

ZASTOSOWANIE REFLEKTOMETRII CZASOWEJ (TDR) DO
WYZNACZANIA POBORU WODY PRZEZ MASĘ KORZENIOWĄ
KUKURYDZY W KOŃCOWEJ FAZIE WEGETACJI*

Grzegorz Janik

Instytut Kształtowania i Ochrony Środowiska, Akademia Rolnicza
Pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław
e-mail: janik@miks.ar.wroc.pl

Streszczenie. W pracy zaprezentowano wykorzystanie technologii TDR do wyznaczenia dobowej dynamiki poboru wody przez korzenie kukurydzy. Metoda wykorzystuje znajomość dynamiki wilgotności gleby do budowy bilansu wodnego wydzielonych przestrzeni w warstwie korzeniowej rośliny. Bilans zbudowany dla kroków czasowych $\Delta t = 1h$ pozwolił na wyznaczenie intensywności pobierania wody przez całą masę korzeniową. Stwierdzono, że pobór wody przez korzenie rośliny zaczyna występować o godzinie 9 osiągając swoje maksimum około godziny 12, a w godzinach od 18 do 20 intensywność spada z powrotem do zera. Stwierdzono również, że w rozpatrywanym zakresie wilgotności, od 4 do 14% w górnej warstwie korzeniowej, dobowe zużycie wody jest wprost proporcjonalne do wartości wilgotności i dla pojedynczego pędu wynosi od 20 do 300 ml w ciągu doby.

Słowa kluczowe: technika TDR, wilgotność w czynnej warstwie gleby, pobór wody przez korzenie roślin

WSTĘP

Symulacja poboru wody z gleby przez korzenie roślin jest kluczowym zagadnieniem podczas ustalania wielkości i częstości jej nawadniania. Intensywność poboru wody jest zależna m. in. od: głębokości i gęstości masy korzeniowej, stadium rozwojowego rośliny, zmiennych w ciągu doby warunków atmosferycznych, stopnia zagęszczenia gleby, a także od wartości potencjału wody glebowej i różnicy potencjałów pomiędzy glebą i korzeniem. Złożoność procesu sprawia, że jego ilościowy opis wymaga wyznaczenia wielu danych wejściowych.

* Badania terenowe przeprowadzono przy udziale studentów z SKN Meliorantów im. prof. S. Baca z Akademii Rolniczej we Wrocławiu.

Jest to jednak związane z przeprowadzeniem wielu pracochłonnych badań [4,7,10]. Szerokie w ostatnich latach zastosowanie techniki TDR, pozwala na nieinwazyjny monitoring statusu wody w glebie [5,6]. To z kolei, umożliwia budowę równania bilansu wodnego dla krótkich chwil czasowych, dla dowolnie wydzielonych przestrzeni glebowych. W konsekwencji możliwe jest wyznaczenie metodą pośrednią, poszczególnych składników tego równania. Przykładowo, znając dynamikę wilgotności wierzchniej warstwy gleby można, przy pewnych założeniach, wyznaczyć intensywność opadu atmosferycznego netto, poprzez potraktowanie go jako jedynego brakującego składnika równania bilansu [2]. Podobnie, można wyznaczyć wielkość spływu powierzchniowego znając oprócz dynamiki wilgotności gleby intensywność opadu atmosferycznego [3].

Plonowanie kukurydzy jest zależne m.in. od warunków meteorologicznych, wielkości nawożenia, skłonu terenu ale w głównej mierze od ilości wody pobieranej przez korzenie rośliny [8,9,11]. W niniejszej pracy technika TDR zostanie wykorzystana do wyznaczenia dobowej dynamiki oraz przestrzennego rozkładu poboru wody przez korzenie roślin na przykładzie kukurydzy.

Celem pracy jest przedstawienie metody wyznaczania dobowej dynamiki oraz przestrzennego rozkładu ilości pobieranej wody przez korzenie kukurydzy. Metoda wykorzystuje ideę rozwiązania zadania odwrotnego, w którym szukana wielkość, w tym przypadku objętość wody pobraną przez korzenie kukurydzy można wyznaczyć poprzez znajomość dynamiki uwilgotnienia w obrębie masy korzeniowej rośliny.

