

PORÓWNANIE EWAPOTRANSPIRACJI WSKAŹNIKOWEJ WEDŁUG PENMANA I PENMANA-MONTEITHA W RÓŻNYCH REGIONACH POLSKI

Wiesława KASPERSKA-WOŁOWICZ, Leszek ŁABĘDZKI

Instytut Melioracji i Użytków Zielonych w Falentach, Wielkopolsko-Pomorski Ośrodek Badawczy w Bydgoszczy

Słowa kluczowe: ewapotranspiracja wskaźnikowa, region agroklimatyczny

Streszczenie

W pracy porównano ewapotranspirację wskaźnikową w latach 1970–1995 obliczoną dwoma metodami dla 17 stacji agrometeorologicznych, położonych w różnych rejonach agroklimatycznych Polski.

Ewapotranspiracja wskaźnikowa obliczana według wzoru Penmana była większa średnio o 21% od obliczanej według wzoru Penmana-Monteitha. W okresie wegetacyjnym różnica ta wynosiła średnio 80–100 mm. Najmniejsze wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej osiągała na obszarze Polski północno-wschodniej, a największe – w Polsce Centralnej i Zachodniej.

Z porównania wynika, że wartość współczynnika roślinnego stosowana do obliczania zapotrzebowania roślin na wodę na podstawie ewapotranspiracji wskaźnikowej powinna być dostosowana do metody obliczania ewapotranspiracji wskaźnikowej.

WSTĘP

PENMAN [1948] jako pierwszy wprowadził metodę obliczania parowania niskiej szaty roślinnej dobrze zaopatrzonej w wodę, stosowaną obecnie do obliczania ewapotranspiracji wskaźnikowej. DOORENBOS i PRUITT [1977] zmodyfikowali tę metodę i ewapotranspirację wskaźnikową zdefiniowali jako ewapotranspirację „rozległej powierzchni zielonej roślinności trawiastej wysokości 8–15 cm, całko-

Adres do korespondencji: dr inż. W. Kasperska-Wołowicz, Wielkopolsko-Pomorski Ośrodek Badawczy IMUZ, ul. Glinki 60, 85-174 Bydgoszcz; tel. +48 (52) 375-01-07, e-mail: imuzbyd@by.onet.pl

wicie zacieniącej grunt, aktywnie rosnącej w warunkach nieograniczonego zapotrzebowania w wodę”. Określili współczynniki roślinne dla różnych roślin w różnym stadium rozwoju. Metoda, zaakceptowana przez FAO i określana jako metoda Penmana-FAO, znajduje praktyczne zastosowanie do obliczania zapotrzebowania na wodę roślin na dużych obszarach.

Obecnie zalecaną i najpowszechniej stosowaną metodą obliczania ewapotranspiracji jest metoda Penmana-Monteitha. Jest ona zalecana przez FAO i ICID [ALLEN i in., 1994b; 1998; FEDDES, LENSELINK, 1994; SMITH, 1992] i od 1990 r. powszechnie stosowana na świecie. W metodzie tej jest uwzględniany opór rośliny i opór aerodynamiczny. Możliwość pomiaru oporu rośliny i oporu powietrza w aktualnych warunkach meteorologicznych pozwoliłaby na jednoetapowe obliczanie ewapotranspiracji. W przypadku braku takiej możliwości do obliczania ewapotranspiracji roślin ET (mm) dostatecznie zaopatrzonych w wodę zaleca się stosowanie metody dwuetapowej z wykorzystaniem współczynnika roślinnego, charakterystycznego dla określonej rośliny:

$$ET = ET_o k_c \quad (1)$$

gdzie:

ET_o – ewapotranspiracja wskaźnikowa, mm;

k_c – współczynnik roślinny.

Wzór Penmana-Monteitha stosuje się wtedy do obliczania ewapotranspiracji wskaźnikowej ET_o zdefiniowanej następująco: „Ewapotranspiracja wskaźnikowa jest to ewapotranspiracja hipotetycznej rośliny, jaką jest trawa o stałej, jednakowej wysokości równej 12 cm, stałej oporności stomatycznej równej $70 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$, stałym albedo wynoszącym 0,23, w pełni zakrywająca glebę, w warunkach aktywnego rozwoju i nieograniczonego dostępu wody” [ALLEN i in., 1994a; 1998; FEDDES, LENSELINK, 1994; ŁABĘDZKI, SZAJDA, SZUNIEWICZ, 1996; ŁABĘDZKI, 1997].

Według ALLENA i in. [1994a,b; 1998] wzór Penmana-Monteitha umożliwia dokładniejszą niż wzór Penmana ocenę zdolności ewaporacyjnej atmosfery. Wyniki tych autorów, jak również krajowe wyniki ŁABĘDZKIEGO [1978], wskazują, że wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej obliczane wzorem Penmana-FAO lub w jego modyfikacji francuskiej stosowanej w Polsce [ROGUSKI, SARNACKA, DRUPKA, 1988; SARNACKA, BRZESKA, ŚWIERCZYŃSKA, 1978; 1983] są zawyżone.

Celem pracy jest porównanie i określenie różnic wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej obliczanej według wzoru Penmana i Penmana-Monteitha w różnych rejonach agroklimatycznych Polski.

MATERIAŁ I METODY

Materiał badawczy stanowiły wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej obliczanej według wzoru Penmana i Penmana-Monteitha.

