany model 4-fazowy zaproponowany przez de Loor'a [2,3], stosowany przez innych badaczy [4,5] ma postać:

$$\varepsilon = \frac{3\varepsilon_s + 2\theta_w(\varepsilon_w - \varepsilon_s) + 2\theta_{bw}(\varepsilon_{bw} - \varepsilon_s) + 2\theta_a(\varepsilon_a - \varepsilon_s)}{3 + \theta_w\left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_w} - 1\right) + \theta_{bw}\left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{bw}} - 1\right) + \theta_a\left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_a} - 1\right)} \quad (6)$$

gdzie indeksy s , w , bw oraz a odnoszą się odpowiednio do: fazy stałej, wody swobodnej, wody związanej, oraz powietrza. W tym modelu cząsteczki fazy stałej tworzą materiał homogeniczny i izotropowy, z którym wymieszane są cząsteczki wody i powietrza.

Modele empiryczne $\varepsilon(\theta)$ oraz $\varepsilon(\theta, \rho)$, gdzie ρ (g cm^{-3}) jest gęstością gleby, stanowią równania odnośnych krzywych regresji [9,10,14,17]. Formuła (7) poniżej, zaproponowana przez Skieruchę [14] stosowana będzie jako model porównawczy w dalszych rozważaniach:

$$\varepsilon = (0,573 + 0,582\rho + (7,755 + 0,792\rho)\theta)^2 \quad (7)$$

Niżej przedstawiono weryfikację diskutowanych modeli trójfazowego i czterofazowego.

MATERIAŁ I METODY

Badaniami objęto 16 gleb mineralnych różniących się uziarnieniem oraz gęstością (Tabela 1). Dane dotyczące relacji $\varepsilon(\theta, \rho)$ zostały zebrane w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie w trakcie wieloletnich prac nad rozwojem techniki reflektometrycznej. Przenikalność dielektryczną gleby mierzono metodą reflektometryczną z zastosowaniem miernika TDR firmy Easy Test typu LOM/m z sondą LP/ms [6]. Wilgotność objętościową gleby oraz jej gęstość wyznaczono metodą grawimetryczną (suszarkową). Przenikalność dielektryczną fazy stałej, ε_s , badanych gleb obliczono ze wzoru:

$$\varepsilon_s = \frac{1}{n} \sum_i^n \left(\frac{\varepsilon^\alpha(\theta=0) - \phi_i}{1 - \phi_i} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad \text{dla } \alpha = 0,5 \quad (8)$$

jako wartość średnią dla wszystkich próbek badanego typu gleby, gdzie $\varepsilon(\theta=0)$ jest aproksymowaną wartością przenikalności dielektrycznej badanych próbek

T a b e l a 1. Wybrane właściwości badanych gleb mineralnych, gdzie ρ (g cm^{-3}) jest gęstością, ρ_s (g cm^{-3}) gęstością cząsteczkowa gleby (typ gleby i uziarnienie wg FAO)

T a b l e 1. Selected properties of the analyzed mineral soils, where (g cm^{-3}) is the soil bulk density, ρ_s (g cm^{-3}) is the soil particle density (soil type and grain-size distribution according to FAO)

