

Leszek ŁABĘDZKI

## Potrzeby wodne i redukcja plonu roślin przy ograniczonych zasobach wody do nawodnień

### Abstract

**Crop water demand and yield reduction at limited irrigation water supply.** Under conditions of limited water supply for irrigation, deficit irrigation is applied and full crop water requirements are not met. Water deficit affects crop growth and yield. To evaluate the effect of water supply on crop yield the relationships between crop yield and evapotranspiration should be determined.

The paper presents yield response functions relating relative yield decrease and relative evapotranspiration deficits for five crops (winter wheat, spring barley, sugar beet, clover, grassland) cultivated in the Bydgoszcz region. The relationships were derived using multi-year lysimeter measurements.

With the presented relationships it is possible to plan, design and operate irrigation systems taking into account the effect of different water regimes on crop production.

*Key words: irrigation, water shortage, crop-water relationship.*

### Wstęp

Woda, jako jeden z podstawowych czynników produkcji roślinnej i jako zasób przyrody podlegający ochronie, wymaga efektywnego wykorzystania w nawodnieniach. Przy nieograniczonych możliwościach dostarczania wody do na-

wodnień można uzyskać maksymalny plon roślin zdeterminowany lokalnymi warunkami klimatycznymi i glebowymi, agrotechniką i cechami genetycznymi odmiany. W warunkach ograniczonej ilości wody, możliwej do wykorzystania w nawodnieniach, należy liczyć się z niepełnym zaspokojeniem potrzeb wodnych roślin i redukcją plonu. Stopień reakcji plonu roślin na niedobór wody jest zróżnicowany dla różnych roślin, ich odmian i faz rozwojowych. Znajomość tych zależności ma istotne znaczenie dla planowania kolejności nawodnień w zależności od czułości roślin na niedobór wody i dla optymalnego rozdziału wody w bieżącej eksploatacji systemów nawodnień.

Związki między rozwojem i plonowaniem roślin a klimatem, wodą i glebą są złożone. Ich opisanie i skwantyfikowanie wymaga poznania i ilościowego opisu wielu procesów i czynników biologicznych, fizjologicznych, fizycznych, chemicznych i agrotechnicznych. Dla celów praktycznych planowania, projektowania i eksploatacji systemów nawodnień należy ograniczyć te czynniki do najważniejszych lub założyć, że oprócz czynnika wodnego znajdują się one w optimum. Wtedy czynnikiem decydującym o plonie

roślin jest przy określonym działaniu pozostałych czynników – woda.

Zależność między plonem roślin a ilością wody dostępnej dla roślin w okresie wegetacji może być wyznaczona przy znajomości wielkości potrzeb i niedoborów wodnych roślin oraz maksymalnego i rzeczywistego plonu. Niedobór wody, w stosunku do potrzeb wodnych roślin rozumianych jako ewapotranspiracja przy nieograniczonej dostępności wody, wpływa na wielkość ewapotranspiracji i plonu. Przy nieograniczonej dostępności wody ewapotranspiracja osiąga maksimum ( $ET_m$ ), umożliwiając uzyskanie maksymalnego plonu ( $Y_m$ ) w danych warunkach klimatycznych i glebowych i przy określonym poziomie agrotechniki. Natomiast niepełne pokrycie potrzeb wodnych roślin powoduje hamowanie wzrostu roślin i redukcję plonu. Efekt ten można opisać zależnością pomiędzy względną redukcją plonu i względnym spadkiem ewapotranspiracji w postaci:

$$(1 - Y_a/Y_m) = k_y(1 - ET_a/ET_m) \quad (1)$$

gdzie:

$Y_a$  – plon rzeczywisty,

$Y_m$  – plon maksymalny,

$ET_a$  – ewapotranspiracja rzeczywista,

$ET_m$  – ewapotranspiracja maksymalna.

$k_y$  – współczynnik reakcji plonu na niedobór wody.

Współczynnik  $k_y$  jest wskaźnikiem wrażliwości roślin na niedobór wody i określa, ile razy większa lub mniejsza będzie względna redukcja plonu od względnego deficytu wody. Im współ-

czynnik  $k_y$  jest mniejszy, tym roślina jest bardziej odporna na niedobór wody.