Wzór Penmana, stosowany w Polsce w modyfikacji francuskiej, ma następującą postać [ROGUSKI, SARNACKA, DRUPKA, 1988; SARNACKA, BRZESKA, ŚWIERCZYŃSKA, 1977, 1983]:

$$ET_o(P) = n \frac{\delta}{\delta + \tau} \frac{R_n}{\lambda} + \frac{\tau}{\delta + \tau} E_a \quad (2)$$

gdzie:

- $ET_o(P)$ – ewapotranspiracja wskaźnikowa według Penmana, $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$;
- δ – nachylenie krzywej ciśnienia nasyconej pary wodnej, $\text{kPa} \cdot \text{K}^{-1}$;
- τ – stała psychrometryczna, $\text{kPa} \cdot \text{K}^{-1}$;
- R_n – promieniowanie netto, $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$;
- λ – ciepło utajone parowania, $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$;
- E_a – czynnik aerodynamiczny ewaporacji, $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$;
- n – liczba sekund w dobie, równa 86 400.

Czynnik aerodynamiczny ewapotranspiracji E_a ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$) jest obliczany według wzoru:

$$E_a = 0,26 (e_s - e) (1 + 0,4v) \quad (3)$$

gdzie:

- e – ciśnienie pary wodnej, hPa;
- e_s – ciśnienie nasyconej pary wodnej, hPa;
- v – prędkość wiatru mierzona na wysokości 10 m, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Wzór Penmana-Monteitha do obliczania ewapotranspiracji ma postać [ALLEN i in., 1994a; 1998; FEDDES, LENSELINK, 1994]:

$$ET(PM) = \frac{1}{\lambda} \frac{\delta(R_n - G) + \frac{n\rho c_p(e_s - e)}{r_a}}{\delta + \tau \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (4)$$

gdzie:

- $ET(PM)$ – ewapotranspiracja według Penmana-Monteitha, $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$;
- G – strumień ciepła przez powierzchnię gleby, $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$;
- ρ – gęstość powietrza, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

- c_p – ciepło właściwe powietrza, $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;
 r_a – aerodynamiczna oporność dyfuzji pary i ciepła, $\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$;
 r_c – stomatyczna oporność przepływu pary, $\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$.

Po wprowadzeniu do tego wzoru wartości parametrów określonych w definicji ewapotranspiracji wskaźnikowej oraz przyjęciu wysokości prowadzenia pomiarów meteorologicznych równej 2 m, wzór ten przekształca się do wzoru Penmana-Monteitha na ewapotranspirację wskaźnikową w postaci [ALLEN i in., 1998]:

$$ET_o(PM) = \frac{0,408\delta R_n + \frac{900\tau v(e_s - e)}{T}}{\delta + \tau(1 + 0,34v)} \quad (5)$$

gdzie:

- $ET_o(PM)$ – ewapotranspiracja wskaźnikowa wg Penmana-Monteitha, $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$;
 T – temperatura powietrza, K.

W tym wzorze pominięto strumień ciepła przez powierzchnię gleby G , gdyż w warunkach zdefiniowanych jako standardowe ma on niewielki udział w bilansie cieplnym runi trawiastej, a w okresie doby i dłuższym jego wartość jest zbliżona do zera lub bardzo mała.

Do obliczeń wykorzystano dane z lat 1970–1995 z 17 stacji meteorologicznych. Wybrane stacje są położone w różnych regionach agroklimatycznych, ujmujących kompleksowo warunki wodne oraz cieplne i przychodu energii słonecznej [BAC, KOŹMINSKI, ROJEK, 1993] (tab. 1).

Warunki wilgotnościowe charakteryzują regiony:

- A – suchy,
 B – umiarkowanie wilgotny,
 C – wilgotny.

Ze względu na warunki cieplne i energetyczne brano pod uwagę regiony:

- 1 – ciepły i słoneczny,
 2 – ciepły i umiarkowanie słoneczny,
 3 – ciepły i pochmurny,
 4 – umiarkowanie ciepły i słoneczny,
 5 – umiarkowanie ciepły i umiarkowanie słoneczny,
 6 – umiarkowanie ciepły i pochmurny,
 8 – chłodny i umiarkowanie słoneczny.

Dane meteorologiczne obejmowały średnie dekadowe wartości w okresie wegetacyjnym (IV–IX): temperatury powietrza T ($^{\circ}\text{C}$), usłonecznienia S (h), ciśnienia pary wodnej w powietrzu e (hPa) i prędkości wiatru v ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Na ich podstawie obliczono ewapotranspirację wskaźnikową w okresie dekady, miesiąca i okresu wegetacyjnego według wzoru Penmana $ET_o(P)$ w modyfikacji francuskiej i Penmana-Monteitha $ET_o(PM)$.

