

WERYFIKACJA MODELU PRZEPLYWU WODY W STREFIE AERACJI
W LATACH 2004-2007 NA PODSTAWIE BADAN TERENOWYCH

*Malgorzata Biniak-Pieróg¹, Anna Machowczyk²
Wieslaw Szulczewski², Andrzej Zyromski¹*

¹Instytut Kształtowania i Ochrony Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
ul. Grunwaldzka 53, 50-357 Wrocław

²Katedra Matematyki, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
e-mail: malbin@op.pl

Streszczenie. W pracy poddano weryfikacji model opracowany na bazie równania Richardsa z funkcjami charakteryzującymi przepływ wody zaproponowanymi przez van Genuchtena. Aproksymacje parametrów przepływu i weryfikacje modelu przeprowadzono na podstawie pomiarów uwilgotnienia gleby lekkiej na sześciu głębokościach, opadów atmosferycznych oraz stanów wód gruntowych pomierzonych na terenie Obserwatorium Agro- i Hydrometeorologicznego Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Dane z okresu od 1 lipca do 15 sierpnia 2006 roku posłużyły do określenia parametrów przepływu. Wstępna weryfikacja przeprowadzono dla okresu od 16 sierpnia do 30 września 2006. Celem sprawdzenia adekwatności opracowanego modelu przepływu przeprowadzono analizy dla lat charakteryzujących się różnymi warunkami agrometeorologicznymi (2004, 2005, 2007). Do porównania wyników zastosowano dwie miary: współczynnik korelacji i względny błąd całkowity.

Słowa kluczowe: wilgotność gleby, TDR, model matematyczny, weryfikacja

WSTEP

Zasoby wodne gleby są istotnym elementem środowiska przyrodniczego, warunkującym prawidłowy wzrost i rozwój roślin. Ich dynamika sterująco zależy od człowieka elementy agrometeorologiczne. Stanowi to tematykę badań m. in. Kozmiskiego i Michalskiej (1995), Olszewskiej i Plywaczyka (1999), Vinnikova i in. (1996), Zyromskiego (2001). W licznych ośrodkach od wielu lat podejmowane są badania nad wpływem tych czynników na zmienność zasobów wodnych gleby pod różnymi powierzchniami. Znajomość dynamiki uwilgotnienia gleby pozwala dość precyzyjnie określić bilans wodny oraz potrzeby nawadniania roślin (Baranowski i in. 1994, Kozmiski i Nidzgorzka-Lencewicz 2002, Robock i in. 2005). Wilgotność

gleby nie jest jednak objęta standardowymi pomiarami agrometeorologicznymi. Pomiar uwilgotnienia gleby jeszcze do niedawna, z uwagi na metodykę poboru próbek, był bardzo pracochłonny. Dlatego też długoletnie i wiarygodne ciągi pomiarowe posiada zaledwie kilka ośrodków badawczych. Takie pomiary są często podstawą do budowy i weryfikacji modeli matematycznych zasobów wodnych gleby, uwzględniających kompleksowe oddziaływanie czynników agrometeorologicznych.

MATERIAL I METODYKA BADAN

Celem pracy jest weryfikacja parametrów funkcyjnych oraz przyjętego modelu matematycznego, odpowiedzialnych za ruch wody w profilu glebowym, otrzymanych na podstawie wcześniejszych badań autorów (Biniak-Pieróg i in. 2007). Parametry te określono na podstawie serii pomiarów pochodzących z okresu od 1 lipca do 15 sierpnia 2006 r.

Do analiz wykorzystano serie opadów atmosferycznych, poziom zalegania zwierciadła wody gruntowej oraz wysokości parowania wskaźnikowego, skorygowane dla powierzchni nieporosnietej za pomocą empirycznych współczynników Rojka (1987). Dane pochodziły z wybranych miesięcy półrocza letniego (lipiec, sierpień, wrzesień) z lat 2004-2007. Obserwacje prowadzono na terenie Obserwatorium Agro- i Hydrometeorologicznego Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu-Swojcu.