Współczynnik  $k_y$  ma charakter lokalny i powinien być wyznaczany empirycznie w doświadczeniach lizymetrycznych lub warunkach polowych dla szerokiego zakresu zmienności czynników klimatycznych i glebowych, reżimu wodnego i warunków agrotechnicznych. Wartości współczynnika  $k_y$  podawane w literaturze (Doorenbos, Kassam 1979; Drupka, Kuźniar 1989; Kowalik 1989; Mosiej 1994) zostały wyznaczone w zróżnicowanych warunkach siedliskowych i stosowanie ich w innych warunkach może dawać mało wiarygodne wyniki. Z tego powodu podjęto próbę wyznaczenia wartości współczynników  $k_y$  dla kilku roślin uprawianych w rejonie Bydgoszczy, a więc w warunkach fizyczno-geograficznych Niziny Wielkopolsko-Kujawskiej, charakteryzujących się częstymi i długotrwałymi okresami niedoboru wody w produkcji roślinnej.

### **Materiał empiryczny i metody**

Do wyznaczenia zależności (1) i współczynników reakcji  $k_y$  wykorzystano pomiary lizymetryczne plonów i ewapotranspiracji, prowadzone w latach 1968–1994. Pomiary były prowadzone na glebie brunatnej o składzie piasku gliniastego mocnego w lizymetrach o powierzchni 3,6 m<sup>2</sup> i głębokości 1 m oraz na glebie torfowo-murszowej Mt III bb w lizymetrach o powierzchni 0,2 m<sup>2</sup> i głębokości 1,1 m.

Współczynnik  $k_y$  wyznaczono dla następujących roślin:

- pszenica ozima, jęczmień jary, buraki cukrowe, koniczyna czerwona 2-kośna, koniczyna, perska 3-kośna na glebie brunatnej,
- łąka 3-kośna na glebie torfowo-murszowej.

Dla użytków zielonych (łąka, koniczyna) obliczenia wykonano na sumach plonu suchej masy i ewapotranspiracji w pokosach i w całym okresie wegetacji. Okresy odrostów obejmowały miesiące:

- łąka 3-kośna
  - I pokos – IV–V
  - II pokos – VI–VII
  - III pokos – VIII–IX
- koniczyna czerwona 2-kośna:
  - I pokos – IV–10 VI
  - II pokos – 11 VI–10 VIII
- koniczyna perska 3-kośna:
  - I pokos – IV–10 VI
  - II pokos – 11 VI–10 VII
  - III pokos – 11 VII–20 VIII

Dla roślin polowych (pszenica ozima, jęczmień jary, buraki cukrowe) badano zależności między plonem końcowym a sumami ewapotranspiracji w całym okresie wegetacji i w fazach fenologicznych. Na podstawie obserwacji rozwoju roślin w poszczególnych latach wydzielono następujące fazy fenologiczne i średnie wieloletnie terminy ich występowania:

- pszenica ozima
 

I siew	IX
IIa wiosenne ruszenie wegetacji	27 III
IIb krzewienie	11 IV
IIc strzelanie w źdźbło	6V
IIIa kłoszenie, kwitnienie	16 VI
IIIb formowanie plonu, wypełnianie ziarna	26 VI

- |                |         |
|----------------|---------|
| IV dojrzewanie | 16 VII  |
| zbiór          | 15 VIII |
- jęczmień jary
 

I siew	10 IV
IIa wschody	26 IV
IIb krzewienie	11 V
IIc strzelanie w źdźbło	26 V
IIIa kłoszenie, kwitnienie	21VI
IIIb formowanie plonu, wypełnianie ziarna	1 VII
IV dojrzewanie	21 VII
zbiór	20 VIII
  - buraki cukrowe
 

I siew	17 IV
IIa wschody	11 V
IIb 3 para liści i początek grubienia korzeni	16 VI
III żółknięcie liści	21 VII
IV dojrzewanie	1 IX
zbiór	20 X

Jako maksymalne wartości ewapotranspiracji *E<sub>tm</sub>* i plonu *Y<sub>m</sub>* w zależności (1) przyjęto maksymalne wartości zmierzone w badanym materiale empirycznym. Dla użytków zielonych jako maksymalne przyjęto wielkości na górnej granicy przedziału dostatecznego uwilgotnienia, nie powodującego nadmiernego zużycia wody.