Nr	Lokalizacja	Typ gleby	Poziom (głębokość, cm)	ρ	ρ_s	Uziarnienie (%)	
						piasek	pył
1	Parana, Brazylia	Haplic Ferrasol	Ah (0-10)	1,27-1,60	2,62	82	6
2	Parana, Brazylia	Haplic Ferrasol	Bws (120-140)	1,31-1,77	2,67	72	8
3	Grunewald, Niemcy	Haplic Luvisol	Bt (90-120)	1,35-1,55	2,53	2	75
4	Grunewald, Niemcy	Haplic Podzol	Bhs (30-45)	1,21-1,60	2,54	88	10
5	Elba, Włochy	Chromic Luvisol	Ah (0-20)	1,34-1,64	2,63	46	31
6	Elba, Włochy	Chromic Luvisol	Bt (150-180)	1,33-1,73	2,65	35	31
7	Elba, Włochy	Luvic Calcisol	Ah (0-20)	1,25-1,68	2,57	50	26
8	Elba, Włochy	Luvic Calcisol	Btk (80-100)	1,14-1,52	2,53	26	28
9	Werbkowice	Haplic Chernozem	Ap (0-20)	1,18-1,40	2,28	2	52
10	Parana, Brazylia	Rhodic Ferrasol	Ah (0-10)	1,01-1,37	2,88	4	16
11	Parana, Brazylia	Rhodic Ferrasol	Bws (140-160)	1,04-1,24	2,88	3	16
12	Ohlendorf, Niemcy	Haplic Luvisol	Bt (60-80)	1,31-1,62	2,70	2	75
13	Ohlendorf, Niemcy	Arenic Cambisol	C (70-120)	1,59-1,70	2,63	98	2
14	Markuszów	Orthic Podzol	Bhl (40-60)	1,58-1,80	2,64	85	12
15	Czesławice	Orthic Luvisol	Ck (150)	1,25-1,61	2,48	0	68
16	Janów Lubelski	Eutric Cambisol	Bh (20-30)	1,14-1,53	2,43	1	31

glebowych dla $\theta = 0$ przy wpasowaniu do eksperymentalnych danych (θ, ε) linii trendu w postaci funkcji wykładniczej $\varepsilon = a \cdot e^{b\theta}$.

Przyjęto, że dla każdej gleby istnieje wilgotność progowa, θ_{WPP} , która rozgranicza wodę związaną i wodę swobodną. Można tę wilgotność wyznaczyć z empirycznej formuły przedstawionej przez Topp i in. [17]:

$$\theta_{WPP} = 0,0674 - 0,00064 \cdot \text{SAND} + 0,00478 \cdot \text{CLAY} \quad (9)$$

gdzie SAND oraz CLAY są procentowymi zawartościami piasku oraz łu w badanych glebach. Wang i Schmugge [18] utożsamiają wilgotność progową, θ_{WPP} , z wilgotnością punktu wędnięcia roślin.

W rozważaniach dotyczących modeli 4-fazowych przyjęto następujące założenia:

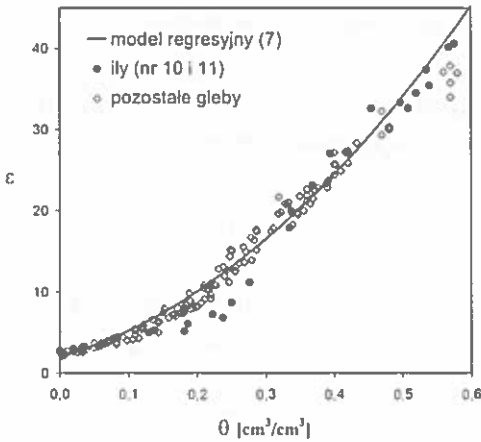
- jeżeli $\theta > \theta_{WPP}$ to przenikalność dielektryczną gleby opisują modele 3-fazowe, tzn. dla modelu α jest to formuła (3), natomiast dla modelu de Loor'a formuła (6) jeśli zaniedba się θ_{bw} ;
- jeżeli $\theta \leq \theta_{WPP}$ to, to przenikalność dielektryczną gleby opisują modele 4-fazowe, tzn. dla modelu α jest to formuła (4), natomiast dla modelu de Loor'a formuła (6), w których $\theta_{bw} = \theta$ zaś $\varepsilon_{bw} = \varepsilon_s + (80,2 - \varepsilon_s) \frac{\theta_{bw}}{\theta_{WPP}}$, gdzie ε_s jest przenikalnością dielektryczną stałej fazy gleby zgodnie z formułą (8) dla $\alpha=0,5$.

WYNIKI I DYSKUSJA

Rysunek 1 przedstawia zależność przenikalności dielektrycznej gleby, ε , od jej wilgotności objętościowej, θ . Przy wilgotności poniżej 0,3 wartości zmierzone są mniejsze w stosunku do wyliczonych z modelu (7), szczególnie wyraźne widać to dla próbek o dużej zawartości łu (nr 10 i 11). Efekt ten można zauważyć już przy zawartości łu ok. 70% (gleba nr 16). Można go wyjaśnić wpływem wody związanej zlokalizowanej przez fazę stałą, dla której wartość przenikalności dielektrycznej jest mniejsza niż dla wody swobodnej i wynosi około 3 dla pierwszej warstwy molekularnej cząsteczek wody związanych z fazą stałą.