Wielkość oraz czas wystąpienia opadów atmosferycznych zostały określone na podstawie pomiarów pluwiometrycznych, dodatkowo weryfikowanych wartościami pomierzonymi deszczomierzem Hellmanna, stany wody gruntowej mierzonej w piezometrze, natomiast parowanie wskaźnikowe ewaporometrem Wilda. Równolegle prowadzono bezpośrednie pomiary wilgotności gleby pod powierzchnią nieporosniętą z wykorzystaniem metody TDR. Pomiar wilgotności opiera się na pomiarze prędkości rozchodzenia się impulsu elektromagnetycznego w badanym ośrodku, która zależy od stałej dielektrycznej tego ośrodka.

Sondy do pomiaru wilgotności gleby pod powierzchnią nieporosniętą zostały zainstalowane na stałe na sześciu głębokościach profilu glebowego: 5, 20, 40, 60, 80 i 100 cm. Pomiary wilgotności gleby wykonywano codziennie w trzech powtórzeniach podczas porannej obserwacji. Do analiz przyjmowano ich uśrednione wartości.

Weryfikacje modelu przeprowadzono w poszczególnych okresach badawczych dla zróżnicowanej liczby dni. Wynikało to z awarii urządzenia do pomiaru wilgotności gleby, awarii sond TDR na niektórych głębokościach lub braku danych meteorologicznych. Z uwagi na problemy techniczne w 2004 roku analizie poddano dane z okresu od 16 lipca do 30 września (77 dni). W roku 2005 weryfikacje przeprowadzono dla 90 dni (od 1 lipca do 28 września), w 2006 roku dla 46 dni (od 16 sierpnia do 30 września). W 2007 roku dane pochodziły z okresu od

1 lipca do 23 wrzesnia (85 dni), brano jednak pod uwage wyniki pomiarów wilgotnosci z 5 glebokosci gleby, z uwagi na awarie sondy pomiarowej zainstalowanej na glebokosci 60 cm.

Na terenie Obserwatorium Agro- i Hydrometeorologicznego we Wrocławiu-Swojcu wystepuja piaski slabogliniaste calkowite oraz piaski slabogliniaste podscielone glina. Pod wzgledem skladu mechanicznego sa to piaski slabogliniaste, piaski gliniaste mocne, piaski pylaste oraz piaski luzne. Szczegółowa analiza warunków glebowych na terenie obiektu zawarta jest w ekspertyzie z 1965 roku (Mazij i in. 1965). Na etapie aproksymacji parametrów funkcyjnych odpowiedzialnych za przeplyw wody w glebie (Biniak-Pieróg i in. 2007) przyieto jednorodnosc profilu.

Analizy warunków opadowych w rozpatrywanych miesiacach dokonano w oparciu o klasyfikacje Kaczorowskiej (1962). Jako odniesienie przyieto srednie miesieczne sumy opadów atmosferycznych z wielolecia 1971-2000. Na podstawie analizy odchylen sum opadów atmosferycznych stwierdzono, ze lipiec w latach 2004 i 2005 byl miesiacem normalnym, natomiast w roku 2006 skrajnie suchym, a w 2007 wilgotnym. W odniesieniu do opadów wieloletnich stwierdzono, ze sierpien w 2004 roku byl okresem bardzo suchym, w latach 2005 i 2007 suchym, natomiast w 2006 roku szczególnie wilgotnym. Wrzesien sklasyfikowano jako suchy w roku 2004, bardzo suchy w latach 2005 i 2006, a w roku 2007 jako normalny. Analizujac cale okresy od lipca do wrzesnia stwierdzono, ze byly one bardzo suche w roku 2004, suche w 2005, a normalne w latach 2006 i 2007.

Zwierciadło wody gruntowej w analizowanym okresie zalegalo na sredniej glebokosci 128 cm w 2006 roku do 160 cm w latach 2004 i 2007. Natomiast srednie dobowe wielkosci parowania wskaźnikowego wahaly sie od 1,7 mm w 2006 roku do 3,2 mm w 2004 roku.