MATERIAŁY I METODY

Sposób wykorzystania znajomości dynamiki uwilgotnienia gleby do wyznaczania ilości wody pobranej przez korzenie rośliny z wydzielonej objętości, przedstawiono na rysunku 1. Ilość wody pobrana przez korzenie z *i-tej* przestrzeni glebowej, w czasie Δt , może być obliczona korzystając z zależności:

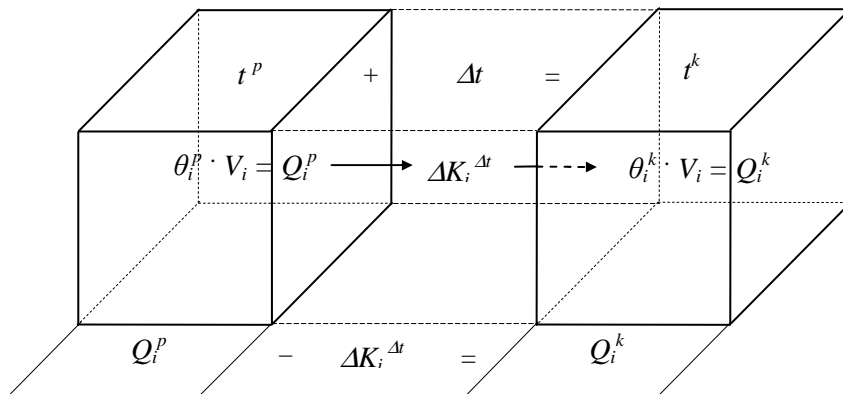
$$\Delta K_i^{\Delta t} = V_i \left(\frac{\theta_i^p - \theta_i^k}{\Delta t} \right), \quad (1)$$

gdzie: $\Delta K_i^{\Delta t}$ – ilość wody pobrana przez korzenie roślin z *i-tej* przestrzeni w czasie Δt , V_i – objętość *i-tej* przestrzeni, θ_i^p – wilgotność w *i-tej* przestrzeni w chwili początkowej, θ_i^k – wilgotność w *i-tej* przestrzeni w chwili końcowej.

Korzystając z zależności 2 można obliczyć całkowitą ilość wody pobraną przez masę korzeniową w czasie Δt jako sumę ilości wody pobranej z *i-tych* przestrzeni.

$$K_c^{\Delta t} = \sum_{i=1}^n \Delta K_i^{\Delta t}, \quad (2)$$

gdzie: $K_c^{\Delta t}$ – całkowita ilość wody pobrana przez masę korzeniową w czasie Δt , n – liczba przestrzeni składająca się na całkowitą przestrzeń masy korzeniowej ($n = 6$), $\Delta K_i^{\Delta t}$ – jak w zależności 1.

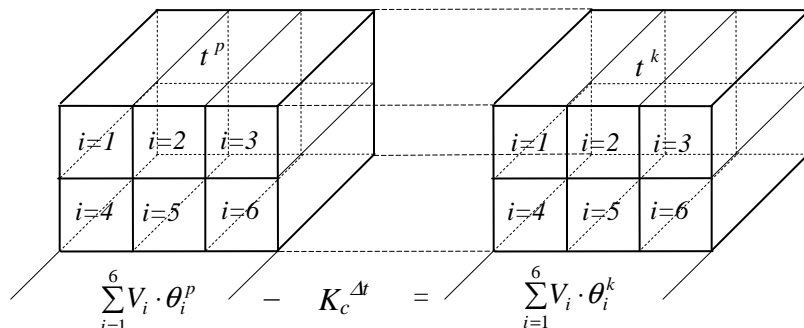


t^p – chwila początkowa, initial moment, Δt – krok czasowy, time step t^k – chwila końcowa, final moment, $\theta_i^p, (\theta_i^k)$ – wilgotność początkowa (końcowa) w i -tej przestrzeni, initial (final) moisture in the i -th space, V_i – objętość i -tej przestrzeni, volume of the i -th space, $Q_i^p, (Q_i^k)$ – ilość wody w i -tej przestrzeni w chwili początkowej (końcowej), amount of water in the i -th space at the initial (final) moment, $\Delta K_i^{\Delta t}$ – pobór wody przez korzenie roślin z i -tej przestrzeni w czasie Δt , water uptake by roots from i -th soil space in Δt time.