Tabela 1. Stacje meteorologiczne i regiony agroklimatyczne wg Baca [BAC, KOŹMIŃSKI, ROJEK, 1993]**Table 1.** Meteorological stations and agro-climatic regions according to Bac [BAC, KOŹMIŃSKI, ROJEK, 1993]

Numer stacji Number of the station	Nazwa stacji Name of the station	Region agroklimatyczny Agro-climatic region
1	Koszalin	C8
2	Bielnik	B4
3	Biebrza	B8
4	Chojnice	B8
5	Szczecin	A6
6	Bydgoszcz	A2
7	Poznań	A3
8	Warszawa	A2
9	Zielona Góra	A1
10	Łódź	A5
11	Sosnowica	A1
12	Wrocław	B2
13	Opole	B3
14	Częstochowa	B6
15	Zamość	B5
16	Kraków	C5
17	Rzeszów	C8

Zbadano rozkłady prawdopodobieństwa wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej. Ewapotranspiracja wskaźnikowa jest zmienną losową o dolnym ograniczeniu, dodatniej asymetrii i nie podlega rozkładowi normalnemu. Do otrzymanych ciągów wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej w okresie wegetacyjnym dopasowano rozkład prawdopodobieństwa gamma, sprawdzając jego zgodność z danymi obliczonymi za pomocą testu statystycznego χ^2 . Dla tego rozkładu obliczono prawdopodobieństwo osiągnięcia danej wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej wraz z mniejszymi (tzw. prawdopodobieństwo nieprzekroczenia). Przyjęto, że prawdopodobieństwo 20% klasyfikuje okres wegetacyjny jako mokry, 50% – jako średni, a 80% – jako suchy. Wykonano mapy przestrzennego występowania prawdopodobnych wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej obliczonych według wzoru Penmana i Penmana-Monteitha w okresie wegetacyjnym mokrym, średnim i suchym w różnych rejonach Polski.

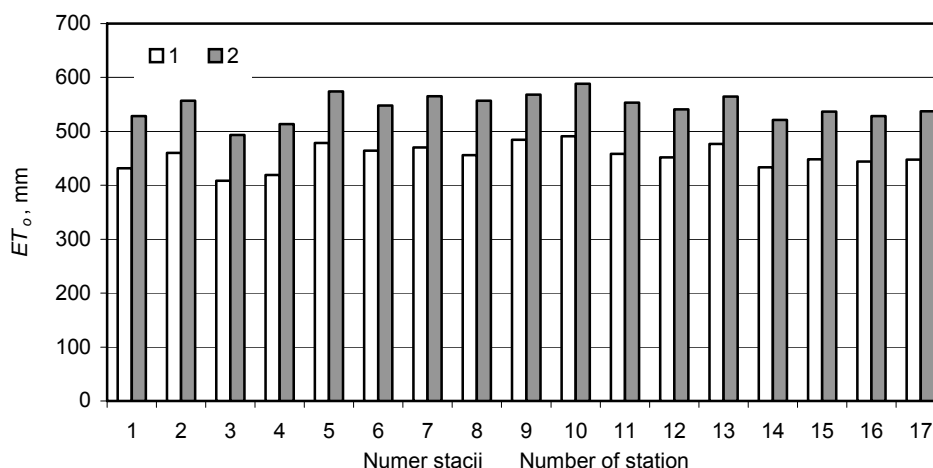
Określono również, w okresie miesięcznym i wegetacyjnym, stosunek wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej obliczonej obiema metodami w różnych rejonach Polski.

Dane z 2002 r. ze stacji prowadzonej przez IMUZ w dolinie Noteci we Frydrychowie wykorzystano do analizy zależności między dobowymi, dekadowymi i miesięcznymi wartościami ewapotranspiracji wskaźnikowej obliczanej według Penmana i Penmana-Monteitha.

WYNIKI BADAŃ

Średnia w okresie wegetacyjnym w latach 1970–1995 ewapotranspiracja wskaźnikowa obliczana według wzoru Penmana osiągała większe wartości od obliczanej według wzoru Penmana-Monteitha o 80–100 mm (rys. 1). Największe wartości ewapotranspiracji obserwowano na stacjach nr 5–10 (Szczecin, Bydgoszcz, Poznań, Warszawa, Zielona Góra, Łódź), położonych w pasie zachodniej i centralnej Polski, w rejonie zlewni Warty do lewego brzegu Wisły. Obszar ten należy do regionu agroklimatycznego suchego i ciepłego lub umiarkowanie ciepłego. Na tym obszarze w badanym wieloleciu, w okresie wegetacyjnym (IV–IX), średnia suma ewapotranspiracji wskaźnikowej według Penmana-Monteitha przekroczyła 460 mm, a według Penmana – 550 mm.

Najmniejsze w okresie wegetacyjnym wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej obserwowano na obszarze Polski północno-wschodniej, w rejonie Biebrzy. Ewapotranspiracja według Penmana-Monteitha wynosiła tam 410 mm, a według Penmana – 490 mm. Region ten pod względem agroklimatycznym można zaliczyć



Rys. 1. Ewapotranspiracja wskaźnikowa ET_o według Penmana-Monteitha (1) i Penmana (2) w różnych rejonach Polski, średnia w okresie wegetacyjnym (IV–IX) w latach 1970–1995

Fig. 1. Reference evapotranspiration ET_o according to Penman-Monteith (1) and Penman (2) in various regions of Poland, mean in the growing season (IV–IX) in the years 1970–1995

do chłodnego, umiarkowanie słonecznego i umiarkowanie wilgotnego. Na południowym obszarze kraju wartości ewapotranspiracji były mniejsze niż w rejonie centralnej Polski.

Na rysunku 2. przedstawiono miesięczne wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej według Penmana-Monteitha i Penmana w wybranych sześciu stacjach meteorologicznych reprezentatywnych dla różnych obszarów agroklimatycznych Polski.