Do opisu przeplywu wody w badanym profilu glebowym zastosowano równanie Richardsa (Szulczewski 1986, 1990; Zaradny 1990):

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial z} - K(h) \right) \quad (1)$$

gdzie: z – zmienna przestrzenna (cm),

t – czas (doba),

$q = q(z, t)$ – wilgotnosc objetosciowa ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$),

$h(q)$ – cisnienie ssace (cm),

$C(h) = \frac{\partial q}{\partial h}$ – różniczkowa pojemnosc wodna (cm^{-1}),

$K(h)$ – przewodnosc hydrauliczna gleby ($\text{cm} \cdot \text{doba}^{-1}$).

Dla jednoznaczego rozwiazania powyższego równania jako warunki początkowe przyjmowano wilgotnosci gleby pomierzone metoda TDR oraz glebokosc

zalegania zwierciadła wody w pierwszym dniu każdego okresu weryfikacji. Warunki brzegowe wpływające na proces przepływu wody na powierzchni terenu określono na podstawie dobowych sum opadu, opadów godzinnych oraz parowania dobowego (rys. 1, 2). W związku z tym proces przepływu na powierzchni został opisany przez warunek brzegowy II rodzaju (warunek Neumanna).

$$-K(h)\frac{\partial h}{\partial z} + K(h)\Big|_{z=z_0} = q_0(t) \quad (2)$$

gdzie: t – czas procesu (doba), $z_0 = 0$ lub $z_0 = L$.

W przypadku opadów przekraczających zdolności infiltracyjne rozpatrywanej gleby, przyjęto na powierzchni terenu warunek brzegowy Dirichleta realizujący maksymalny przepływ. Czas realizacji tego procesu był równy czasowi trwania opadów.

Miażdżność rozpatrywanego profilu L przyjęto jako równą 300 cm. W trakcie symulacji procesu na tej głębokości realizowano brak przepływu. Przybliżone rozwiązanie równania przepływu otrzymano metodą schematów różnicowych, stabilnych bez względu na kierunek przepływu (Szulczewski 2003).

Parametry funkcyjne, krzywa pF oraz przewodność hydrauliczna, zostały przyjęte w postaci funkcji zaproponowanych przez van Genuchtena (van Genuchten 1980, Wosten i van Genuchten 1988):

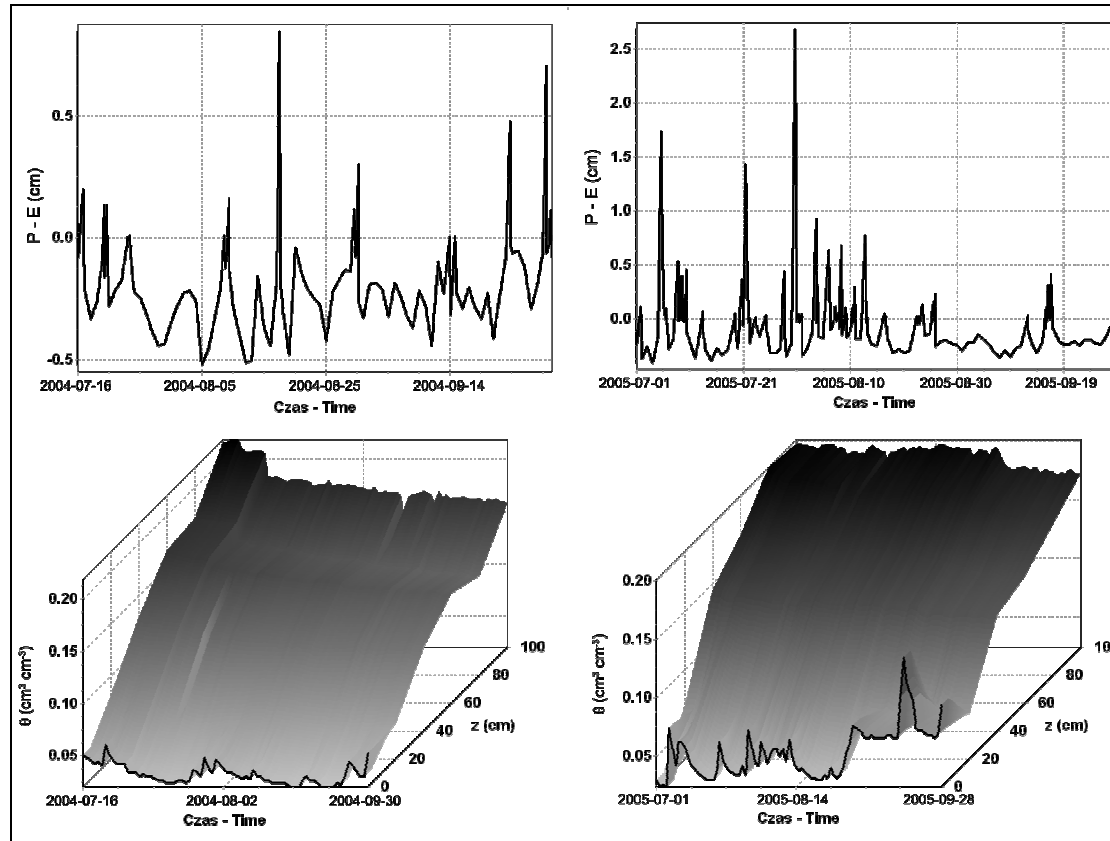
$$h(\mathbf{q}) = -\frac{1}{g} \left[s - \frac{1}{m-1} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