Współczynniki *k<sub>y</sub>* wyznaczono jako współczynniki regresji metodą najmniejszych kwadratów.

### **Współczynniki reakcji roślin na niedobór wody**

Reakcję roślin na dostępność wody można oszacować poprzez współczynnik *k<sub>y</sub>*, który uzależnia względny spadek plonu od względnego niedoboru wody w stosunku do ewapotranspiracji przy nie-

ograniczonym dostępie wody. Niedobory wody mogą występować przez cały okres wegetacji lub w poszczególnych fazach fenologicznych rozwoju roślin.

Uzyskane na podstawie pomiarów lizymetrycznych maksymalne wielkości plonów i ewapotranspiracji, wartości współczynników  $k_y$  oraz statystyczne oceny zależności (1) (wskaźnik korelacji  $R^2$ , standardowy błąd oceny) zestawiono w tabelach 1–5. Wielkości te podane są

TABELA 1. Współczynniki  $k_y$  reakcji roślin na niedobór wody dla pszenicy ozimej

Faza	$Y_m$	$E_{tm}$	$k_y$	$R^2$	$N$	$SEE$
IIa		19	0,55	0,474	24	0,297
IIb		65	0,90	0,625	24	0,251
IIc		265	1,12	0,643	24	0,244
IIIa		75	0,85	0,671	24	0,235
IIIb		184	0,61	0,728	24	0,214
IV		105	0,46	0,602	24	0,258
Okres wegetacji	7,2	531	1,48	0,768	47	0,214

$Y_m$  – plon maksymalny ( $t \cdot ha^{-1}$ ),  
 $E_{tm}$  – ewapotranspiracja maksymalna (mm),  
 $R$  – współczynnik korelacji dla zależności (1),  
 $N$  – liczebność próby,  
 $SEE$  – standardowy błąd oceny dla zależności (1)

TABELA 2. Współczynniki  $k_y$  reakcji roślin na niedobór wody dla jęczmienia jarego

Faza	$Y_m$	$E_{tm}$	$k_y$	$R^2$	$N$	$SEE$
I		23	0,44	0,742	24	0,195
IIa		30	0,58	0,585	24	0,248
IIb		95	0,65	0,794	24	0,175
IIc		168	1,01	0,656	24	0,225
IIIa		88	0,79	0,819	24	0,164
IIIb		135	0,70	0,851	24	0,148
IV		88	0,48	0,838	24	0,155
Okres wegetacji	5,3	454	1,30	0,834	48	0,159

Oznaczenia jak w tab.1.

TABELA 3. Współczynniki  $k_y$  reakcji roślin na niedobór wody dla buraków cukrowych

Faza	$Y_m$	$E_{tm}$	$k_y$	$R^2$	$N$	$SEE$
I		39	0,65	0,673	24	0,234
IIa		87	0,99	0,785	24	0,190
IIb		183	0,96	0,870	24	0,148
III		264	0,97	0,867	24	0,149
IV		114	0,86	0,560	24	0,272
Okres wegetacji	60	616	1,07	0,824	48	0,174

Oznaczenia jak w tab.1.

TABELA 4. Współczynniki  $k_y$  reakcji roślin na niedobór wody dla koniczyny

Po-kos	$Y_m^*$	$E_{tm}$	$k_y$	$R^2$	$N$	$SEE$
I	6,3	179	0,95	0,662	10	0,205
II	6,1	274	0,68	0,616	10	0,198
Okres weget.	12,0	427	0,82	0,365	10	0,242
I	3,6	171	0,52	0,433	8	0,190
II	4,6	190	0,93	0,909	8	0,138
III	3,7	192	0,88	0,900	8	0,187
Okres weget.	10,7	495	0,83	0,832	8	0,145

\* $Y_m$  – plon suchej masy, pozostałe oznaczenia jak w tab.1.

