

---

**WSTĘPNA OCENA MOŻLIWOŚCI SZACOWANIA POTRZEB  
WODNYCH ROŚLIN NA PODSTAWIE PROSTYCH POMIARÓW  
METEOROLOGICZNYCH**

**Preliminary assessment of the possibility of estimating water  
requirements of plants on the basis of simple meteorological  
measurements**

Waldemar Treder<sup>1</sup>, Katarzyna Wójcik<sup>1</sup>, Jacek Żarski<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instytut Sadownictwa i Kwiaciarstwa im. Szczepana Pieniążka  
ul. Pomologiczna 18, 96-100 Skierniewice

<sup>2</sup>Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich  
ul. A. Kordeckiego 20, 85-225 Bydgoszcz  
e-mail: Waldemar.Treder@insad.pl

ABSTRACT

On the basis of the measurements recorded by seven automatic meteorological stations, evapotranspiration ( $ET_0$ ) was calculated according to the formula devised by Hargreaves and Hargreaves, modified by Droogers and Allen (H and HDA) and Grabarczyk (G). The obtained results were compared with the reference formula recommended by FAO, which adopted the Penman-Monteith formula (PM). A high correlation between the reference model and the simplified formulas was shown. The differences relate to the level of evapotranspiration ( $ET_0$ ) worked out with the various formulas. The Hargreaves model gives a higher value in comparison with the PM formula, whereas Grabarczyk's model (G) makes it lower. The application of the Hargreaves model modified by Doogers and Allen produced results closest to the reference model.

In order to apply the Penman-Monteith model in practice, a lot of meteorological parameters are required, which is a serious limitation. The simpler methods might be used, but they require further investigations in our climatic conditions in order to verify their empirical factors.

**Key words:** irrigation scheduling, evapotranspiration, meteorological data

## WSTĘP

Zwiększenie efektywności wykorzystania wody do nawadniania wymaga wprowadzenia do praktyki precyzyjnych metod wyznaczania potrzeb wodnych roślin. Termin nawadniania roślin może być wyznaczany na podstawie kryteriów roślinnych (Jones i in. 1996; Michelakis 1996), glebowych (Mualem 1990; Treder i Klamkowski 2008) lub klimatycznych (Doorenbos i Pruitt 1977; Sentelhas i in. 2010). Kryterium klimatyczne jest oparte na założeniach, że zużycie wody przez rośliny jest determinowane głównie przebiegiem pogody i fazą rozwojową roślin (Ley i in. 1994). Opracowanie teoretyczne dotyczące wpływu warunków klimatycznych na parowanie przedstawił już w 1948 roku Thornthwaite. Doorenbos i Pruitt (1977) podają definicję ewapotranspiracji potencjalnej (ETP) jako parowania z dużego, zielonego, całkowicie zacieniającego powierzchnię gleby łanu trawy (wys. 8-15 cm), nie napotykającej na trudności w pobieraniu wody. Tak przedstawiona definicja pozwala nie tylko obliczać ETP na podstawie parametrów fizycznych, ale umożliwia także mierzyć ją w lizymetrach (Castel 1996) lub za pomocą ewaporometrów (Treder i Konopacki 2004). Obecnie coraz bardziej jest popularne posługiwanie się pojęciem ewapotranspiracji referencyjnej ( $ET_0$ ). Ewapotranspiracja referencyjna określa zdolność atmosfery do wywołania parowania wody z powierzchni pokrytej roślinami niezależnie od ich rodzaju i poziomu uwilgotnienia gleby. Czynniki wpływające na wysokość  $ET_0$  to warunki meteorologiczne: radiacja słoneczna, temperatura powietrza, niedosyt wilgotności powietrza i prędkość wiatru (Sentelhas i in. 2010). Obecnie na całym świecie jako główne kryterium prognozowania nawodnień są przyjmowane dane meteorologiczne, na podstawie których jest obliczana ewapotranspiracja (Doorenbos i Pruitt 1977; Allen i in. 1996; Xing i in. 2008). Potrzeby wodne określonych gatunków roślin (ewapotranspiracja wskaźnikowa –  $ET_w$ ) ogrodniczych i rolniczych określane są za pomocą przemnożenia wartości ewapotranspiracji potencjalnej lub referencyjnej przez specyficzny dla określonego gatunku roślin i jego fazy rozwojowej współczynnik  $k$  (Grabarczyk i Żarski 1992; Allen 1993) według formuły:

$$ET_w = k ET_0$$

Dotychczas opracowano wiele modeli służących do wyznaczania ewapotranspiracji (Doorenbos i Puit 1977; Hargreaves i Samani 1985; Grabarczyk i in. 1990; Grabarczyk i Żarski 1992; Allen 1993; Gocic i Trajkowic 2010; Sentelhas i in. 2010). Organizacja Narodów Zjednoczonych do spraw Wyżywienia i Rolnictwa (FAO) zarekomendowała do wyznaczania ewapotranspiracji referencyjnej model Penmana-Monteitha (Allen 1986). Model ten wymaga jednak pełnych danych meteorologicznych, co utrudnia jego powszechne zastosowanie. Rozwój elektroniki pozwolił na wprowadzenie do praktyki stacji meteorologicznych, które automatycznie wyznaczają wartość  $ET_0$ . Niestety ze względu na stosunkowo wysoką cenę urządzenia te nie są jeszcze powszechnie stosowane. Dlatego ważne jest, aby w naszych warunkach klimatycznych zweryfikować modele pozwalające na szacowanie ewapotranspiracji przy ograniczonym dostępie do danych meteorologicznych. Przydatne do powszechnego stosowania mogą być modele Grabarczyka i Hargreavesa. Model opracowany przez Grabarczyka uzależnia wysokość ewapotranspiracji od niedosytu wilgotności powietrza i temperatury, dlatego do jego wyznaczenia wystarczą tylko pomiary temperatury i wilgotności powietrza (Grabarczyk i Żarski 1986). Model opracowany przez Hargreavesa (Hargreaves i Samani 1985) to znaczne uproszczenie modelu Penmana. Do jego wyznaczenia są potrzebne tylko pomiary maksymalnej i minimalnej temperatury powietrza oraz dane dotyczące promieniowania słonecznego docierającego do atmosfery ziemi ( $R_a$ ).  $R_a$  jest stałe dla określonego czasu i miejsca na ziemi, dlatego wartości tych nie mierzymy – dane odczytujemy z tabel. Do wyznaczenia  $ET_0$  dnia niezbędne są tylko pomiary dziennej maksymalnej i minimalnej temperatury powietrza ( $T_{max}$  i  $T_{min}$ ). Na podstawie pomiarów  $T_{max}$  i  $T_{min}$  jest wyznaczana średnia temperatura powietrza. Wysokość dziennej radiacji docierającej do ziemi jest szacowana na podstawie wartości  $R_a$  oraz różnicy pomiędzy maksymalną i minimalną dzienną temperaturą powietrza.

Celem badań była ocena możliwości szacowania  $ET_0$  na podstawie prostych modeli matematycznych, uwzględniających tylko podstawowe pomiary meteorologiczne w odniesieniu do wzorcowego, według FAO, modelu Penmana-Monteitha.

## MATERIAŁ I METODY

Pomiary meteorologiczne prowadzono za pomocą siedmiu automatycznych stacji meteorologicznych iMetos (Pessl Austria) w okresie maj-wrzesień 2009 r. i maj-lipiec 2010 r. (tab. 1).