Rys. 1. Pobór wody przez masę korzeniową w wybranej przestrzeni glebowej

Fig. 1. Water uptake by roots in the selected soil space

W niniejszej pracy przyjęto, że całkowita przestrzeń, z której pobierana jest woda przez roślinę reprezentowana jest przez sześć równych, prostopadłościennych przestrzeni, których rozmieszczenie przedstawiono na rysunku 2. Ponadto zastosowanie wzorów 1 i 2 jest możliwe, gdy rozpatrywana przestrzeń jest odizolowana. Oznacza to, że zmiana ilości wody w jej wnętrzu wynika jedynie z poboru wody przez korzenie roślin, a nie np. z parowania wody z powierzchni gleby, bądź z opadu atmosferycznego. Przyjmuje się również brak migracji wody między i -tymi przestrzeniami. Jeżeli jednak warunek ten nie będzie spełniony, a rozpatrywana będzie cała przestrzeń, w której znajduje się masa korzeniowa, to migracja wody pomiędzy i -tymi przestrzeniami nie wpłynie na dokładność wyznaczenia bilansu.



t^p – chwila początkowa, initial moment, t_k – chwila końcowa, final moment, V_i – objętość i -tej przestrzeni, volume of the i -th space, $\theta_i^p, (\theta_i^k)$ – wilgotność początkowa (kończąca) w i -tej przestrzeni, initial (final) moisture in the i -th space, $K_c^{\Delta t}$ – ilość wody pobrana przez masę korzeniową, water uptake by roots.

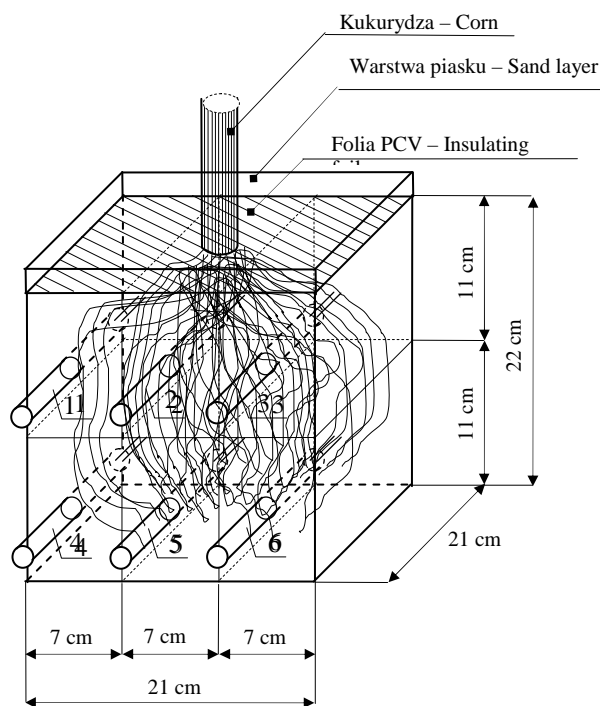
Rys. 2. Rozmieszczenie reprezentatywnych przestrzeni glebowych

Fig. 2. Location of the examined soil spaces

OPIS EKSPERYMENTU I UZYSKANE WYNIKI

Badania przeprowadzono w miejscowości Sucha Rzeczka w województwie warmińsko-mazurskim w 2004 r. W pierwszym etapie pobrano z pola pojedynczy pęd kukurydzy (*Zea mays* – odmiana Reduta) z nienaruszonym systemem korzeniowym oraz nienaruszoną strukturą glebową. Całość umieszczono w prostopadłościennym pojemniku, którego wymiary przedstawiono na rysunku 3. W celu wyeliminowania wpływu parowania z powierzchni gleby oraz dopływu wody z ewentualnego opadu atmosferycznego górną powierzchnię próbki przykryto folią oraz dociśnięto 5-cio centymetrową warstwą piasku. W tak przygotowanej próbce zainstalowano sześć czujników TDR. Próbkę postawiono w terenie nasłonecznionym a obserwacje dynamiki wilgotności prowadzono przez 7 dób co 1-ną godzinę w każdej wyodrębnionej objętości. Badania prowadzono w drugiej połowie września.