TABELA 5. Współczynniki  $k_y$  reakcji roślin na niedobór wody dla łąki 3-kośnej

Po-kos	$Y_m^*$	$E_{tm}$	$k_y$	$R^2$	$N$	$SEE$
I	5,6	196	1,08	0,683	59	0,243
II	5,0	299	1,10	0,782	78	0,206
III	3,7	222	1,17	0,640	61	0,270
Okres weg.	14,1	716	1,12	0,837	77	0,156

Oznaczenia jak w tab.4.

dla całych okresów wegetacji, faz fenologicznych oraz dla pokosów.

Zaobserwowane maksymalne wielkości plonów badanych roślin mieszczą się w zakresach wysokich i bardzo wysokich plonów podawanych przez Drupkę (1986) oraz Drupkę i Kuźniara (1989) dla warunków krajowych. Przyjęte do obliczeń wielkości *Etm* odpowiadały plonom równym lub bliskim plonowi maksymalnemu *Ym*.

Uzyskano wysokie wskaźniki korelacji  $R^2$  zależności względnej redukcji plonu od względnej redukcji ewapotranspiracji. Wskazuje to, że zmienność redukcji plonu w poszczególnych latach była w dużym stopniu (w 60–90%) spowodowana zmiennością ograniczenia ewapotranspiracji w stosunku do *Etm*.

Analizując uzyskane dane, można wyróżnić trzy grupy roślin ze względu na redukcję plonu w wyniku niedoboru wody równomiernie rozłożonego w całym okresie wegetacji. Grupa 1, dla której redukcja plonu jest proporcjonalnie większa od wzrostu deficytu wody ( $k_y > 1$ ), obejmuje pszenicę ozimą, jęczmień jary i łąkę. Dla grupy 2, do której można zaliczyć buraki cukrowe, względna redukcja plonu jest taka sama jak redukcja ewapotranspiracji ( $k_y \approx 1$ ). Z badanych roślin jedynie koniczynę można zaliczyć do grupy 3, która wykazuje proporcjonalnie mniejszą redukcję plonu w stosunku do deficytu wody ( $k_y < 1$ ).

W poszczególnych fazach fenologicznych reakcja roślin na niedobór wody jest zróżnicowana. Dla pszenicy ozimej najwyższe współczynniki  $k_y$  uzyskano w fazie krzewienia, poprzez fazę strzelanie w źdźbło, do początku fazy wypełniania

ziarna; dla jęczmienia jarego od fazy strzelania w źdźbło do okresu dojrzewania. Dla buraków cukrowych współczynnik  $k_y$  jest wyrównany i bliski wartości 1 od wschodów do początku okresu dojrzewania. Ze względu na małą liczbę danych pomiarowych dla koniczyny, pomimo wysokich wskaźników korelacji, uzyskane wyniki mogą być nie w pełni miarodajne. Można jednak stwierdzić, że w poszczególnych pokosach redukcja plonu jest proporcjonalnie mniejsza od wzrostu deficytu wody. Natomiast w poszczególnych pokosach łąki 3-kośnej redukcja plonu jest proporcjonalnie większa od wzrostu deficytu wody. Współczynniki  $k_y$  są w miarę wyrównane w pokosach, jednak z wyraźną tendencją wzrostową w kolejnych pokosach. Wyniki te znajdują potwierdzenie we wnioskach pracy Łabędzkiego i Kasperskiej (1994), gdzie stwierdzono największą redukcję plonu w trzecim pokosie w wyniku spadku wilgotności gleby poniżej krytycznej.

Przedstawione w pracy współczynniki  $k_y$  są wyższe dla zbóż od podawanych przez Doorenbosa i Kassama (1979) oraz Drupkę i Kuźniara (1989) zarówno dla całego okresu wegetacji, jak i w poszczególnych fazach rozwojowych. Stopień redukcji plonu badanych zbóż stwierdzony w warunkach pomiarów lizymetrycznych w rejonie Bydgoszczy jest większy niż podawany i zalecany przez tych autorów. Zbliżone współczynniki  $k_y$  uzyskano natomiast dla buraków cukrowych. Dla łąki 3-kośnej uzyskano wyższe współczynniki  $k_y$  od tych, które uzyskał Mosiej (1994) na podstawie 6-letnich badań w płytkich 30-centymetrowych lizy-

metrach. Prezentowane obecnie współczynniki  $k_y$  są wyższe od 1 z najwyższą wartością w trzecim pokosie, podczas gdy Mosiej (1994) uzyskał współczynniki  $k_y$  mniejsze od 1 i tendencję malejącą w kolejnych pokosach. Rozbieżności te powinna zweryfikować analiza pomiarów lizymetrycznych i polowych prowadzonych w innych warunkach klimatycznych i glebowo-wodnych.