T a b e l a 1

Lokalizacja stacji meteorologicznych – Location of the meteorological stations

Miejsce Location	Długość. geogr. Longitude	Szerokość geogr. Latitude	Wysokość npm. Height above sea level [m]
Biała Rawska	20 °26'	51 °48'	165
Biała Rządowa	18 °27'	51 °15'	185
Białousy	23 °13'	50 °48'	170
Dalboszek	20 °43'	51 °44'	160
Kondrajec Pański	20 °13'	52 °48'	115
Skierniewice	20 °16'	51 °95'	120
Zawichost	21 °51'	50 °48'	150

Do wyznaczenia ewapotranspiracji referencyjnej zastosowano następujące modele obliczeniowe

1. FAO 56 Penmana-Monteira –  $ET_0$  (PM) – wymaga pełnych danych meteo

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

$R_n$  – promieniowanie (radiacja) [ $MJ m^{-2} dzień^{-1}$ ],

$G$  – gęstość strumienia ciepła glebowego [ $MJ m^{-2} dzień^{-1}$ ],

$T$  – średnia dzienna temperatura zmierzona na wysokości 2 m [ $^{\circ}C$ ],

$u_2$  – prędkość wiatru na wysokości 2m [ $m s^{-1}$ ],

$e_s$  – ciśnienie nasyconej pary wodnej [kPa],

$e_a$  – aktualne ciśnienie pary wodnej [kPa],

$e_s - e_a$  deficyt prężności pary wodnej [kPa],

$D$  – nachylenie krzywej ciśnienia nasyconej pary wodnej [ $kPa ^{\circ}C^{-1}$ ],

$g$  – stała psychrometryczna [ $kPa ^{\circ}C^{-1}$ ].

Wartość  $ET_0$  dla poszczególnych dni automatycznie wyznaczały stacje meteorologiczne.

## 2. Model Grabarczyka – $ET_0$ (G)

$$ET_0 = 0,32(d + 1/3T)$$

d – średni dobowy niedosyt wilgotności powietrza (hPa),

T – średnia dobowa temperatura powietrza (°C).

## 3. Model Hargreavesa (H)

$$ET_0 = HC Ra (T_{max} - T_{min})^{HE} \left( \frac{T_{max} + T_{min}}{2} + HT \right)$$

HC – współczynnik empiryczny autora = 0,0023,

Ra – radiacja ponad atmosferą (mm dzień<sup>-1</sup>),

T<sub>max</sub> – temperatura maksymalna powietrza (°C),

T<sub>min</sub> – temperatura minimalna powietrza (°C),

HE – współczynnik empiryczny autora = 0,5,

HT – współczynnik empiryczny autora = 17,8.

## 4. Model Hargreavesa w modyfikacji Droogersa i Allena – $ET_0$ (HDA) (modyfikacja polega na wprowadzeniu nowych wartości współczynników empirycznych)

HC – współczynnik empiryczny autorów = 0,0025,

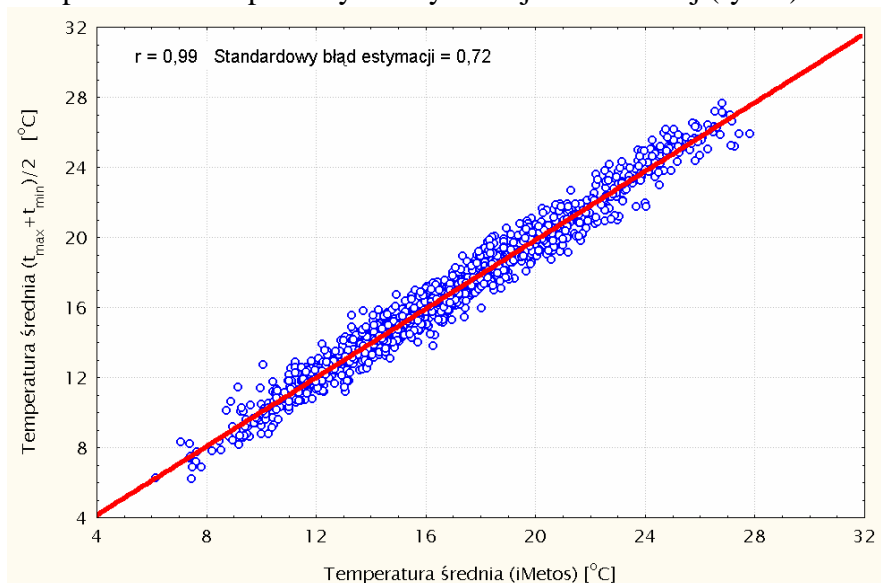
HE – współczynnik empiryczny autorów = 0,5,

HT – współczynnik empiryczny autorów = 16,8.

## WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

Automatyczne stacje meteorologiczne wykonują pomiary z ustaloną wcześniej częstotliwością, jest to zazwyczaj co 10 do 60 minut. Na podstawie pojedynczych pomiarów dla każdego z okresów wyznaczone są parametry minimum, maksimum i średnia. Stacje automatyczne wyznaczają więc średnią temperaturę dobową z wielu pomiarów od 144, gdy pomiary prowadzimy co 10 minut, do 24, gdy prowadzimy je co 1 godzinę.

W przypadku braku stacji automatycznej praktycznie nie jest możliwe prowadzenie obserwacji z tak dużą częstotliwością. W modelu wyznaczania  $ET_0$  opracowanym przez Hargreavesa średnia temperatura dobowa jest wyznaczana na podstawie średniej tylko z 2 pomiarów – maksymalnej i minimalnej. Nasuwa się pytanie, czy wyznaczona w ten sposób średnia jest wiarygodna. Analiza statystyczna danych pomiarowych wykazała bardzo wysoką korelację pomiędzy średnimi temperaturami dobowymi wyznaczonymi przez stację meteorologiczną na podstawie pomiarów prowadzonych co 1 godzinę a średnimi temperaturami wyznaczonymi jako średnia z pomiarów temperatury maksymalnej i minimalnej (rys. 1).



Rysunek 1. Zależność pomiędzy średnimi temperaturami dobowymi wyznaczonymi przez stację automatyczną a średnimi temperaturami dobowymi wyznaczonymi jako średnia z pomiarów temperatury maksymalnej i minimalnej – Relationship between average daily temperatures recorded automatically by meteorological stations and average daily temperatures computed as a mean of T. max and T. min

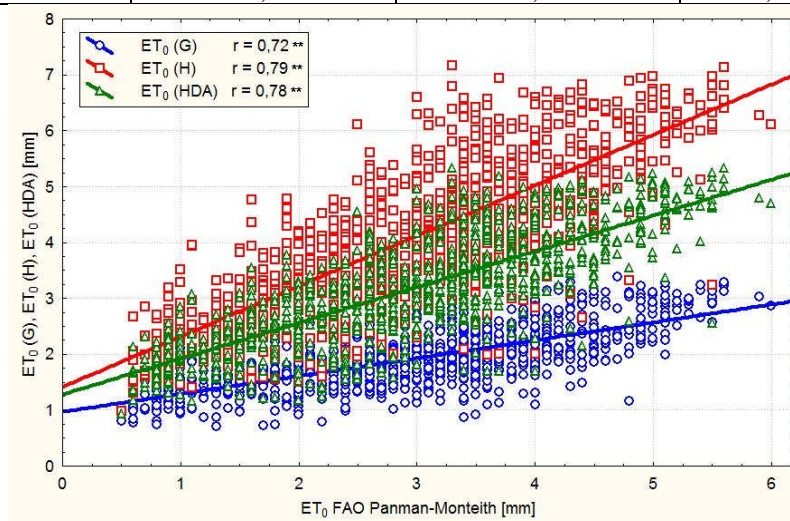
Porównanie średnich temperatur miesięcznych (dla prowadzonego okresu badań) wyznaczonych na podstawie średnich dobowych wykazało także dużą zgodność wyników obydwu metod wyznaczania średniej temperatury (tab. 2).

Analiza potwierdziła wysoką przydatność wyznaczania średniej temperatury dobowej na podstawie wyznaczenia średniej z wartości maksymalnej i minimalnej temperatury powietrza. Do wyznaczania średniej temperatury dobowej wystarczy tylko termometr maksymalno-minimalny, a pomiar może być prowadzony tylko raz na dzień.

