



Prognozowanie efektów nawadniania roślin na podstawie wybranych wskaźników suszy meteorologicznej i rolniczej

*Jacek Żarski, Stanisław Dudek, Renata Kuśmierk-Tomaszewska,
Roman Rolbiecki, Stanisław Rolbiecki*
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz

1. Wstęp

Uprawa roślin obciążona jest w Polsce klimatycznym ryzykiem, wynikającym z występowania szkodliwych i niekorzystnych zjawisk pogodowych. Należą do nich między innymi okresy posuszne, które pojawiają się głównie w rejonach głównej koncentracji produkcji rolniczej, obejmujących rozległy obszar nizinnej, centralnej części Polski. Susze atmosferyczne przeradzające się w glebowe, a w skrajnych przypadkach nawet w susze hydrologiczne, są na tym obszarze zjawiskiem częstym i nieregularnym [5, 9, 11, 14]. Wynika to z podstawowej cechy przejściowego klimatu Polski, którą stanowi bardzo duża zmienność warunków pogodowych w tych samym okresach kalendarzowych kolejnych lat. Zmienność ta dotyczy wszystkich elementów meteorologicznych, ale najbardziej wysokości i rozkładu opadów atmosferycznych.

Wystąpienie suszy w okresie wzmożonych potrzeb wodnych roślin przyczynia się do pogorszenia plonowania, zarówno w aspekcie ilościowym, jak i jakościowym. Jest to związane z niekorzystnym wpływem niedoborów wodnych na rytm wzrostu i rozwoju roślin, wynikającym głównie z ograniczenia pobierania składników pokarmowych z gleby, osłabienia aktywności procesów fizjologicznych oraz skrócenia okresu fizjologicznej sprawności [5, 19]. W doświadczeniach prowadzonych na obszarach szczególnie deficytowych w wodę, obejmujących gleby o ma-

łej retencyjności w centralnej Polsce, wielokrotnie wykazywano, iż wystąpienie okresów posusznych powoduje straty w plonowaniu upraw rolniczych i warzywnych [2, 12–16, 18]. Straty te wynoszą od 20 do 80%, w zależności od stopnia intensywności suszy, a w skrajnych przypadkach ekstremalna susza może spowodować całkowitą utratę plonu [9, 10, 18].

Zabiegiem skutecznie zapobiegającym negatywnym skutkom suszy jest nawadnianie roślin. Według wielu badań dotyczących roślin rolniczych i ogrodniczych, zapewnia ono prawidłowy rytm wzrostu i rozwoju roślin oraz intensyfikuje procesy fizjologiczne. W efekcie powoduje wzrost plonu i jego stabilizację w latach, a także korzystnie wpływa na jakość plonu [2, 8, 12–16, 18, 19].

W Polsce nawadnianie roślin uprawy polowej nie rozwinęło się dotąd na szerszą skalę głównie z powodu niekorzystnych uwarunkowań ekonomicznych i infrastrukturalnych. Wzrost powierzchni nawadnianych jest nadal rozwiązaniem przyszłościowym i stanowi poważną rezerwę produkcji rolniczej. Do czynników przyspieszających rozwój nawodnień, obok zapewniania wyższych i stabilnych plonów o dobrej jakości, zaliczyć można potrzebę wzrostu nowoczesności i konkurencyjności gospodarstw rolniczych oraz prognozowane zmiany klimatyczne [6, 10, 14, 20].

Rozwój nawodnień powinien dotyczyć w pierwszej kolejności polowego towarowego warzywnictwa i sadownictwa. Najnowsze dane i szacunki wskazują, iż w Polsce nawadnia się około 45 tys. ha warzyw gruntowych [8] i 80–100 tys. ha upraw sadowniczych [17]. Możliwe jest tu stosowanie mikronawodnień, czyli precyzyjnych technik nawodnieniowych, umożliwiających fertygację i zaawansowaną automatyzację w oparciu o ciągły monitoring warunków atmosferycznych, decydujących o potrzebach wodnych roślin [4, 7, 14]. Techniki te zapewniają także oszczędne gospodarowanie wodą. Jest to argument szczególnie ważny, bowiem możliwe do pozyskania w celach nawodnieniowych zasoby wody powinny być w Polsce wykorzystywane w sposób szczególnie racjonalny [3].