Wraz ze wzrostem odległości od powierzchni fazy stałej wartość ε_{bw} ulega zwiększeniu ponieważ wzrasta mobilność dipoli cząsteczek wody w zmiennym polu elektrycznym. Podobne wyniki dla gleb o dużej powierzchni właściwej uzyskane zostały przez Dirksena i Basberga [4].

Rysunek 2 przedstawia porównanie wartości obliczonych z modelu 3-fazowego opisanego równaniem (3) oraz zmierzonych metodą TDR. Niezależnie od



Rys. 1. Zależność przenikalności dielektrycznej gleby, ϵ , od jej wilgotności objętościowej, θ , dla zbadanych gleb mineralnych. Linia ciągła przedstawia model (7) wyznaczony dla średniej gęstości badanych próbek glebowych równej $1,42 \text{ g cm}^{-3}$.

Fig. 1. Relation between the soil dielectric permittivity, ϵ , and its volumetric water content, θ , for the analyzed mineral soils. The line represents the model (7) calculated for the average density of the soil samples $1,42 \text{ g cm}^{-3}$.

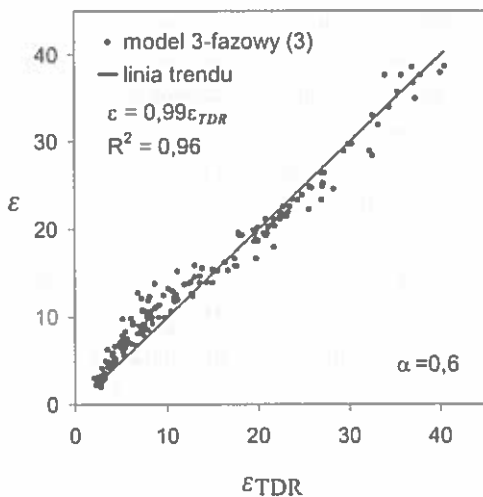
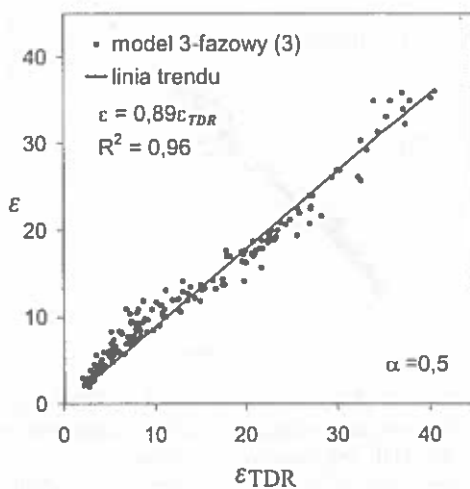
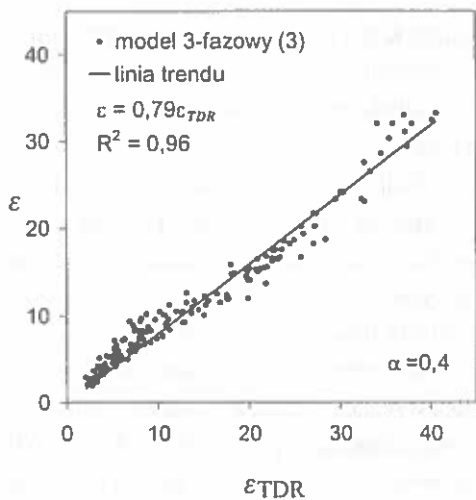
Modele 4-fazowe opisane zależnościami (4) oraz (6) uwzględniają wpływ frakcji wody związanej, której wielkość, θ_{bw} , można wyrazić jako:

$$\theta_{bw} = x \cdot S \cdot \rho \quad (10)$$

gdzie x (m) jest odległością od powierzchni fazy stałej, S ($\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$) jest powierzchnią właściwą gleby, zależną głównie od zawartości i jakości iltu. Wodę związaną tworzą nie więcej niż trzy warstwy monomolekularne wody, o grubości pojedynczej warstwy $3 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ [12,15].