Tabela 2

Średnie miesięczne temperatury powietrza – Average monthly air temperatures

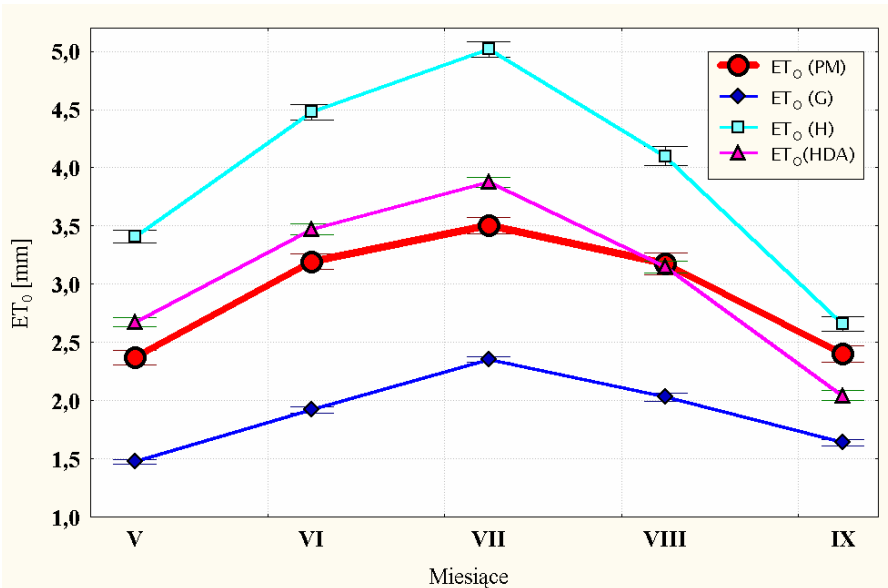
Miesiąc Month	T średnia T average iMetos [°C]	(T max+T min)/2 [°C]	Różnica Difference [°C]
V	13,03	13,21	-0,18
VI	16,68	16,62	0,06
VII	20,35	20,49	-0,14
VIII	17,81	17,85	-0,04
IX	14,39	14,74	-0,35



\*\* istotność na poziomie 0,01

Rysunek 2. Korelacja pomiędzy ewapotranspiracją referencyjną wyznaczoną wg wzoru FAO Penmana-Monteitha a modelami uproszczonymi Grabarczyka  $ET_0$  (G), Hargreavesa  $ET_0$  (H) i Hargreavesa w modyfikacji Droogersa i Allena  $ET_0$  (HAD) – Correlation between ( $ET_0$ ) worked out according to FAO's Penman-Monteith formula and the simplified models of Grabarczyk  $ET_0$  (G), Hargreaves  $ET_0$  (H) and Hargreaves modified by Droogers and Allen  $ET_0$  (HDA)

Analiza korelacji wykazała wysoki poziom zależności między wartościami  $ET_0$  wyznaczonymi metodą wzorcową i obliczonymi na podstawie modeli uproszczonych (rys. 2). Wartości  $ET_0$  uzyskane na podstawie różnych modeli znacznie różniły się pomiędzy sobą. Poziomy  $ET_0$  wyznaczone według wzoru Grabarczyka były niższe, a według wzoru Hargreavesa wyższe od wyznaczonych modelem wzorcowym (rys. 2 i 3).