$$K(h) = K_s \left[(-gh)^n + 1 \right]^{-hm} \left[1 - \left(1 - \frac{1}{(-gh)^n + 1} \right)^m \right]^2 \quad (3)$$

gdzie: $s = \frac{\mathbf{q} - \mathbf{q}_r}{\mathbf{q}_s - \mathbf{q}_r}$, $m = 1 - \frac{1}{n}$, $\mathbf{q} = \mathbf{q}(z, t)$ – wilgotność objętościowa ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_r –

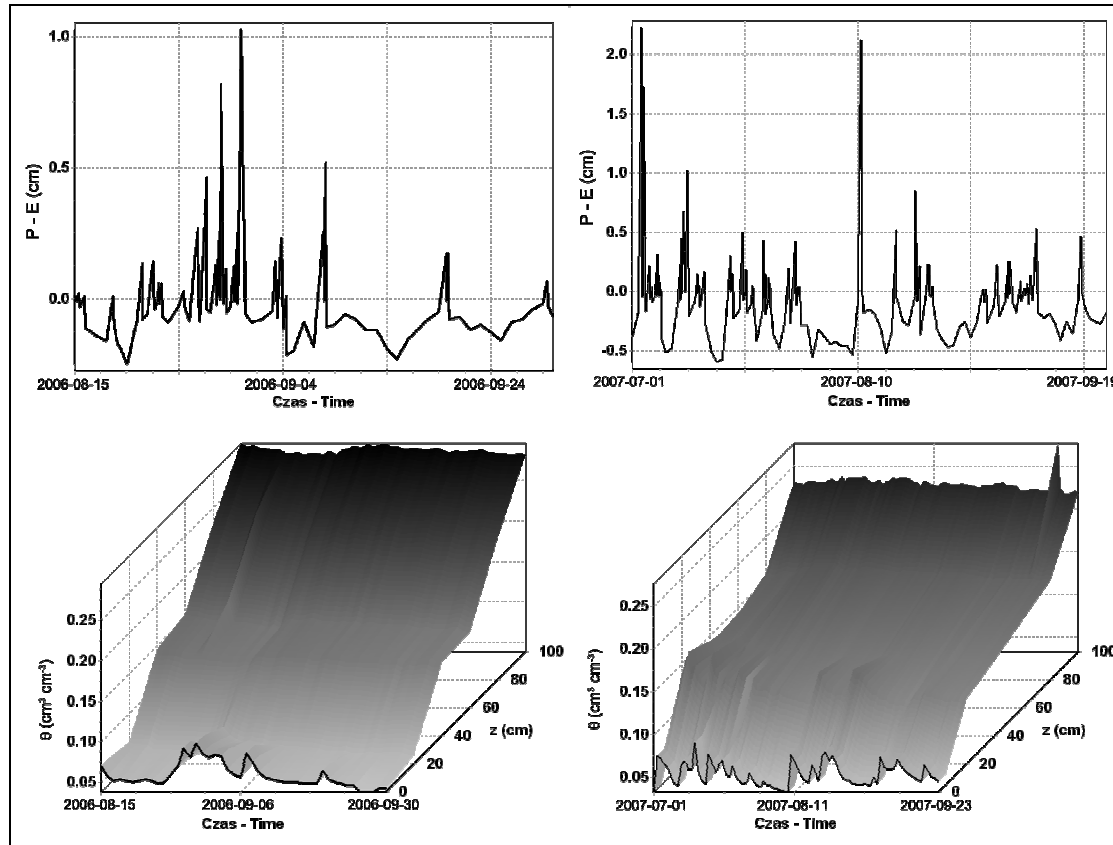
wilgotność objętościowa ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) odpowiadająca pF = 4,2; θ_s – wilgotność objętościowa ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) przy stanie pełnego nasycenia; K_s – współczynnik filtracji ($\text{cm} \cdot \text{doba}^{-1}$); n, m, γ, p, η – stałe, $n > 1$, $\gamma > 0$, $\eta > 0$ (w modelu przyjęto $\eta = 0,5$).