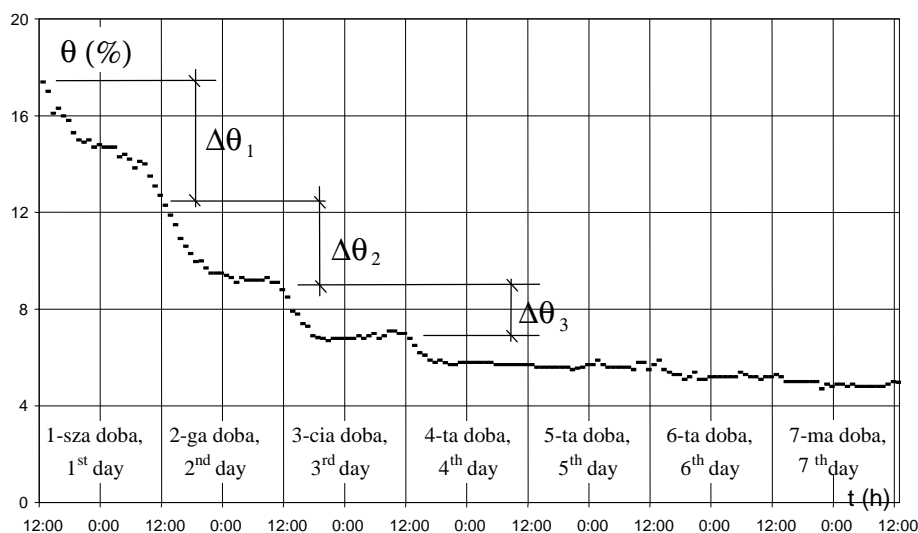
Na rysunku 4 przedstawiono zmiany wilgotności gleby w punkcie znajdującym się na głębokości 5,5 cm od powierzchni terenu w osi symetrii masy korzeniowej kukurydzy. Zaobserwowano ciągły spadek wilgotności. W początkowym okresie – pierwsze 3 doby – dobowe spadki wilgotności były wyraźne i wynosiły: w pierwszej dobie $\Delta\theta_1 = 6\%$, w drugiej dobie $\Delta\theta_2 = 2\%$, a w trzeciej dobie $\Delta\theta_3 = 1\%$. Przez następne cztery doby zaobserwowano spadek jedynie o 1%.



1, 2, 3, 4, 5, 6 – czujniki TDR – TDR sensors

Rys. 3. Schemat próbki glebowej wraz z czujnikami TDR**Fig. 3.** A soil sample scheme with TDR sensors

Jest to spowodowane brakiem wody dostępnej dla rośliny. Podobną tendencję zmian wilgotności zaobserwowano w pozostałych wydzielonych przestrzeniach, w których dynamikę wilgotności przedstawiono na rysunku 5. Z rysunku można zauważyć, że wilgotność początkowa wskazywana przez sondę TDR była wyższa w górnych przestrzeniach ($i = 1,2,3$) i wynosiła od 14 do 18%, natomiast w dolnych przestrzeniach ($i = 4,5,6$) od 7 do 13%. Z rysunku można odczytać te okresy w ciągu doby, w których następował najszybszy spadek wilgotności. W górnej warstwie wyraźny spadek wilgotności występował w godzinach od 9 do 18. W dolnej warstwie zmiany wilgotności były mniej widoczne, wystąpiły jedynie w punkcie umiejscowionym w osi symetrii rośliny ($i = 5$). Okres zmian był jednak taki sam jak w warstwie górnej. Dla każdej przestrzeni wraz z upływem czasu wartości wilgotności malały, a jej spadki w ciągu doby były coraz mniej zauważalne.