Rysunek 3. Średnie dla poszczególnych miesięcy wartości  $ET_0$  wyznaczone za pomocą różnych modeli matematycznych, FAO Penmana-Monteitha  $ET_0$  (PM), Grabarczyka  $ET_0$  (G), Hargreavesa  $ET_0$  (H) i Hargreavesa w modyfikacji Droogersa i Allena  $ET_0$  (HDA) – Average monthly values of  $ET_0$  determined with various models: FAO's Penman-Monteith formula and the simplified models of Grabarczyk  $ET_0$  (G), Hargreaves  $ET_0$  (H) and Hargreaves modified by Droogers and Allen  $ET_0$  (HDA)

Bardzo podobne do wzorcowych wartości  $ET_0$  uzyskano, stosując model Hargreavesa w modyfikacji Droogersa i Allena. Widmoser (2009) podaje, że w niektórych warunkach pogodowych  $ET_0$  wyznaczone metodą zalecaną przez FAO może osiągać błąd nawet do 30%. Grabarczyk i Żarski (1992) prowadząc badania w warunkach Polski, wykazali także wyższe wartości ewapotranspiracji potencjalnej wyznaczonej metodą Penmana w porównaniu



z metodą Grabarczyka. Autorzy wykazali także wysokie współczynniki korelacji pomiędzy ewapotranspiracją rzeczywistą traw (ETr) a ewapotranspiracją potencjalną wyznaczoną metodą Grabarczyka. Korelacja pomiędzy ETr a ewapotranspiracją potencjalną wyznaczoną według metody Penmana była niska. We wnioskach autorzy wręcz zalecają większą ostrożność w poleceniu wzoru Penmana do określania potrzeb wodnych roślin. W niniejszej pracy nie możemy jednak określić, który z modeli w naszych warunkach lepiej opisuje ewapotranspirację.

Podsumowując można stwierdzić, że modele Grabarczyka i Hargreavesa są stosunkowo proste i przy zastosowaniu arkusza kalkulacyjnego nie powinny sprawiać trudności obliczeniowych. Mogą być one użyte w indywidualnych gospodarstwach lub nawet w lokalnych serwisach internetowych. W przypadku modelu Hargreavesa i jego modyfikacji do wyznaczenia potrzeb wodnych roślin wystarczą tylko codzienne pomiary maksymalnej i minimalnej temperatury powietrza. Dla uzyskania danych meteorologicznych niezbędnych do zastosowania wzoru Grabarczyka można posłużyć się odczytem temperatury i wilgotności powietrza z termohigrografu, a niedosyt prężności pary wodnej obliczyć za pomocą arkusza kalkulacyjnego. W przypadku tego wzoru problemem mogą być otrzymywane z różnych przyrządów inne wartości niedosytu wilgotności powietrza, a także różne procedury obliczania jego wartości średniej dobowej. Autor wyprowadził wzór na podstawie standardowych pomiarów wilgotności powietrza, wykonywanych psychrometrem Augusta w trzech zasadniczych terminach obserwacyjnych: 7, 13 i 19 CET. W niniejszej pracy wykorzystano automatyczne pomiary wilgotności względnej powietrza i inną procedurę wyliczania średniej dobowej. Dalsze badania nad ewentualną modyfikacją tego wzoru powinny zatem uwzględnić w pierwszej kolejności porównanie wyników pomiarów niedosytu wilgotności powietrza według różnych metod, zwłaszcza standardowej (obowiązującej dotąd w sieci IMGW) oraz automatycznej. Nadal otwarty pozostaje także problem czy model wzorcowy według FAO w naszych warunkach klimatycznych prawidłowo opisuje ewapotranspirację referencyjną. Warunki Polski w porównaniu z rejonami, gdzie do określania potrzeb wodnych roślin jest stosowany model Penmana-Monteitha charakteryzują się stosunkowo wysoką wilgotnością powietrza

i okresami dużą częstotliwością opadów. Dane uzyskane na podstawie modeli obliczeniowych należy zweryfikować z pomiarami lizymetrycznymi, a następnie w miarę potrzeb w modelach uproszczonych przeprowadzić korektę zawartych w nich współczynników empirycznych.

## WNIOSKI

1. Na podstawie wstępnej oceny można stwierdzić, że w naszych warunkach klimatycznych w przypadku ograniczonej dostępności do danych meteorologicznych do wyznaczania ewapotranspiracji referencyjnej można stosować model obliczeniowego Hargreavesa w modyfikacji Droogersa i Allena.