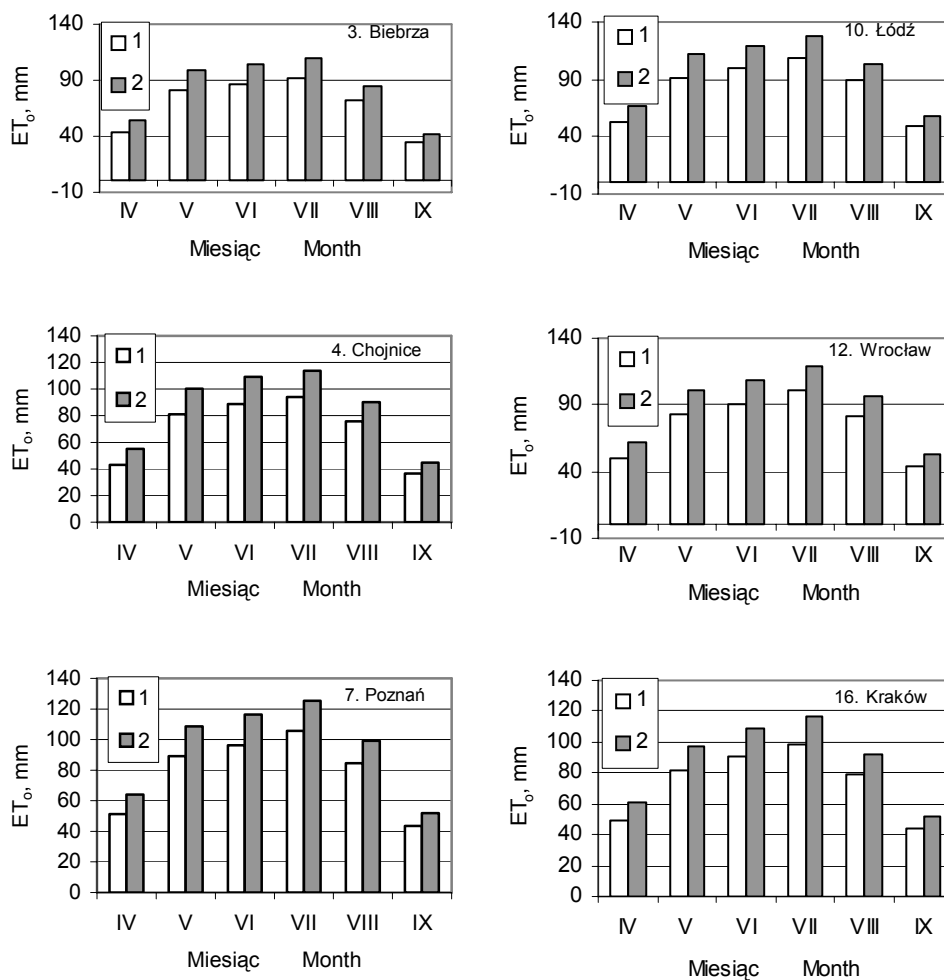
Na wszystkich stacjach największe wartości ewapotranspiracji obserwowano w lipcu i czerwcu, a najmniejsze we wrześniu. Na stacjach reprezentatywnych dla Pojezierza Wielkopolskiego i centralnej Polski ewapotranspiracja była największa, zaś na stacjach w północnej Polsce – najmniejsza. W Poznaniu w lipcu ewapotranspiracja według Penmana-Monteitha była większa niż 100 mm, co oznacza, że jej wartość dobową osiągała średnio 3,3 mm. Ewapotranspiracja według Penmana była większa niż 120 mm, co odpowiadało dobowej wartości parowania około 4 mm.

Na mapach przedstawiono przestrzenny rozkład występowania prawdopodobnych wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej według wzoru Penmana-Monteitha i Penmana, w okresie wegetacyjnym mokrym, średnim i suchym w różnych rejonach Polski (rys. 3). W roku mokrym ($p = 20\%$) ewapotranspiracja wskaźnikowa według Penmana-Monteitha osiągała wartości o 60–75 mm mniejsze niż w roku suchym, co jest równoważne sumie ewapotranspiracji w ciągu jednego letniego miesiąca. Różnice ewapotranspiracji według Penmana między okresem wegetacyjnym mokrym i suchym były odpowiednio większe i osiągały 90–100 mm. W roku średnim różnica między największą wartością ewapotranspiracji według Penmana-Monteitha w okolicach Łodzi a najmniejszą w Biebrzy może wynosić 82 mm, zaś w przypadku ewapotranspiracji według Penmana – 96 mm.

Średnia dobowa w okresie wegetacyjnym (IV–IX) ewapotranspiracja wskaźnikowa według Penmana-Monteitha może wynosić w roku mokrym od 2 mm w rejonie Biebrzy do 2,5 mm w centralnej Polsce (Łódź), w roku średnim – odpowiednio od 2,2 do 2,7 mm, a w roku suchym – od 2,4 do 2,9 mm. Wartości dobowe ewapotranspiracji według Penmana są większe o około 0,5 mm.

Regionem, w którym występują największe wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej jest Pojezierze Wielkopolskie, a szczególnie obszary należące do zlewni środkowego i dolnego biegu Warty (rys. 3). W tym regionie obserwuje się najmniejsze w Polsce opady atmosferyczne oraz niekorzystny dla produkcji roślinnej rozkład opadów.