Na podstawie pomiarów z lipca i połowy sierpnia 2006 roku wyznaczono metodą Hooke'a-Jeevesa (Baron i in. 2006) pięć parametrów jednoznacznie opisujących badany osrodek gruntowy minimalizując odchylenie wartości wilgotności pomierzonych i teoretycznych. Otrzymano: wilgotność pełnego nasycenia $\mathbf{q}_s = 0,36$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), wilgotność dla punktu trwałego wiedniecia roślin $\mathbf{q}_r = 0,001$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), współczynnik filtracji $K_s = 300$ ($\text{cm} \cdot \text{doba}^{-1}$), $\gamma = 0,009$ (cm^{-1}), $n = 4,7$ (Biniak-Pieróg i in. 2007).



Rys. 1. Zmienność opadu P, parowania E oraz wilgotności gleby θ (pomiar TDR) dla okresów od 1 lipca do 30 września w latach 2004 i od 1 lipca do 28 września 2005 w zależności od analizowanej warstwy gleby

Fig. 1. Variability of precipitation P, evaporation E and soil moisture θ (TDR measurements) for the period from 1th of July to 30th of September 2004 and 1th of July to 28th of September 2005 for different soil layers



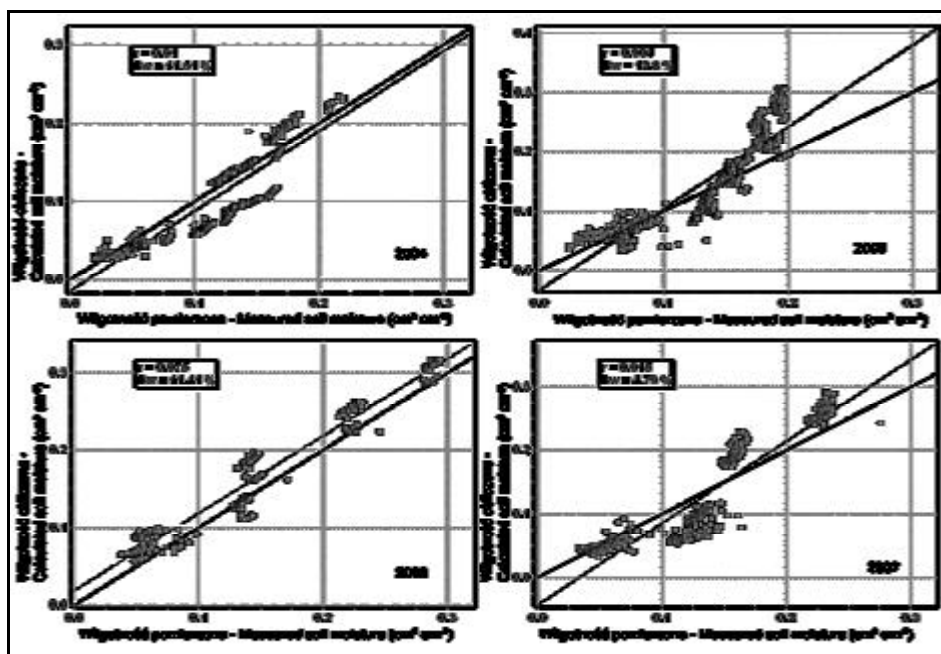
Rys. 2. Zmienność opadu P, parowania E oraz wilgotności gleby θ (pomiar TDR) dla okresów od 1 lipca do 30 września w latach 2006, 1 lipca do 23 września 2007 w zależności od analizowanej warstwy gleby