Fazy rozwoju roślin, w których stwierdzono najwyższe współczynniki  $k_y$ , pokrywają się z fazami zwiększonych potrzeb wodnych roślin i wzmożonego pobierania przez rośliny składników pokarmowych z gleby. Są to fazy intensywnego rozwoju roślin, intensywnego przyrastania nadziemnych lub podziemnych części albo tworzenia ziarna. Fazy te wyznaczają optymalne okresy nawodnień, w których niedobór wody powoduje największe straty w plonach.

### **Zastosowanie współczynników reakcji roślin na niedobór wody**

Zastosowanie współczynników reakcji roślin na niedobór wody w gospodarowaniu wodą w systemach melioracyjnych umożliwia ocenę zapotrzebowania wody do nawodnień i ilości wody zużytej dla założonego plonu roślin i założonej produkcji rolniczej na danym obszarze.

W warunkach ograniczonych zasobów wody możliwych do wykorzystania w nawodnieniach, przy stosowaniu nawodnień deficytowych (niedonawadniania), współczynnik  $k_y$  umożliwia ocenę prawdopodobnych strat w plonach lub

prowadzenie optymalnego rozdziału wody dla zmniejszenia strat w plonach. W zależności od tego, czy ograniczenie zasobów wody powodujące niedobór wody dla roślin występuje równomiernie przez cały okres wegetacji czy też występuje tylko okresowo w poszczególnych fazach rozwojowych roślin niedobory wody odnosi się do potrzeb wodnych ( $E_{tm}$ ) w całym okresie wegetacji lub w danej fazie.

Współczynniki reakcji  $k_y$  dla całego okresu wegetacji mają duże znaczenie przy planowaniu produkcji roślinnej na obszarach, gdzie wymagane są nawodnienia i gdzie należy liczyć się z niedostateczną ilością wody potrzebną do zaspokojenia pełnych potrzeb wodnych roślin. Na przykład w rejonie Bydgoszczy, przy danym deficycie wody rozłożonym równomiernie przez cały okres wegetacji, spadek plonu pszenicy ozimej będzie większy od spadku plonu buraków cukrowych. Dlatego, gdy celem nawodnień jest uzyskanie maksymalnego plonu, w pierwszej kolejności woda powinna być dostarczana na pola pszenicy ozimej.

Zróznicowana czułość roślin na niedobór wody w różnych fazach fenologicznych może być wykorzystywana w bieżącej eksploatacji systemów nawodnień. Konfrontując potrzeby wodne roślin uprawianych na danym obszarze z możliwościami ich zaspokojenia przez dostępne zasoby wodne, można tak zaplanować rozdział wody, aby w pełni zaspokoić potrzeby wodne tych roślin, które znajdują się w fazach o największej wrażliwości na niedobór wody (najwyższy współczynnik  $k_y$ ).

Obecnie, kiedy celem gospodarowania wodą w systemach nawodnień nie jest maksymalizacja plonu, ale uzyskanie założonego plonu przy efektywnym wykorzystaniu wody, przedstawione zależności i wskaźniki umożliwiają ocenę potrzeb wodnych, a w konsekwencji potrzeb nawodnień roślin dla planowanej redukcji plonu w stosunku do plonu maksymalnego możliwego do uzyskania w danych warunkach klimatycznych, glebowych i agrotechnicznych. Ocenę taką można przeprowadzić zarówno dla całego okresu wegetacji, jak i w poszczególnych fazach rozwojowych. Przekształcając równanie (1), można wyznaczyć potrzeby wodne roślin  $ETa$  dla założonej redukcji plonu  $Re$ :

$$ETa = Etm(1 - Re/ky) \quad (2)$$

gdzie  $Re = 1 - Ya/Ym$ .