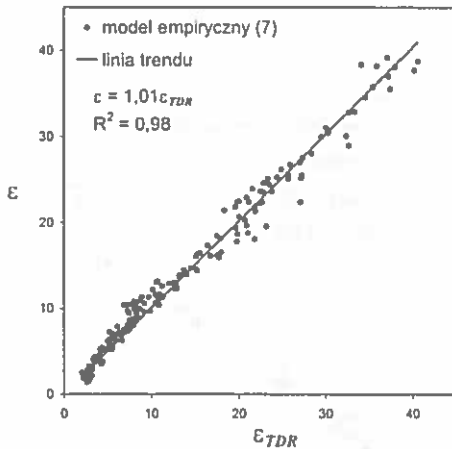
Przenikalność dielektryczna dla wody kapilarnej $\epsilon_w = 80,2$ w temperaturze $20 \text{ }^\circ\text{C}$, natomiast przenikalność dielektryczna wody związanej, ϵ_{bw} , ma wartość mniejszą ze względu na ograniczenie mobilności dipoli wody w pobliżu cząsteczek fazy stałej. Zależność przenikalności dielektrycznej wody związanej od odległości od powierzchni fazy stałej jest nieznana. Or i Wraith [12] przyjmują zależność wykładniczą:

zastosowanego parametru α wyraźne są dwa zakresy danych z wartością graniczną $\epsilon_{TDR} \approx 15$, przy czym poniżej tej wartości występuje wyraźne zawyżenie wartości policzonych z modelu w porównaniu z wartościami z pomiaru. Dla każdego parametru α rozproszenie danych było podobne ($R^2 = 0,96$), nachylenie linii trendu było najbliższe jedności dla parametru $\alpha = 0,6$. Dla ϵ większych od 15 model 3-fazowy α generuje wartości zbieżne z pomiarowymi. Empiryczny model regresyjny (7), uwzględniający gęstość gleby, również nie eliminuje charakterystycznego zagięcia w rozkładzie danych, chociaż je zmniejsza (Rys. 3) na tyle istotnie, że uwzględnienie gęstości gleby w sposób istotny poprawia dokładność pomiaru wilgotności gleby metodą TDR [9,14].



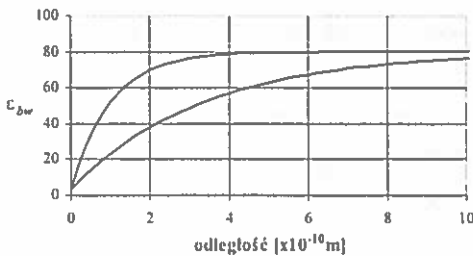
Rys. 2. Porównanie wartości przenikalności dielektrycznych badanych gleb zmierzonych metodą TDR (oś pozioma) i obliczonych z modelu 3-fazowego (3) dla różnych wartości parametru α .

Fig. 2. Comparison of soil dielectric permittivities of the analyzed soil samples measured by TDR method (horizontal axis) and calculated from 3-phase model (3) for different values of α parameter.



Rys. 3. Porównanie wartości przenikalności dielektrycznych badanych gleb zmierzonych metodą TDR (oś pozioma) i policzonych z modelu empirycznego uwzględniającego gęstość gleby.

Fig. 3. Comparison of the soil dielectric permittivities measured by TDR method (horizontal axis) and calculated by the empirical model (7) accounting for soil bulk density.



Rys. 4. Wartość przenikalności dielektrycznej wody związanej, ε_{bw} , w funkcji odległości, x , od granicy faz.