Fig. 2. Variability of precipitation P, evaporation E and soil moisture θ (TDR measurements) for the period from 1th of July to 30th of September 2006, 1th of July to 23th of September 2007 for different soil layers

ANALIZA WYNIKÓW

Dla określenia dopasowania danych z czterech okresów weryfikacyjnych wyznaczono współczynniki korelacji oraz procentowa różnice retencji do głębokości 100 cm otrzymana z modelu oraz pomiarów. Dla aproksymowanej krzywej pF oraz funkcji K otrzymanych na podstawie danych z okresu od 1.07 do 15.08.2006, miary te wyniosły odpowiednio 0,952 oraz 8,14%.

Najmniejsze różnice między danymi pomierzonymi a obliczonymi z modelu otrzymano w roku 2006 (od $-0,03$ do $0,05 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ – rys. 3) oraz w roku 2004 (od $-0,05$ do około $0,04 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$). W latach 2005 powyższa różnica wyniosła od $-0,07$ do $0,1 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, a w roku 2007 od $-0,08$ do $0,06 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$.



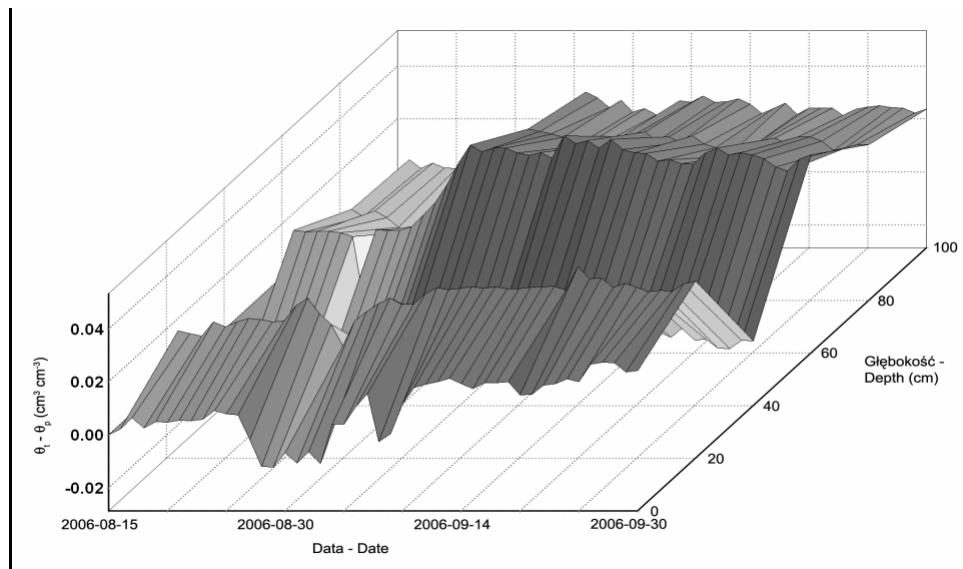
Rys. 3. Zależności pomiędzy obliczona oraz pomierzona wilgotnością dla aproksymowanych krzywych pF oraz K otrzymane dla wybranych miesięcy półrocza letniego w latach 2004, 2005, 2006, 2007

Fig. 3. Dependences between calculated and measured soil moisture for approximated pF curves and K obtained for the selected months of half-years in 2004, 2005, 2006, 2007

Dla czterech okresów weryfikacyjnych wszystkie współczynniki korelacji r wyniosły powyżej 0,9. Najlepszy wynik otrzymano dla analizowanych miesięcy

letnich w roku 2006 (ponad 0,97) (rys. 4). Dodatkowo na rysunku 4 zamieszczono proste regresje, które ułatwiają analizie otrzymanych rezultatów.