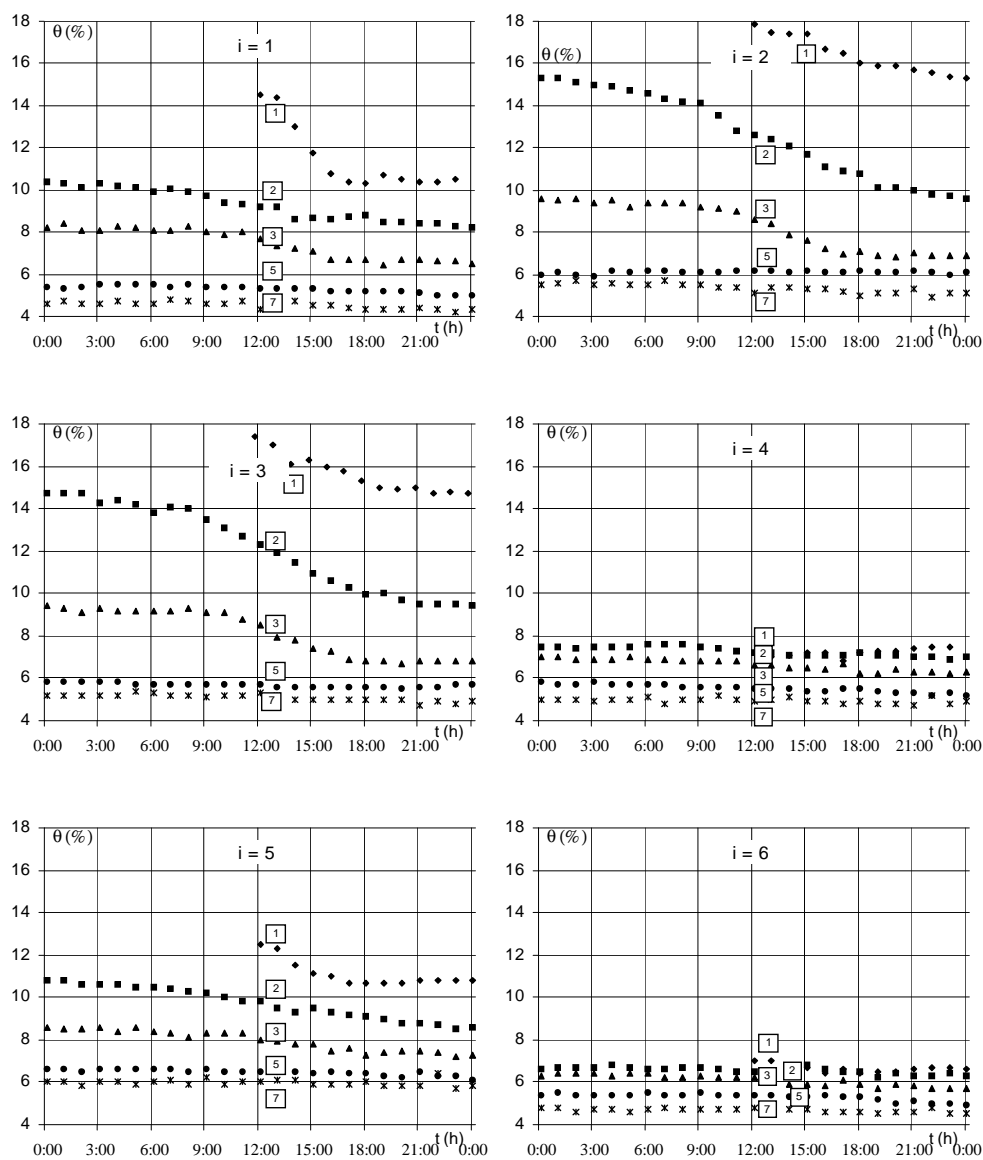


$\Delta\theta_1$, $\Delta\theta_2$, $\Delta\theta_3$ – spadek wilgotności w pierwszej, drugiej i trzeciej dobie, decrease in moisture during the first, second and third day.

Rys. 4. Dynamika wilgotności w wybranej przestrzeni glebowej ($i = 3$)