Na podstawie obliczeń przeprowadzonych dla 17 stacji meteorologicznych w Polsce, w okresach dekadowych, w latach 1970–1095 stwierdzono, że zróżnicowanie między ewapotranspiracją wskaźnikową według Penmana-Monteitha i Penmana było największe w okresie wiosennym. W pierwszej dekadzie kwietnia ewapotranspiracja wskaźnikowa według Penmana była większa od ewapotranspiracji według Penmana-Monteitha średnio o 27%. Najmniejsze różnice, od 17 do 19%, obserwowano w poszczególnych dekadach lipca i sierpnia (tab. 2).



Rys. 2. Miesięczne wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej ET_o według Penmana-Monteitha (1) i Penmana (2) na wybranych sześciu stacjach meteorologicznych w różnych rejonach Polski w latach 1970–1995

Fig. 2. Monthly values of reference evapotranspiration ET_o according to Penman-Monteith (1) and Penman (2) at selected six meteorological stations in various regions of Poland in the years 1970–1995

Obliczono miesięczne i w okresie wegetacyjnym wartości ilorazu ewapotranspiracji wskaźnikowej według Penmana i Penmana-Monteitha dla 17 stacji meteorologicznych (tab. 3). W okresie wegetacyjnym ewapotranspiracja wskaźnikowa według Penmana była większa średnio o 21% od ewapotranspiracji według Penmana-Monteitha. Największe różnice, osiągające średnio 26%, odnotowano wio-

Tabela 2. Stosunek dekadowych wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej według Penmana $ET_o(P)$ i Penmana-Monteitha $ET_o(PM)$ w okresie wegetacyjnym (IV–IX), wartości średnie z 17 stacji meteorologicznych w latach 1970–1995

Table 2. The ratio of ten-day period values of reference evapotranspiration according to Penman $ET_o(P)$ and Penman-Monteith $ET_o(PM)$ in the growing season (IV–IX), mean values from 17 meteorological stations in the years 1970–1995

Miesiąc	Month	Dekada	Ten day period	$ET_o(P) / ET_o(PM)$
Kwiecień	April		1	1,27
			2	1,26
			3	1,26
Maj	May		1	1,24
			2	1,22
			3	1,22
Czerwiec	June		1	1,21
			2	1,22
			3	1,20
Lipiec	July		1	1,19
			2	1,19
			3	1,19
Sierpień	August		1	1,17
			2	1,18
			3	1,19
Wrzesień	September		1	1,20
			2	1,21
			3	1,20

sną, w kwietniu. W kolejnych miesiącach różnice te zmniejszały się, osiągając najmniejszą wartość w sierpniu (średnio 18%). Największe różnice między ewapotranspiracją obliczaną dwoma metodami obserwowano na obszarze północnej Polski (w Koszalinie, Biebrzy i Chojnicach), charakteryzującym się wilgotnymi i chłodnymi warunkami agroklimatycznymi. Najmniejsze różnice obserwowano w Zielonej Górze, o agroklimacie ciepłym, suchym i słonecznym.

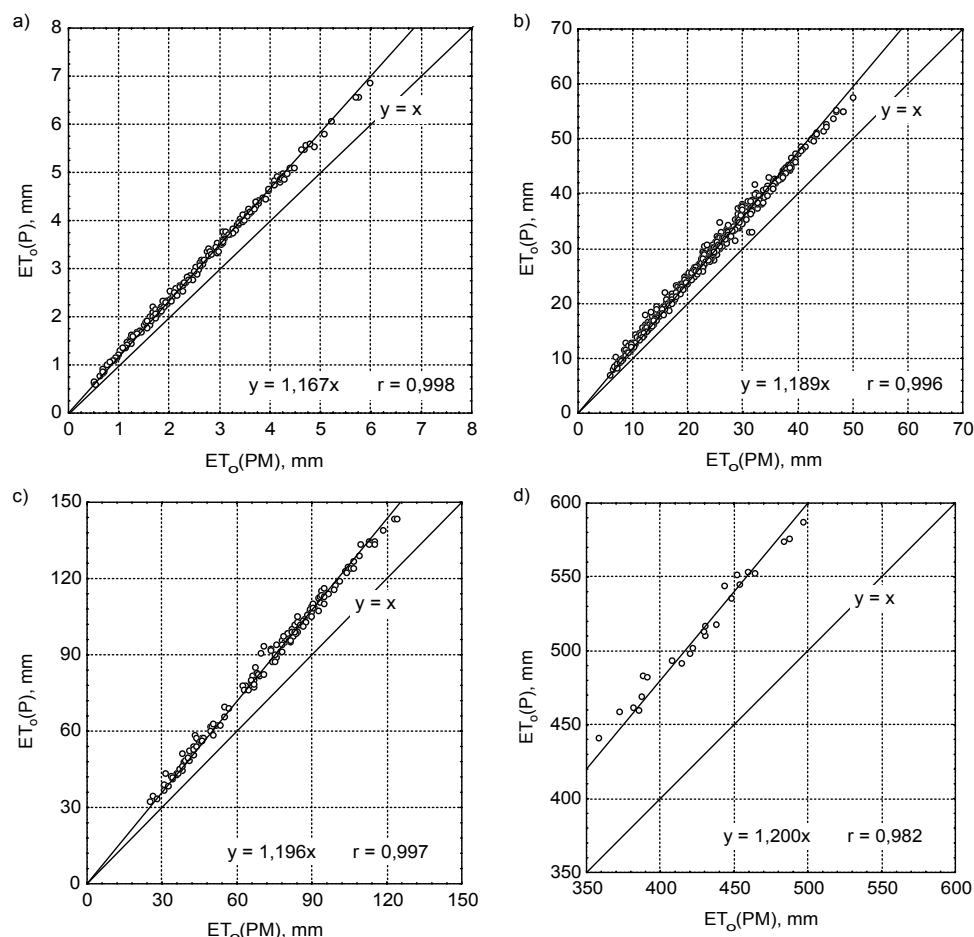
Na przykładzie stacji meteorologicznej we Frydrychowcu w dolinie górnej Noteci wykonano analizę związku między ewapotranspiracją wskaźnikową według Penmana-Monteitha $ET_o(PM)$ i Penmana $ET_o(P)$ dla: doby, dekady, miesiąca i okresu wegetacyjnego w 2002 r. Zgodność zmienności wartości ewapotranspiracji obliczanej obiema metodami była istotna. Wartości współczynnika korelacji r były bliskie jedności. Współczynnik kierunkowy b równań regresji bez wyrazu wolnego $ET_o(P) = b ET_o(PM)$ osiągał wartość 1,2 (rys. 4). Oznacza to, że wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej obliczanej według wzoru Penmana $ET_o(P)$ były większe od obliczanej wzorem Penmana-Monteitha $ET_o(PM)$.