Srednia różnica wilgotności gleby B_w latach 2004, 2005 oraz 2006 wahała się od 11,4% do prawie 13%, natomiast w roku 2007 wyniosła ona niecałe 5%.



Rys. 4. Różnica wilgotności pomierzonej metoda TDR (θ_p) oraz wilgotności obliczonej z modelu (θ) dla okresu od 15.08.2006 do 30.09.2006

Fig. 4. Difference between soil moisture measured using TDR method (θ_p) and soil moisture calculated from the model (θ) for the period from 15.08.2006 to 30.09.2006

WNIOSKI

1. Otrzymane wartości współczynników korelacji potwierdzają przydatność zastosowanego modelu matematycznego do wyznaczania wilgotności gleby lekkiej pod powierzchnią nieporosnieta na terenie Obserwatorium Agro- i Hydrometeorologicznego we Wrocławiu-Swojcu.

2. Niezależnie od panujących warunków opadowych w analizowanych okresach – miesiąc skrajnie suchy, bardzo suchy, normalny i wilgotny – bardzo dobra zgodność wartości wilgotności pomierzonych i obliczonych, otrzymano do głębokości 60 cm. Dla większych głębokości gleby (80, 100 cm) we wszystkich weryfikowanych okresach, obliczone wartości wilgotności były wyższe od pomierzonych metoda TDR. Przyczyna tych rozbieżności może być przepływ horyzontalny w strefie saturacji, który w powyższym modelu nie został uwzględniony.

3. Dodatkowych badań wymaga zmienność parametrów funkcyjnych odpowiedzialnych za przepływ wody w zależności od głębokości. Analiza otrzymanych rezultatów sugeruje występowanie przewarstwienia w rozpatrywanym profilu glebowym na głębokości około 60 cm.

4. Weryfikacja modelu została wykonana na podstawie danych nie poddanych wstępnej analizie poprawności, co niewątpliwie poprawiło by dokładność otrzymanych rezultatów. Dotyczy to szczególnie roku 2007, w którym na głębokości 100 cm widoczny był błąd w pomiarach, potwierdzony awarią sondy TDR, która nie funkcjonowała po 23 września 2007 roku.

5. Przybliżenie występujące w warunkach brzegowych realizowanych na powierzchni terenu dla opadów przekraczających zdolności infiltracyjne gleby, może powodować powstawanie błędów bilansu wodnego dla okresów o intensywnych opadach, gdyż na rozpatrywanym obszarze proces spływu powierzchniowego praktycznie nie występuje.

PISMIENICTWO

- Baranowski P., Kossowski J., Usowicz B., 1994. Spatial variability of soil water content in cultivated fields. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 405, 9-19.
- Baron B., Pasierbek A., Maciazek M., 2006. Algorytmy numeryczne w Delphi. Helion, Gliwice, 544.
- Biniak-Pieróg M., Machowczyk A., Szulczewski W., Zyromski A., 2007. Analiza porównawcza dokładności wybranych modeli przepływu wody w glebie na podstawie oceny wilgotności uzyskanej w badaniach terenowych. *Woda-Srodowisko-Obszary Wiejskie*, t. 8 z. 1 (22), 29-38.
- Kaczorowska Z., 1962. Opady w Polsce w przekroju wieloletnim. *Prace Geograficzne*, 33, Instytut Geograficzny PAN, 102.
- Kozminski Cz., Michalska B., 1995. Extreme soil moisture under winter crops in spring in Poland. Part 1. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 419, 59-67.
- Kozminski Cz., Nidzgorska-Lencewicz J., 2002. Kształtowanie się zasobów w profilu gleby lekkiej w Stacji Agrometeorologicznej w Lipkach koło Stargardu Szczecińskiego. *Acta Agrophysica*, 78, 133-150.
- Mazij S., Kowalski J., Wozny F., Szpikowski A., Krezel J., 1965. Ekspertyza hydrogeologiczna i gleboznawcza pól ustalonych na Swojcu k. Wrocławia – „Warunki hydrogeologiczne i glebowo – wodne pól ustalonych Instytutu Gospodarki Wodnej – położonych na terenie RZD w Swojcu k. Wrocławia. Katedra Agro- i Hydrometeorologii Akademii Rolniczej we Wrocławiu (maszynopis).
- Olszewska B., Plywaczyk L., 1999. Groundwater participation in water management of the soils in the Odra valley in the region of the Brzeg Dolny dam. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu*, CC-CX, *Melior. Inz. Srod.*, 20, cz. II, 211-221.
- Robock A., Mu M., Vinnikov K., Trofimova I. V., Adamenko T. I., 2005. Forty–five years of observed soil moisture in Ukraine: No summer desiccation (yet). *Geophysical Research Letters*, 32, LO3401-LO3405.
- Rojek M., 1987. Rozkład czasowy i przestrzenny klimatycznych i rolniczo-klimatycznych bilansów wodnych na terenie Polski. *Zesz. Nauk. Akademii Rolniczej we Wrocławiu*, 62, 28-37.
- Szulczewski W., 1986. Sterowanie stopniem wilgotności gleby w obszarze ukorzenienia roślin (w oparciu o równanie dyfuzji). *Zesz. Nauk. Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Melioracja* 30, 174, 109-127.