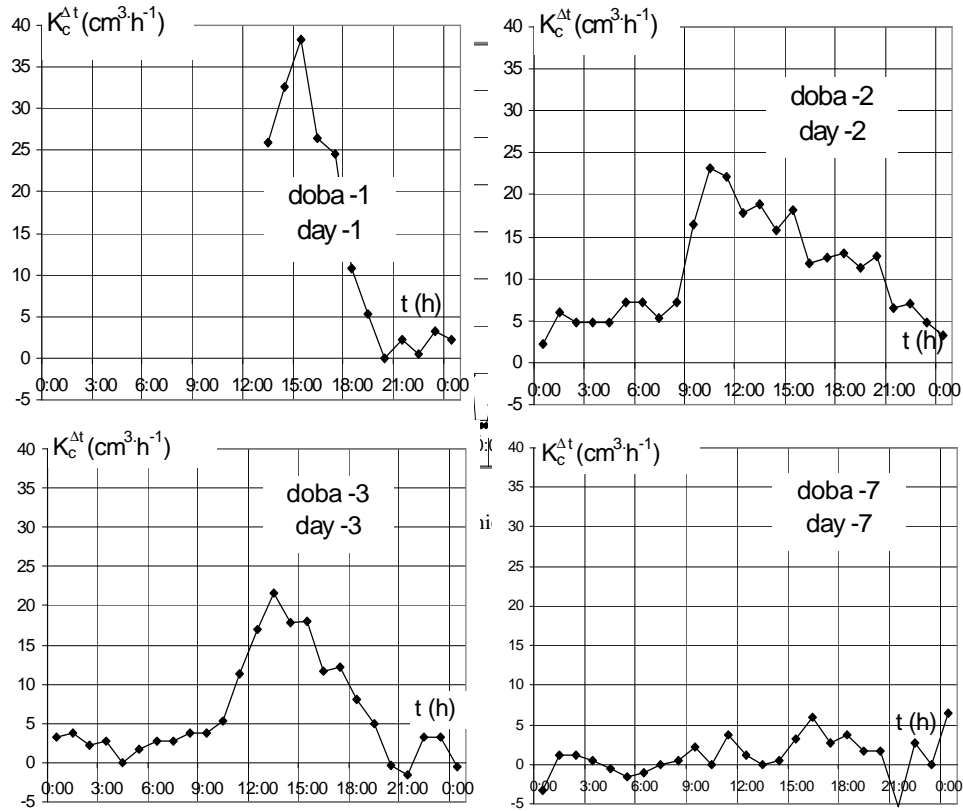
Fig. 4. Moisture dynamics in the selected soil space ($i = 3$) during 7 days

Następnie, korzystając z zależności 2, obliczono całkowitą ilość wody pobieraną przez masę korzeniową kukurydzy. Obliczenia przeprowadzono dla kroku czasowego $\Delta t = 1h$, a ich wyniki przedstawiono na rysunku 6. Z rysunku można odczytać dobowy przebieg intensywności poboru wody przez masę korzeniową. Stwierdzono, że intensywność zaczyna wzrastać około godziny 9 osiągając swoje maksimum w godzinach od 12 do 15 oraz między godziną 18 a 20 intensywność spada praktycznie do zera. Stwierdzono największy pobór wody przez korzenie roślin w pierwszych trzech dobach przeprowadzonego eksperymentu. W następnych, gdy wilgotność profilu glebowego malała, rósł potencjał wody glebowej (h). Z tego powodu pobór wody przez korzenie był znikomy, ponieważ potencjał wody w korzeniu było na tyle mały, że praktycznie uniemożliwiał transport wody do rośliny. Zauważone na rysunku ujemne wartości $K_c^{\Delta t}$ nie mają fizycznego sensu, gdyż przepływ wody z korzenia do gleby jest niemożliwy. Wynikają one ze zbyt małej stabilności wyznaczanego metody dla kroku czasowego $\Delta t = 1h$. Przykładowo błąd w odczycie wilgotności tylko 0,3% w jednej przestrzeni glebowej spowoduje odchyłkę wartości $K_c^{\Delta t}$ w wysokości około $5 \text{ cm}^3 \cdot \text{h}^{-2}$.



θ – wilgotność – moisture, t – czas – time, i – przestrzeń – space, 1,2,3,5,7 – doba – day

Rys. 5. Przestrzenny rozkład dobowej dynamiki wilgotności w obrębie masy korzeniowej kukurydzy
Fig. 5. Spatial distribution of daily moisture dynamics within the root zone of corn