Podstawowym wskaźnikiem celowości nawodnień są efekty produkcyjne, czyli bezwzględne przyrosty plonów uzyskane pod wpływem stosowania tego zabiegu w technologii produkcji rolniczej. Wielkość i wartość tych efektów w danym sezonie wegetacyjnym zależy głównie od warunków meteorologicznych, w tym zwłaszcza od wysokości i rozkładu opadów atmosferycznych [14, 19]. Pozytywne skutki nawod-

nień w postaci zwyżek plonów nie mogą być co prawda jedyną podstawą decyzji o zainstalowaniu i prowadzeniu nawodnień [8], jednak stanowią one podstawę oceny ich efektywności ekonomicznej. Efektywność ta decyduje z kolei o aktualnym stanie i stanowi najważniejszą przesłankę ewentualnego rozwoju nawodnień w polowej uprawie upraw rolniczych, stanowiącej podstawowy dział krajowego rolnictwa.

Celem poznawczym pracy było poszukiwanie istotnych zależności między wielkością efektów produkcyjnych nawadniania i wybranych wskaźników suszy meteorologicznej i rolniczej w okresach wzmożonych potrzeb wodnych testowanych roślin rolniczych. Cel aplikacyjny stanowiło zaproponowanie prostej metody prognozowania efektów nawadniania na podstawie czasowej i przestrzennej zmienności tych wskaźników.

2. Materiał i metody badań

Pracę wykonano na podstawie wyników wieloletnich, ścisłych doświadczeń polowych z nawadnianiem następujących roślin jarych, uprawianych na polach ustalonych według następstwa: ziemniak jadalny na oborniku, jęczmień jary browarny, bobik, kukurydza uprawiana na ziarno. Doświadczenia przeprowadzono w latach 2006–2012 w Stacji Badawczej Wydziału Rolnictwa i Biotechnologii Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy. Stacja zlokalizowana jest w Mochełku, położonym około 20 km od centrum miasta, na południowo-wschodniej krawędzi Wysoczyzny Krajeńskiej ($\varphi = 53^{\circ}13'$, $\lambda = 17^{\circ}51'$, $h = 98,5$ m n.p.m.), a więc w strefie o największych przeciętnych niedoborach opadów atmosferycznych i potrzebach stosowania uzupełniającego nawadniania w Polsce pod względem kryterium klimatycznego. Doświadczenie założono na glebie płowej wytworzonej z piasków fluwioglacjalnych na płytko zalegającej glinie średniej, zaklasyfikowanej do klasy bonitacyjnej IVa i kompleksu przydatności rolniczej żytniego bardzo dobrego. Pod względem stopnia zwięzłości jest to gleba lekka na podłożu zwięzłym. Biorąc pod uwagę warunki glebowe doświadczenia, stosowane nawadnianie miało typowy dla warunków klimatycznych Polski charakter interwencyjny, uzupełniający okresowe braki opadów atmosferycznych w okresie wzmożonych potrzeb wodnych testowanych upraw.

Rośliny nawadniano optymalnie, zgodnie z praktyką nawodnieniową, zapewniając w warstwie gleby o kontrolowanym uwilgotnieniu zapas wody łatwo dostępnej w całym okresie wzmożonych potrzeb wod-

nych [1]. Terminy nawodnień ustalano wykorzystując stały monitoring wilgotności korzeniowej warstwy gleby za pomocą bilansowania zapasu wody łatwo dostępnej na podstawie parametrów meteorologicznych według metody Drupki [1] oraz bezpośrednich pomiarów wilgotności gleby przy użyciu sondy Fieldscout TDR 300 Soil Moisture Meter. Nawodnień jęczmienia browarnego i bobiku dokonywano za pomocą przenośnego systemu deszczownianego, wykorzystującego niskociśnieniowe, sektorowe głowice nawadniające typu Nelson o jednostkowej wydajności 200 l h^{-1} . Do nawadniania ziemniaka jadalnego i kukurydzy ziarnowej używano linii kroplującej „drip-line” z wtopionymi co 200 mm w ścianę przewodu emiterami labiryntowymi produkcji firmy NAAN, ułożonej międzyrzędowo. Liczba jednorazowych dawek nawodnieniowych i sumaryczna dawka sezonowa zależała od przebiegu warunków pogodowych, głównie od wysokości i rozkładu opadów atmosferycznych.