Tabela 3. Stosunek ewapotranspiracji wskaźnikowej według Penmana $ET_o(P)$ i Penmana-Monteitha $ET_o(PM)$ w miesiącu i okresie wegetacyjnym (IV–IX) w różnych rejonach agroklimatycznych Polski, wartości średnie z wielolecia 1970–1995

Table 3. The ratio of reference evapotranspiration according to Penman $ET_o(P)$ and Penman-Monteith $ET_o(PM)$ in month and growing season (IV–IX) in different agro-climate regions of Poland, mean values in the years 1970–1995

Nazwa stacji Name of the station	Region agroklimatyczny Agro-climatic region	$ET_o(P)/ET_o(PM)$						
		IV	V	VI	VII	VIII	IX	IV–IX
Koszalin	C8	1,29	1,26	1,24	1,22	1,19	1,20	1,23
Bielnik	B4	1,27	1,24	1,22	1,20	1,19	1,19	1,22
Biebrza	B8	1,28	1,24	1,21	1,19	1,19	1,24	1,22
Chojnice	B8	1,30	1,25	1,24	1,22	1,20	1,23	1,24
Szczecin	A6	1,26	1,23	1,21	1,19	1,17	1,18	1,21
Bydgoszcz	A2	1,23	1,19	1,18	1,17	1,18	1,21	1,19
Poznań	A3	1,27	1,23	1,22	1,20	1,18	1,20	1,21
Warszawa	A2	1,29	1,25	1,24	1,21	1,20	1,23	1,23
Zielona Góra	A1	1,24	1,20	1,19	1,17	1,15	1,16	1,18
Łódź	A5	1,27	1,23	1,21	1,19	1,17	1,19	1,21
Sosnowica	A1	1,28	1,22	1,22	1,19	1,19	1,22	1,22
Wrocław	B2	1,26	1,23	1,21	1,19	1,17	1,19	1,21
Opole	B3	1,23	1,21	1,19	1,17	1,16	1,18	1,19
Częstochowa	B6	1,27	1,23	1,21	1,19	1,18	1,21	1,22
Zamość	B5	1,25	1,22	1,20	1,18	1,18	1,20	1,21
Kraków	C5	1,24	1,21	1,19	1,18	1,17	1,19	1,20
Rzeszów	C8	1,26	1,23	1,21	1,18	1,18	1,20	1,21
Frydrychowo	A2	1,25	1,22	1,19	1,18	1,18	1,20	1,21
Średnia Mean		1,26	1,23	1,21	1,19	1,18	1,20	1,21

ALLEN i in. [1994b; 1998] wskazują na fakt zawyżania ewapotranspiracji wskaźnikowej obliczanej według wzoru Penmana-FAO w porównaniu z obliczoną według wzoru Penmana-Monteitha i wartościami pomierzonymi. Wartości ewapotranspiracji obliczone metodą Penmana-Monteitha osiągnęły większy współczynnik korelacji oraz mniejszy błąd standardowy w porównaniu z metodą Penmana. Autorzy ci stwierdzili, że wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej obliczone według równania Penmana w modyfikacji FAO były większe od pomierzonych średnio o 15–20%, a według równania Penmana-Monteitha – zbliżone. Metoda Penmana-Monteitha, zawierająca standardowe parametry szorstkości i oporu powierzchni może zdaniem tych autorów eliminować problem przeestymowania obliczeń według wzoru Penmana. Również badania przeprowadzone w Polsce [ŁABĘDZKI, 1999] wykazały dobrą zgodność ewapotranspiracji wskaźnikowej obliczonej wzorem Penmana-Monteitha z wartościami pomierzonymi. Jednocześnie wskazuje to na zawyżanie wartości ET_o obliczanej wzorem Penmana.