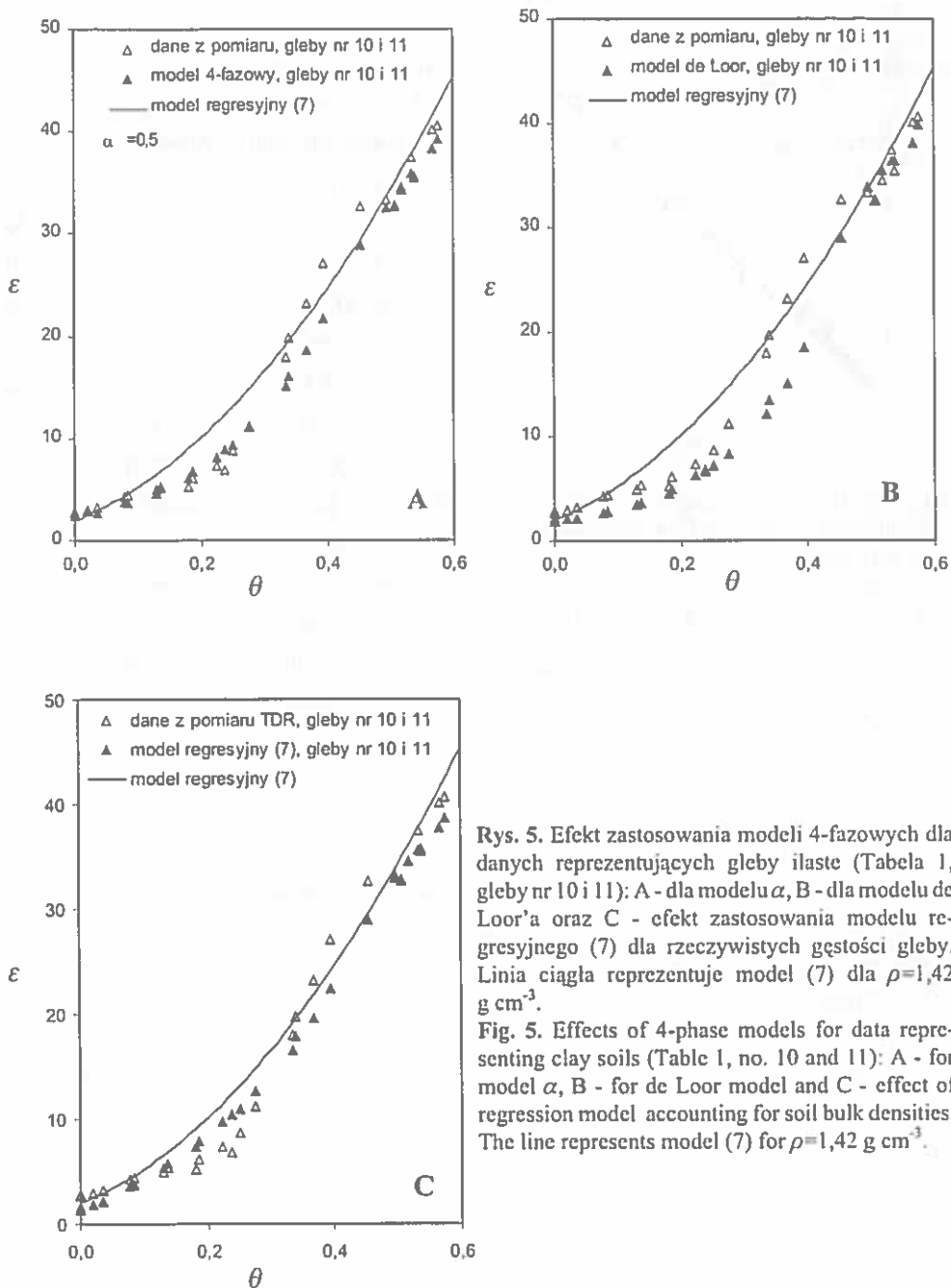
Fig. 4. Values of dielectric permittivities of bound water, ε_{bw} , related to the distance, x , from the phases border.

$$\varepsilon_{bw} = 80,2 - 77 \cdot e^{-kx} \quad (11)$$

gdzie k jest parametrem decydującym o szybkości narastania ε_{bw} ze wzrostem odległości molekuł wody od granicy faz (Rys. 4).