W pracy wykorzystano wyniki pomiarów meteorologicznych, prowadzonych w sposób standardowy, zgodny z procedurami IMGW, w punkcie pomiarowym Mochełek, usytuowanym w pobliżu pola doświadczalnego. Uwzględniono następujące wskaźniki suszy meteorologicznej i rolniczej [9]: bezwzględna wysokość opadów atmosferycznych (P), wskaźnik względnego opadu (RPI), wskaźnik standaryzowanego opadu (SPI), klimatyczny bilans wodny (KBW) z wykorzystaniem wzoru na ewapotranspirację wskaźnikową według Bacia $ET_0 = 3d(v^{1/2}) + 4Q$, gdzie d – niedosyt wilgotności powietrza w hPa, v – prędkość wiatru w m s^{-1} , Q – promieniowanie słoneczne całkowite w kcal cm^{-2} , rolniczoklimatyczny bilans wodny (RKBW) z wykorzystaniem wzoru na ewapotranspirację potencjalną (rzeczywistą w warunkach dostatecznego zaopatrzenia w wodę) według Grabarczyka $ET = 0,32 [d+1/3t]$, gdzie t – średnia temperatura powietrza.

Dysponując efektami produkcyjnymi nawodnień testowanych upraw z siedmiu kolejnych lat badań i kompleksowymi danymi meteorologicznymi, poszukiwano najbardziej istotnych zależności między przyrostami plonów uzyskanymi pod wpływem nawadniania i wymienionymi wskaźnikami suszy. Wskaźniki te obliczano w różnych krokach czasowych (cały okres wegetacji, okresy wzmożonego zapotrzebowania na wodę, obejmujące w zależności od uprawy przedziały dwumiesięczne (V–VI, VI–VII, VII–VIII) lub trzymiesięczne (IV–VI, V–VII, VI–VIII, VII–IX)). Analizę statystyczną przeprowadzono wykorzystując średnie

efekty nawadniania uzyskane w kolejnych latach doświadczeń ($n = 7$). Efekty te uśredniono z 32 powtórzeń obejmujących 8 kombinacji doświadczenia dla każdego wariantu wodnego (2 odmiany \times 4 poziomy nawożenia azotowego oraz ich 4 replikacje). Zastosowano metodę regresji, wykorzystując arkusz kalkulacyjny Excel. W pracy przedstawiono zależności najbardziej istotne, które cechowały najwyższe współczynniki korelacji i determinacji.

3. Omówienie wyników badań

3.1. Efekty produkcyjne nawadniania roślin

Podstawę oceny celowości instalacji urządzeń nawadniających stanowią przeciętne (średnie wieloletnie) efekty produkcyjne nawadniania wyrażane za pomocą zwyczajek plonów uzyskanych pod wpływem tego zabiegu. W badaniach własnych efekty te były podobne u wszystkich testowanych upraw nawadnianych kropłowo bądź za pomocą deszczowni i wynosiły od 37 do 51%, w zależności od rośliny. Najwyższą względną zwyczaję plonu pod wpływem nawadniania uzyskano w uprawie kukurydzy na ziarno (tab.1), natomiast najniższą w produkcji surowca dla przemysłu browarniczego (tab. 2). Bezwzględne średnie wieloletnie efekty produkcyjne nawadniania zastosowanego w uprawie roślin wynosiły: ziemniak jadalny $12,08 \text{ t ha}^{-1}$ świeżej masy bulw, kukurydza $3,83 \text{ t ha}^{-1}$ suchej masy ziarna, jęczmień browarny $1,44 \text{ t ha}^{-1}$ ziarna oraz bobik $1,38 \text{ t ha}^{-1}$. Są to przyrosty plonów trudne do osiągnięcia za pomocą stosowania innych zabiegów agrotechnicznych, melioracyjnych bądź hodowlanych. Wskazują one na duże możliwości powiększenia produktywności krajowego rolnictwa pod warunkiem optymalizacji czynnika wodnego. Pomocne w tej optymalizacji mogą być jednostkowe efekty produkcyjne nawadniania wyrażane przyrostami plonów spowodowanymi zastosowaniem 1 mm wody nawodnieniowej. Wynosiły one w przypadku nawadniania kropłowego: $128,1 \text{ kg ha}^{-1}$ bulw ziemniaka oraz $39,7 \text{ kg ha}^{-1}$ suchej masy ziarna kukurydzy, a w przypadku nawadniania za pomocą deszczowni $18,3 \text{ kg ha}^{-1}$ ziarna jęczmienia i $15,0 \text{ kg ha}^{-1}$ nasion bobiku.