Rys. 4. Związek między ewapotranspiracją wskaźnikową według Penmana $ET_o(P)$ i Penmana-Monteitha $ET_o(PM)$ we Frydrychowie w dolinie górnej Noteci w: a) okresie doby w 2002 r. oraz w latach 1972–1995 w okresie: b) dekady, c) miesiąca i d) okresu wegetacyjnego (IV–IX)

Fig. 4. Relationship between reference evapotranspiration according to Penman $ET_o(P)$ and Penman-Monteith $ET_o(PM)$ at Frydrychowo in the upper Notec river valley in: a) a day period in 2002 and the period of: b) ten days, c) month, d) growing season (IV–IX) in the years 1972–1995

PODSUMOWANIE

W pracy porównano ewapotranspirację wskaźnikową obliczoną według wzoru Penmana-Monteitha i Penmana w latach 1970–1995 dla 17 stacji agrometeorologicznych, położonych w różnych rejonach agroklimatycznych Polski. Stwierdzono, że wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej według Penmana są większe od ewapotranspiracji według Penmana-Monteitha o 21%. W okresie wegetacyjnym naj-

większe różnice, sięgające średnio 26%, obserwowano wiosną (w kwietniu). W kolejnych miesiącach różnice te zmniejszały się, osiągając najmniejsze wartości w lipcu i sierpniu (średnio 18–19%). Średnia w okresie wegetacyjnym ewapotranspiracja wskaźnikowa obliczana według wzoru Penmana-Monteitha była mniejsza od obliczanej według wzoru Penmana o 80–100 mm. Najmniejsze w okresie wegetacyjnym wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej wystąpiły na obszarze północno-wschodniej Polski w rejonie Biebrzy, chłodnym i umiarkowanie wilgotnym. Największe wartości ewapotranspiracji wystąpiły na obszarze zachodniej i centralnej Polski, w regionie ciepłym oraz umiarkowanie ciepłym i suchym.

Wartości ilorazu ewapotranspiracji wskaźnikowej według Penmana i Penmana-Monteitha były większe w okresie wiosennym niż letnim. Okres wiosenny jest chłodniejszy, bardziej wilgotny i charakteryzuje się mniejszym niedosytem wilgotności powietrza niż okres letni. Większe wartości tego ilorazu obserwowano także na stacjach meteorologicznych reprezentujących agroklimat chłodny i wilgotny.

Różnice wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej obliczonej obiema metodami wynikają z założeń zastosowanych przy opracowaniu wzorów i z definicji wskaźnikowej pokrywy roślinnej. Ideą wzoru Penmana było opisanie parowania trawiastej pokrywy roślinnej, tak zaopatrzonej w wodę, że jest ona podobna do swobodnej powierzchni wody. Część wzoru opisująca czynnik aerodynamiczny jest wzorem empirycznym (równanie 2). We wzorze Penmana-Monteitha na ewapotranspirację wskaźnikową uwzględnia się opór pokrywy roślinnej r_c i opór aerodynamiczny r_a , których wartości wynikają z przyjętej definicji wskaźnikowej pokrywy roślinnej.

Obliczając zapotrzebowanie na wodę roślin uprawnych i użytków zielonych na podstawie metody współczynników roślinnych należy określić i stosować wartości współczynników dostosowane do metody obliczania ewapotranspiracji wskaźnikowej.

LITERATURA

- ALLEN R.G., PEREIRA L.S., RAES D., SMITH M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Irrig. Drain. Paper no. 56. Rome: FAO ss. 300.
- ALLEN R.G., SMITH M., PEREIRA L.S., PERRIER A., 1994a. An update for the calculation of reference evapotranspiration. ICID Bulletin vol. 43 nr 2 s. 35–92.
- ALLEN R.G., SMITH M., PERRIER A., PEREIRA L.S., 1994b. An update for the definition of reference evapotranspiration. ICID Bulletin vol. 43 nr 2 s. 1–34.
- BAC S., KOŹMIŃSKI C., ROJEK M., 1993. Agrometeorologia. Warszawa: PWN ss. 250.
- DOORENBOS J., PRUITT W.O., 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. Irrig. Drain. Paper no. 24 Rome: FAO ss. 156.
- FEDDES R.A., LENSELINK K.J., 1994. Evapotranspiration. ILRI Publication 16. Drainage Principles and Applications. Wageningen s. 145–173.
- ŁABĘDZKI L., 1997. Potrzeby nawadniania użytków zielonych – uwarunkowania przyrodnicze i prognozowanie. Rozpr. Habil. Falenty: Wydaw. IMUZ ss. 121.

- ŁABĘDZKI L., 1999. Przydatność wzoru Penmana-Monteitha do obliczania ewapotranspiracji wskaźnikowej i rzeczywistej użytków zielonych. Wiad. IMUZ t. 20 z. 2 s. 89–101.
- ŁABĘDZKI L., SZAJDA J., SZUNIEWICZ J., 1996. Ewapotranspiracja upraw rolniczych – terminologia, definicje, metody obliczania. Przegląd stanu wiedzy. Mater. Inf. nr 33 Falenty: IMUZ ss. 15.
- PENMAN H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Royal Soc. vol. 193 s. 120–146.
- SMITH M., 1992. Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements. Land and Water Development Division. Rome: FAO ss. 54.
- ROGUSKI W., SARNACKA S., DRUPKA S., 1988. Instrukcja wyznaczania potrzeb i niedoborów wodnych roślin uprawnych i użytków zielonych. Mater. Instr. 66 Falenty: IMUZ ss. 90.
- SARNACKA S., BRZESKA J., ŚWIERCZYŃSKA H., 1978. Opracowanie metody określania potrzeb wodnych produkcji roślinnej w oparciu o wyniki dotychczasowych badań krajowych i obcych. Cz. 2. Warszawa: IMGW ss. 48 + 210 tab..
- SARNACKA S., BRZESKA J., ŚWIERCZYŃSKA H., 1983. Wybrane metody wyznaczania ewapotranspiracji potencjalnej. Materiały Badawcze. Warszawa: IMGW ss. 35.