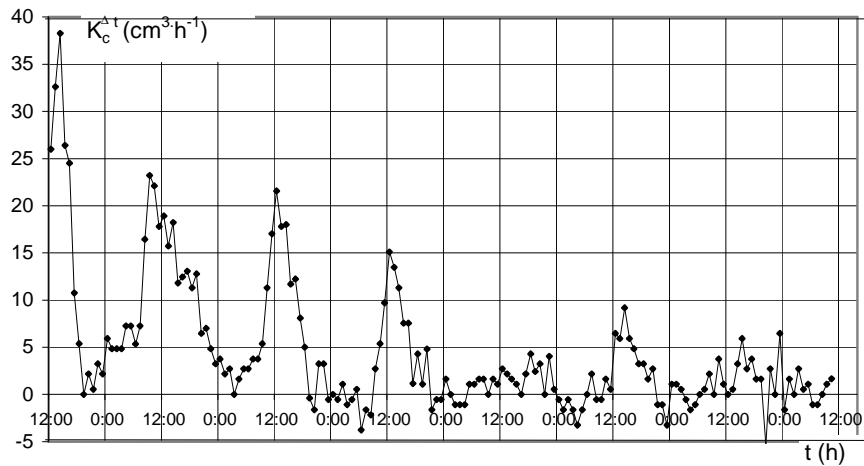


$K_c^{\Delta t}$ – intensywność poboru wody przez korzenie kukurydzy, intensity of water uptake by corn roots

Rys. 6. Pobór wody przez kukurydzę obliczony, dla kroku czasowego $\Delta t = 1\text{h}$, na podstawie zależności 2

Fig. 6. Water uptake by corn calculated for time step $\Delta t = 1\text{h}$ from equation 2

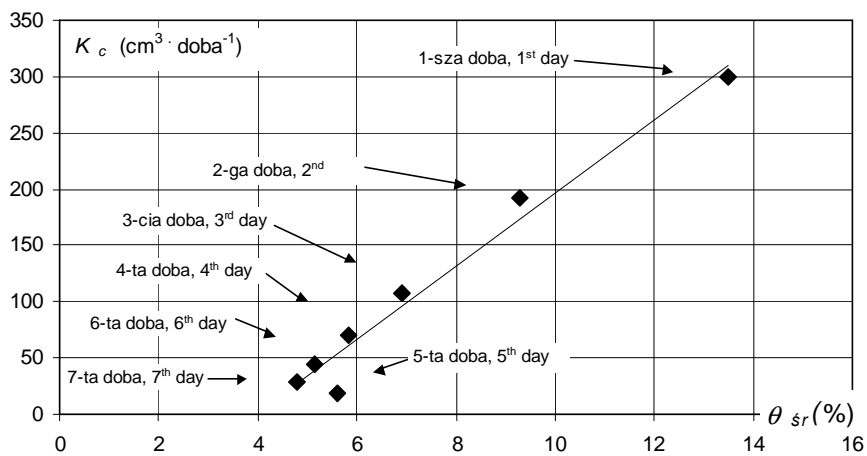
Na rysunku 7 przedstawiono tendencję zmian intensywności $K_c^{\Delta t}$ w ciągu 7 dób. Rysunek ten potwierdza prawidłowość, że wraz z upływem czasu – w tym przypadku wraz ze spadkiem wilgotności – ilość wody pobieranej przez roślinę maleje. Wykorzystując znajomość wielkości intensywności $K_c^{\Delta t}$ dla $\Delta t = 1\text{h}$, obliczono średnie dobowe zużycie wody przez jedną roślinę (K_c) wyrażone w cm^3 . Następnie, na rysunku 8, przedstawiono je jako funkcję wilgotności średniej (θ_{sr}) w przy powierzchniowej warstwie ($i = 1,2,3$). Stwierdzono liniową zależność pomiędzy ilością wody pobieraną przez roślinę w ciągu doby i wilgotnością θ_{sr} .



K_c^{dr} – natężenie poboru wody przez korzenie kukurydzy – intensity of water uptake by corn roots

Rys. 7. Spadek poboru wody przez kukurydzę podczas trwania eksperymentu

Fig. 7. Decrease in water uptake by corn during the experiment



K_c – dobowy pobór wody przez korzenie, daily water uptake by roots, θ – średnia wilgotność w górnej warstwie korzeniowej, average moisture in the upper part of the root zone.

Rys. 8. Dobowy pobór wody przez kukurydzę w zależności od średniej wilgotności w górnej warstwie korzeniowej

Fig. 8. Daily water uptake by corn in respect of moisture in the upper part of root zone

Dobowe zużycie wody przez kukurydzę podawane jest najczęściej jako wysokość słupa wody wyrażoną w milimetrach i wynosi ono wg różnych autorów od $3,2 \text{ mm-doba}^{-1}$ do 6 mm-doba^{-1} [1]. Obliczone zużycie wody, zaproponowaną w pracy metodą, jest mniejsze i wynosi $0,7 \text{ mm-doba}^{-1}$. Różnica jest spowodowana tym, że roślina znajdowała się w końcowej fazie wegetacji (druga połowa września).