Tabela 1. Efekty produkcyjne nawadniania kropłowego testowanych w badaniach upraw polowych w latach 2006–2012**Table 1.** Effects of drip irrigation production on yield of field crops tested in the research in the years 2006–2012

Rok badań Year	Wysokość plonu w t ha ⁻¹ Yield [t ha ⁻¹]		Zwyżka plonu pod wpływem nawadniania Yield increase under irrigation		
	W ₀	W ₁	t ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹ mm ⁻¹
Ziemniak jadalny – świeża masa bulw Table potatoes – dry matter content in tuber					
2006	14,02	42,57	28,55	204	136,0
2007	30,25	33,26	3,01	10	120,4
2008	15,27	43,97	28,70	188	136,7
2009	30,00	30,00	0	0	0
2010	30,48	49,08	18,60	61	132,9
2011	36,40	40,00	3,60	10	120,0
2012	44,06	46,15	2,09	5	139,3
Średnio	28,64	40,72	12,08	42	128,1
CV	37,7 %	16,9 %			
Kukurydza – sucha masa ziarna Corn – dry matter content in grain					
2006	0,50	8,97	8,47	1694	70,6
2007	9,33	10,36	1,03	11	41,2
2008	2,00	8,26	6,26	313	29,1
2009	9,76	13,04	3,26	33	36,2
2010	6,86	13,50	6,64	97	47,4
2011	13,66	13,98	0,32	2	10,7
2012	10,23	11,02	0,79	8	14,4
Średnio	7,48	11,30	3,83	51	39,7
CV	63,1 %	20,0 %			

CV – współczynnik zmienności, CV – the coefficient of variation

W₀ – bez nawadniania, W₀ – without irrigation,W₁ – z nawadnianiem, W₁ – with irrigation,

Nawadnianie, oprócz efektów produkcyjnych, przyczyniło się także do stabilizacji plonowania testowanych upraw. Współczynnik zmienności plonowania w warunkach naturalnych wynosił od 34,0 do 63,1%, w zależności od rośliny. W warunkach deszczowania kształtował się natomiast na poziomie od 6,8 (jęczmień jary) do 20,3% (bobik).

Tabela 2. Efekty produkcyjne nawadniania deszczownianego testowanych w badaniach upraw polowych w latach 2006–2012

Table 2. Effects of sprinkling irrigation production on yield of field crops tested in the research in the years 2006–2012