2. Wprowadzenie do praktyki modelu Grabarczyka wymaga wcześniejszej weryfikacji stosowanych tam współczynników.

## LITERATURA

- Allen R.G. 1986. Penman for all seasons. Proc. ASCE, J. Irrigation and Drainage Eng. 112: 348-368.
- Allen R.G. 1993. New approaches to estimating crop evapotranspiration. Acta Hort. 335: 287-294.
- Allen R.G., Smith M., Pereira L. S., Pruitt W.O. 1996. Proposed revision to the FAO procedure for estimating crop water requirements. Proc. 2nd Int. Sym. on Irrigation of Hort. Crops. Acta Hort. 449 (1): 17-33.
- Doorenbos J., Pruitt W.O. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24.
- Castel J. R. 1996. Evapotranspiration of a drip-irrigated clementine citrus tree in a weighing lysimeter. Proc. 2nd Int. Sym. on Irrigation of Hort. Crops. Acta Hort. 449 (1): 91-98.
- Gocic M., Trajkovic S. 2010. Software for estimating reference evapotranspiration using limited weather data. Comput. Electron. Agric. (praca w druku).
- Grabarczyk S., Żarski J. 1986. Porównanie wysokości szacowanych dawek wody według różnych metod sterowania deszczowaniem. Zesz. Prob. Post. Nauk Roln. 327: 161-170.

- Grabarczyk S., Żarski J., Dudek S. 1990. Porównanie ewapotranspiracji potencjalnej obliczonej różnymi formułami z połowym zużyciem wody. *Zesz. Nauk. Akad. Rol. we Wrocławiu*, 191: 25:30.
- Grabarczyk S., Żarski J. 1992. Próba statystycznej weryfikacji niektórych wzorów określających ewapotranspirację potencjalną. *Zesz. Nauk. 180 – Rolnictwo (32)*: 169-175.
- Hargreaves G.H., Samani Z.A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Eng. Agricult.* 1: 96-99.
- Jones H.G., Aikman D., Mc Burney T.A. 1996. Improvements to infra-red thermometry for irrigation scheduling in humid climates. *Proc. 2nd Int. Sym. on Irrigation of Hort. Crops. Acta Hort.* **449**(1): 259-265.
- Mualem Y. 1990. The use of tensiometer readout for irrigation - success and failure. *Proc. 5th Int. Conf. on Irrigation*, s. 119-132.
- Michelakis N. 1996. Daily system radius variations as indicators to optimize olive tree irrigation scheduling. *Proc. 2nd Int. Sym. on Irrigation of Hort. Crops. Acta Hort.* **1**: 297-304.
- Sentelhas P.C., Gillespie T.J., Santos E.A. 2010. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. *Agricultural Water Manag.* **97**: 635-644.
- Ley T.W., Hill R.W., Jansen D.T. 1994. Errors in Penman-Wright alfalfa reference evapotranspiration estimates: I. Model sensitivity analyses. *Transactions of the ASAE*, **37**(6): 1853-1861.
- Thornthwaite C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Rev.* **38**: 55-94.
- Treder W., Konopacki P. 2004. Możliwości określania ewapotranspiracji potencjalnej za pomocą ewaporometrów ClassA pan i Pische'a. *Zesz. Nauk. Inst. Sadow. Kwiac.* **12**: 95-102.
- Treder W., Klamkowski K. 2008. Ocena przydatności sond drenażu glebowego do prowadzenia diagnostyki nawadniania i fertygacji roślin sadowniczych. *Zesz. Nauk. Inst. Sadow. Kwiac.* **16**: 192-200.
- Widmoser P. 2009. A discussion on and alternative to the Penman-Monteith equation. *Agr. Water Manag.* **96**: 711-721.
- Xing Z., Chow L., Meng F.R., Res H.W., Stevens L., Monteith L. 2008. Validating evapotranspiration equations using Bowen Ratio in New Brunswick. *Maritime Canada. Sensors* **8**: 412-428.