WNIOSKI

1. Stwierdzono, że pobór wody przez korzenie kukurydzy występuje w głównej mierze w przypowierzchniowej warstwie na głębokości od 0 do 11 cm i przede wszystkim w osi symetrii rośliny.

2. Stwierdzono, że intensywność poboru wody przez korzenie kukurydzy zaczyna wzrastać około godziny 9, osiąga swoje maksimum około godziny 12 i w godzinach od 18 do 20 spada do zera.

3. Dobowa ilość pobieranej wody jest wprost proporcjonalna do wilgotności w przypowierzchniowej warstwie gleby. Zależność ta zachodzi dla przedziału wilgotności od 4 do 14%. Sformułowanie zależności dla innych przedziałów wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań.

PIŚMIENNICTWO

1. **Dziężyc J.:** Rolnictwo w warunkach nawadniania. PWN, Warszawa, 1988.
2. **Janik G.:** Badania nad zastosowaniem reflektometrii czasowej (TDR) do oceny opadu efektywnego. *Acta Agrophysica*, 4(3), 335-338, 2004.
3. **Janik G.:** Próba zastosowania reflektometrii czasowej (TDR) do oceny spływu powierzchniowego. *Zesz. Nauk. AR Kraków*, z serii: Inżynierii Środowiska 26, 83-91, 2005.
4. **Lipiec J., Kubota T., Iwama H., Hirose J.:** Measurement of plant water use under controlled soil moisture conditions by the negative pressure water circulation technique. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 34 (3), 417-428, 1988.
5. **Malicki M. A.:** Reflectometric (TDR) meter of moisture content in soils and other capillary-porous materials. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 388, 107-114, 1990.
6. **Malicki M. A.:** Metodyczne zagadnienia monitoringu statusu wody w wybranych materiałach biologicznych. *Acta Agrophysica*, 19, 1999.
7. **Nosalewicz A., Lipiec J.:** Wpływ miejscowego zagęszczenia i uwilgotnienia gleby a wzrost i funkcjonowanie korzeni pszenicy. *Acta Agrophysica*, 78, 199-208, 2002.
8. **Sądej W., Mazur Z.:** Ocena wpływu różnych systemów wieloletniego nawożenia na wysokość i jakość plonu kukurydzy. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 494, 391-398, 2003.
9. **Słoboda A.:** Związek pomiędzy niektórymi cechami plony kukurydzy a skłonem terenu uprawy. *Acta Agrophysica*, 2(1), 191-194, 2003.
10. **Zaradny H.:** Matematyczne metody opisu i rozwiązań zagadnień przepływu wody w nienasyconych i nasyconych gruntach i glebach. Instytut Budownictwa Wodnego PAN Gdańsk, 1990.
11. **Żarski J., Dudek S., Grzelak B.:** Rola czynnika wodnego i termicznego w kształtowaniu plonów ziarna kukurydzy. *Acta Agrophysica*, 3(1), 189-195, 2004.

APPLICATION OF TIME-DOMAIN REFLECTOMETRY (TDR)
FOR DETERMINATION OF WATER UPTAKE BY ROOT MASS OF CORN
IN FINAL VEGETATION STAGE*

Grzegorz Janik

Institute of Environmental Development and Protection, University of Agriculture
Pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław
e-mail: janik@miks.ar.wroc.pl

Abstract. The paper demonstrates the application of the TDR method for determination of daily water uptake dynamics by corn roots. Using this method and soil moisture dynamics, one can calculate water balance in the selected spaces in the plant root layers. The balance calculated for time steps $\Delta t = 1\text{h}$ enables one to determine the intensity of the water uptake by the whole bulk of root mass. It was revealed that the water uptake by the plant roots begins around 9 in the morning, culminates towards 12 and falls to 0 between 6 and 8 in the evening. Further, within the discussed moisture range, from 4 to 14% in the upper root layer, daily water uptake is proportional to moisture value and for a single stem is from 20 to 300 ml per day.

Key words: TDR method, moisture in the active soil layer, water uptake by plant roots

*The experiment was conducted with participation of students from Professor Stanisław Bac Students' Science Organization