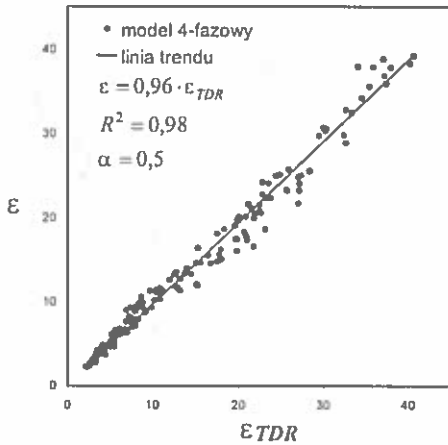
Wang i Schmutge [18] zwracają uwagę na dwa charakterystyczne zjawiska, które można zaobserwować na krzywej $\varepsilon = f(\theta)$ (Rys. 1): (i) przenikalność dielektryczna wzrasta wolno dla małych wilgotności do wartości charakterystycznej zwanej przez autorów "wilgotnością przejścia", θ_{WPP} , (ii) wartość "wilgotności przejścia" jest mniejsza dla gleb piaszczystych, większą dla gleb ilastych i jest silnie skorelowana z θ_{WPP} .

Mając to na uwadze dokonano próby wykorzystania tych spostrzeżeń w zastosowaniu do gleb nr 10 i 11 (Tabela 1), jako że charakteryzują się one największą zawartością frakcji ilastej i "wilgotność przejścia" wyraźnie jest zaznaczona na wykresie charakterystyki $\varepsilon(\theta)$ (Rys. 1). Wartość θ_{WPP} liczono według formuły empirycznej (9) podanej przez Wang i Schmutge [18]. Rysunek 5 przedstawia efekt zastosowania modeli 4-fazowych wyrażonych formułami (4) oraz (6) w przypadku dwóch gleb ilastych, przy uwzględnieniu założeń podanych w części "Materiał i metody". Dla modelu



Rys. 5. Efekt zastosowania modeli 4-fazowych dla danych reprezentujących gleby ilaste (Tabela 1, gleby nr 10 i 11): A - dla modelu α , B - dla modelu de Looor'a oraz C - efekt zastosowania modelu regresyjnego (7) dla rzeczywistych gęstości gleby. Linia ciągła reprezentuje model (7) dla $\rho=1,42 \text{ g cm}^{-3}$.

Fig. 5. Effects of 4-phase models for data representing clay soils (Table 1, no. 10 and 11): A - for model α , B - for de Looor model and C - effect of regression model accounting for soil bulk densities. The line represents model (7) for $\rho=1,42 \text{ g cm}^{-3}$.



Rys. 6. Porównanie wartości przenikalności dielektrycznych badanych gleb zmierzonych metodą TDR (oś pozioma) i policzonych z modelu 4-fazowego α .

Fig. 6. Comparison of the analyzed soil dielectric permittivities measured by TDR method (horizontal axis) and calculated from the 4-phase model α .

regresyjnego (7), poniżej wilgotności 0,35 widoczne jest zawyżanie wartości ϵ w stosunku do zmierzonych.

W zakresie $\epsilon \leq 15$ wartości z obydwu modeli 4-fazowych były zbliżone do wyników eksperymentalnych pomiaru metodą TDR. Lepszą zgodność z danymi pomiarowymi osiągnięto przy zastosowaniu modelu α niż dla modelu de Loo'a. Wartości uzyskane z modelu 4-fazowego α w porównaniu z wartościami z pomiaru metodą TDR przedstawia Rys. 6.

Rozproszenie danych jest nieznacznie gorsze w porównaniu z efektem zastosowania modelu empirycznego (7), uwzględniającego gęstość gleby.

WNIOSKI

1. Znalezione, że model 4-fazowy α z przenikalnością dielektryczną wody związanej zależną od wilgotności gleby funkcjonuje porównywalnie z modelem regresyjnym, co pozwala uniknąć indywidualnej kalibracji dielektrycznych pomiarów wilgotności gleby.

2. Model 3-fazowy przenikalności dielektrycznej gleby funkcjonuje poprawnie dla gleb mineralnych o wilgotności powyżej $0,15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

3. Model regresyjny przenikalności dielektrycznej gleb mineralnych funkcjonuje poprawnie w całym zakresie wilgotności gleby za wyjątkiem gleb o zawartości ilitu powyżej 70%.