W tabeli 6 podane są przykładowo zredukowane sumaryczne potrzeby wodne w okresie wegetacji badanych roślin dla założonej 20% redukcji plonu.

TABELA 6. Zredukowane potrzeby wodne  $ETa$  w okresie wegetacji dla 20% redukcji plonu

Roślina	$Ym$	$Ya$	$Etm$	$ETa$
Pszenica ozima	7,2	5,8	531	459
Jęczmień jary	5,3	4,2	454	384
Buraki cukrowe	60,0	48,0	616	501
Koniczyna czerwona	12,0*	9,6*	427	323
Koniczyna perska	10,7*	8,6*	495	376
Łąka 3-kośna	14,1*	11,3*	716	588

$Ym$  – plon maksymalny ( $t \cdot ha^{-1}$ )

$Ya$  – plon rzeczywisty ( $t \cdot ha^{-1}$ )

$Etm$  – ewapotranspiracja maksymalna (mm)

$ETa$  – ewapotranspiracja rzeczywista (mm)

\* – plon suchej masy

## Podsumowanie

Ważnym składnikiem oceny możliwości produkcji roślinnej w warunkach nawadniania jest rozkład czasowy i przestrzenny potrzeb wodnych roślin i możliwości ich zaspokojenia, czyli dostępnych zasobów wodnych. Kiedy ilość tych zasobów jest wystarczająca do pełnego pokrycia tych potrzeb, można osiągnąć maksymalny plon uwarunkowany innymi czynnikami (klimatycznymi, glebowymi, genetycznymi, agrotechnicznymi). Przy ograniczonych zasobach wody należy liczyć się z niepełnym pokryciem potrzeb wodnych roślin i spadkiem plonu. Stopień reakcji roślin na niedobór wody i wielkość redukcji plonu spowodowaną tym niedoborem można ocenić przy użyciu przedstawionych w pracy współczynników  $ky$ , określonych dla kilku upraw na podstawie wieloletnich pomiarów lizymetrycznych w regionie Niziny Wielkopolsko-Kujawskiej.

Zależności plonowania roślin od stopnia zaspokojenia ich potrzeb wodnych umożliwiają planowanie, projektowanie i eksploatację systemów nawodnień, mające na celu optymalny rozdział wody dla efektywnego jej wykorzystania i uzyskania założonego plonu.

## Literatura

- DOORENBOS J., KASSAM A.H. 1979: *Yield response to water*. FAO Irrigation and Drainage Paper 33, FAO, Rome.
- DRUPKA S. 1986: *Nawodnienia deszczowniane i kropłowe*. (w): *Podstawy melioracji rolnych*, red. P. Prochal, PWRiL Warszawa, t.1; 449–616.
- DRUPKA S., KUŹNIAR A. 1989: *Zależność plonu od ewapotranspiracji rzeczywistej przy*

- niepełnym pokryciu niedoborów wody glebo-  
wej w warunkach ograniczonych zasobów  
wody do nawodnień. Załącznik do Instrukcji  
Wyznaczania Potrzeb i Niedoborów Wod-  
nych Roślin Uprawnych i Użytków Zielo-  
nych, IMUZ Falenty.*
- KOWALIK P. 1989: *Relacja między zaopatrze-  
niem w wodę a plonem roślin.* (w): *Potrzeby  
wodne roślin uprawnych*, red. J. Dzieżyc,  
PWN, Warszawa; 36–49.
- ŁABĘDZKI L., KASPERSKA W. 1994: *Ewapo-  
transpiracja i plonowanie użytków zielonych  
w warunkach suszy atmosferycznej i glebo-  
wej.* Mat. XXV Zjazdu Agrometeorologów,  
Olsztyn-Mierki 27–29 IX 1994; 99–107.
- MOSIEJ J. 1994: *The relationship between relati-  
ve grassland yield decrease and evapotran-  
spiration deficit.* Proc. 17th European Regio-  
nal Conf. ICID, Varna; 163–172.

**Adres autora**

L. Łabędzki

Instytut Melioracji i Użytków Zielonych,

Oddział w Bydgoszczy

85–093 Bydgoszcz, al. Ossolińskich 12