- Szulczewski W., 1990. Modelowanie zmian uwilgotnienia gleby w strefie niepełnego nasycenia. Zesz. Nauk. Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Melioracja, 36, 192, 87-98.
- Szulczewski W., 2003. Modelowanie migracji zanieczyszczeń w nienasyconych gruntach i glebach. Zesz. Nauk. Akademii Rolniczej we Wrocławiu, 466, 112.
- Van Genuchten M.Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Am. J., 44, 892-898.
- Vinnikov K. Y., Robock A., Speranskaya N. A., Schlosser C. A., 1996. Scales of temporal and spatial variability of midlatitude soil moisture. Journal of Geophysical Research, 101, nr D3, 7163-7174.
- Wosten J.H.M., Van Genuchten M.Th., 1988. Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic function. Soil. Sci. Am. J., 52, 1762-1770.
- Zaradny H., 1990. Matematyczne metody opisu i rozwiązań przepływu wody w nienasyconych i nasyconych gruntach i glebach. Prace Instytutu Budownictwa Wodnego PAN, 23, 367.
- Zyromski A., 2001. Czynniki agrometeorologiczne a kształtowanie się zasobów wody w glebie lekkiej z podziakiem wód gruntowych w okresie wiosennym. Zesz. Nauk. Akademii Rolniczej we Wrocławiu, 404, Rozprawy CLXXVIII.

VERIFICATION OF SOIL WATER FLOW MODEL IN AERATION ZONE ON THE BASIS OF FIELD INVESTIGATIONS DURING YEARS 2004-2007

*Malgorzata Biniak-Pieróg¹, Anna Machowczyk²
Wiesław Szulczewski¹, Andrzej Zyromski¹*

¹The Institute for Environmental Engineering and Protection,
University of Environmental and Life Sciences

²The Department for Mathematics, University of Environmental and Life Sciences
ul. Grunwaldzka 53, 50-357 Wrocław
e-mail: malbin@op.pl

Abstract. Soil water resources significantly influence plants growth. The assessment of the thermal and rain conditions influence is often carried out using mathematical modelling. In the study presented in this paper the verification of the model worked out on the basis of Richards's equation with functions characteristic for water flow as suggested by van Genuchten was performed. Approximation of flow parameters and model verification was worked out on the basis of the soil moisture content measured at six depths, precipitation sums, and ground water level measurements in the area of the Agro- and Hydrometeorological Observatory of Wrocław University of Environmental and Life Sciences. Data from the period from 1st of July to 15th of August 2006 were used to specify soil water flow parameters. The preliminary verification was carried out for the period from 16th of August to 30th of September 2006. In order to check the accuracies of the moisture content values measured and computed with the model, analysis for the years, characterized by different agrometeorological conditions (2004, 2005, 2007), was performed. For comparing these results two measures were used: the correlation coefficient and the relative error.

Key words: soil moisture, TDR, mathematical model, verification