Wiesława KASPERSKA-WOŁOWICZ, Leszek ŁABĘDZKI

**A COMPARISON OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION
ACCORDING TO PENMAN AND PENMAN-MONTEITH
IN VARIOUS REGIONS OF POLAND**

Key words: agro-climatic region, reference evapotranspiration

S u m m a r y

The analysis of reference evapotranspiration estimated by two methods in the years 1970–1995 for 17 meteorological stations located in different regions of Poland has been presented in the paper. Reference evapotranspiration calculated according to Penman formula was by 21 % lower than that calculated according to Penman-Monteith formula. In the growing season the difference was 80–100 mm on the average. The lowest values of reference evapotranspiration were found in the north-eastern region of Poland and the highest – in central and western Poland.

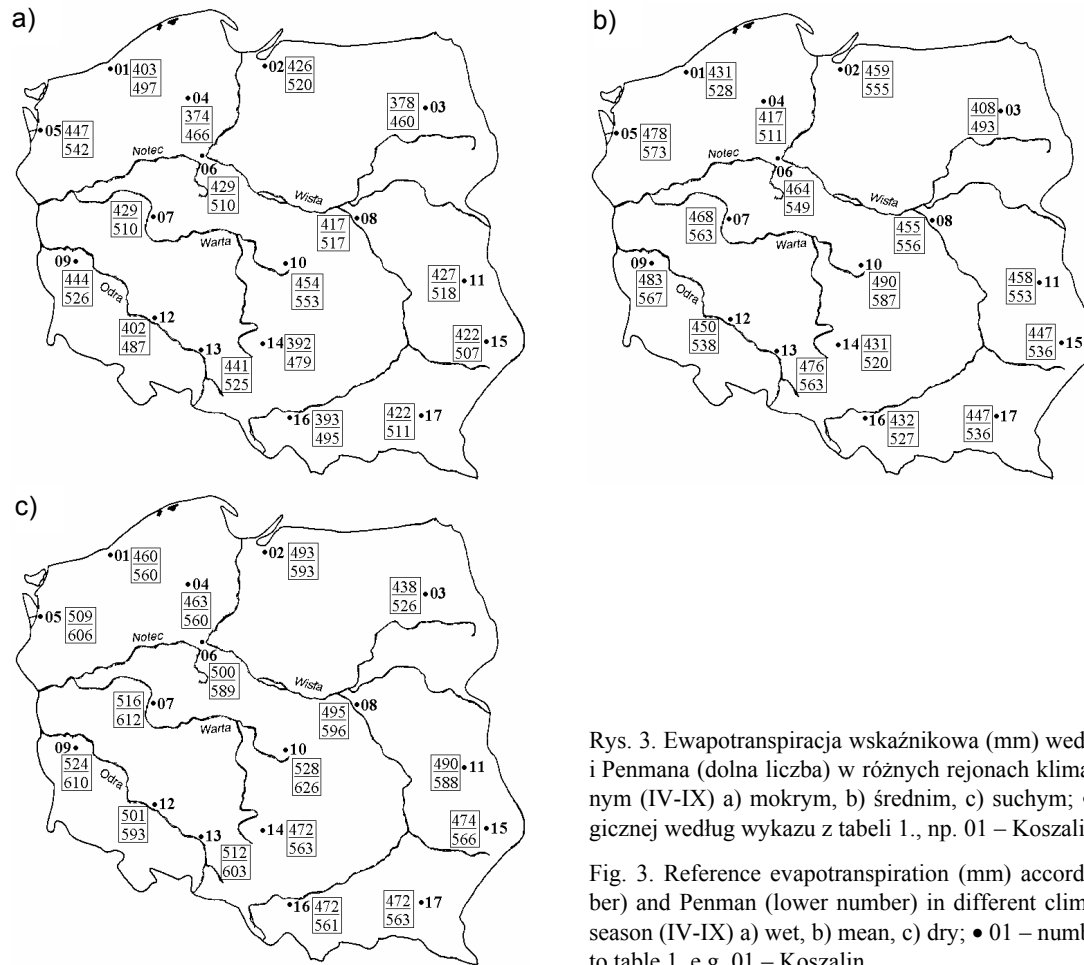
The analysis has shown that for estimating water needs of plants according to reference evapotranspiration and crop coefficient, the value of this coefficient have to be adjusted to the method of calculating reference evapotranspiration.

Recenzenci:

prof. dr hab. Stanisław Drupka

doc. dr hab. Jan Szajda

Praca wpłynęła do Redakcji 12.02.2004 r.



Rys. 3. Ewapotranspiracja wskaźnikowa (mm) według Penmana-Monteitha (górną liczbą) i Penmana (dolną liczbą) w różnych rejonach klimatycznych Polski w okresie wegetacyjnym (IV-IX) a) mokrym, b) średnim, c) suchym; • 01, ..., 17 – numer stacji meteorologicznej według wykazu z tabeli 1., np. 01 – Koszalin

Fig. 3. Reference evapotranspiration (mm) according to Penman-Monteith (upper number) and Penman (lower number) in different climatic regions of Poland in the growing season (IV-IX) a) wet, b) mean, c) dry; • 01 – number of meteorological station according to table 1, e.g. 01 – Koszalin