PIŚMIENNICTWO

1. **Birchak, J.R., Gardner C.G., Hipp J.E., Victor J.M.:** High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture. *Proc. IEEE*, 62, (1), 93-98, 1974.
2. **de Loor G.P.:** Dielectric properties of heterogeneous mixtures. *Appl. Sci. Res.*, B3, 479-482, 1964.
3. **de Loor G.P.:** Dielectric properties of heterogeneous mixtures. BCRS (Nederland Remote Sensing Board) rep. No. 90-13, TNO Physics and Electronics Lab. The Hague, 1990.
4. **Dirksen C., Dasberg S.:** Improved calibration of Time Domain Reflectometry soil water content measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57, 660-667, 1993.
5. **Dobson M.C., Ulaby F.T., Hallikainen M.T., El-Rayes M.A.:** Microwave dielectric behaviour of wet soil - Part II: Dielectric mixing models. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*. GE-23, 35-46, 1985.
6. **Easy Test.** Soil water status monitoring devices. (ulotka), 1994.
7. **Gardner C.M.K., Bell J.P., Cooper D., Dean T.J., Hodnett M.G.:** Soil Water Content. *Soil Analysis - Physical Methods* (edited by Smith K.A., Mullins C.E.). Marcel Dekker, Inc. New York, 1-73, 1991.
8. **Kraszewski A., Kuliński S., Matuszewski W.:** Dielectric properties and a model of biphasic water suspension at 9.4 GHz. *J. Applied Physics*, 47, 4, 1275-1277, 1976.
9. **Malicki, M.A., Plagge R., Roth C.H.:** Reduction of soil matrix effect on TDR dielectric moisture determination by accounting for bulk density or porosity. *European J. Soil Sci.*, 47, 3, 357-366, 1996.
10. **Malicki, M.A., Skierucha W.M.:** A manually controlled TDR soil moisture meter operating with 300 ps rise-time needle pulse. *Irrig. Sci.*, 10, 153-163, 1989.
11. **O'Connor K.M., Dowding C.H.:** Geomeasurements by pulsing TDR cables and probes. CRC Press, 1999.
12. **Or D., Wraith J.M.:** Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: A physical model. *Water Res. Res.*, 35, 371-383, 1999.
13. **Roth K., Schulin R., Flüher H., Attinger W.:** Calibration of Time Domain Reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Res. Res.*, 26, 2267-2273, 1990.
14. **Skierucha W.:** Zależność propagacji impulsu elektromagnetycznego w glebie od jej wybranych właściwości. Rozprawa doktorska. Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego Polskiej Akademii Nauk, Lublin, 1996.
15. **Sposito, G., Prost R.:** Structure of water adsorbed on smectites. *Chem. Rev.*, 82, 553-572, 1982.
16. **Steru M.:** Le contrôle électrique de l'humidité des matériaux. *Measures & Contrôle Industriel*, 24, 33-38, 1959.
17. **Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P.:** Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Res. Res.*, 16, 574-582, 1980.
18. **Wang J.R., Schumge T.J.:** An empirical model for the complex dielectric constant of soils as a function of water content. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*. GE-18, 288-295, 1980.
19. **Whalley W.R.:** Considerations on the use of time-domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content. *J. Soil Sci.*, 44, 1-9, 1993.

EVALUATION OF APPLIED DIELECTRIC MIXING MODELS OF MINERAL SOILS

W. Skierucha¹, M.A. Malicki²

Institute of Agrophysics Polish Academy of Sciences, Doświadczalna 4

P.O. Box 201, 20-290 Lublin, Poland

E-mail: ¹skieruch@demeter.ipan.lublin.pl, ²mmal@demeter.ipan.lublin.pl

SUMMARY

The popular dielectric mixing models for mineral soils: 3-phase model α , 4-phase model α , 4-phase model α with the bound water dielectric permittivity dependent on soil moisture, 4-phase de Looor model and regression model were discussed. It was found that 4-phase model α with the bound water dielectric permittivity dependent on soil moisture works almost the same as the regression model, which allows the user to omit individual calibration of dielectric water content measurement.

K e y w o r d s: time domain reflectometry, TDR, soil dielectric permittivity, soil water content.