Rok badań Year	Wysokość plonu w t ha ⁻¹ Yield [t ha ⁻¹]		Zwyżka plonu pod wpływem nawadniania Yield increase under irrigation		
	W ₀	W ₁	t ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹ .mm ⁻¹
Jęczmień jary browarny – ziarno o wilgotności 15 % Malting barley – grain moisture content of 15%					
2006	2,64	5,32	2,68	102	29,8
2007	4,79	5,03	0,24	5	8,0
2008	1,98	5,37	3,39	171	18,8
2009	5,90	5,90	0	0	0
2010	3,76	5,17	1,41	37	13,4
2011	3,67	4,83	1,16	32	15,5
2012	4,45	5,64	1,19	27	17,0
Średnio	3,88	5,32	1,44	37	18,3
CV	34,0 %	6,8 %			
Bobik – nasiona o wilgotności 15 % Beans – grain moisture content of 15%					
2006	1,42	3,54	2,12	149	19,3
2007	4,14	5,01	0,87	21	34,8
2008	0,58	3,70	3,12	538	15,6
2009	5,26	5,38	0,12	2	0
2010	1,83	4,29	2,46	134	13,7
2011	3,42	3,85	0,43	13	6,6
2012	5,35	5,92	0,57	11	8,8
Średnio	3,14	4,53	1,38	44	15,0
CV	60,5 %	20,3 %			

Objaśnienia – jak pod. Tab. 1; Explanations – see Table 1

Na podstawie wielkości zaprezentowanych w tabelach 1 i 2 przeciętnych efektów można stwierdzić, że pod względem kształtowania wskaźników produkcyjnych, wprowadzenie nawadniania do technologii produkcji testowanych upraw jest zabiegiem bardzo celowym. Jednak w praktyce rolniczej ewentualne stosowanie tego zabiegu zależy przede wszystkim od efektywności ekonomicznej przedsięwzięcia,

kształtowanej przez wartość plonu (cenę produktu lub surowca roślinnego) oraz od uwarunkowań infrastrukturalnych, w tym głównie dostępności źródeł wody do nawodnień.

W siedmioletnim okresie badawczym 2006–2012 efekty produkcyjne nawadniania poszczególnych upraw cechowały się bardzo dużą zmiennością czasową w poszczególnych sezonach wegetacyjnych. W uprawie ziemniaka kształtowały się od 0 do $28,70 \text{ t ha}^{-1}$, kukurydzy ziarnowej od $0,32$ do $8,47 \text{ t ha}^{-1}$, jęczmienia browarnego od 0 do $3,39 \text{ t ha}^{-1}$, a bobiku od $0,12$ do $3,12 \text{ t ha}^{-1}$. Zakres zwwyżek względnych wynosił od 0 (ziemniak i jęczmień w 2009 r.) do aż 1694% (kukurydza w 2006 r.). Operowanie względnymi przyrostami plonów w odniesieniu do pojedynczego sezonu wegetacji nie zawsze jest zasadne, bowiem o wielkości tego wskaźnika decyduje w dużej mierze wielkość plonu kontrolnego (bez nawadniania). Jeśli jest on w wyniku wystąpienia ekstremalnej bądź intensywnej suszy rolniczej znikomy (np. kukurydza w 2006 r. $0,50 \text{ t ha}^{-1}$, bobik w 2008 r. $0,58 \text{ t ha}^{-1}$) wówczas zwwyżki względne przyjmują bardzo wysokie wielkości. Biorąc pod uwagę wszystkie uprawy można stwierdzić, iż nawadnianie było najbardziej efektywne w sezonach wegetacji 2006, 2008 i 2010 roku. W pozostałych latach (2007, 2011, 2012) efekty produkcyjne nawadniania były znacznie mniejsze. W 2009 roku, w uprawie ziemniaka, jęczmienia i bobiku nie zaszła potrzeba nawadniania roślin, natomiast zastosowanie tego zabiegu w uprawie kukurydzy przyczyniło się do wzrostu plonu o $3,26 \text{ t ha}^{-1}$, tj. o 33%.

3.2. Zależność efektów produkcyjnych nawadniania roślin od wskaźników suszy meteorologicznej i rolniczej

Wykorzystując dużą zmienność efektów nawadniania w latach badań uzależniono ich wielkość od wskaźników suszy meteorologicznej i rolniczej w okresach wzmożonego zapotrzebowania roślin na wodę, obliczonych na bazie parametrów meteorologicznych. Przeprowadzona analiza regresji wykazała, że w każdym z analizowanych przypadków efekty te zależały istotnie, prostoliniowo i odwrotnie proporcjonalnie od wybranych wskaźników suszy atmosferycznej i glebowej. Najlepsze związki uzyskano uzależniając zwwyżki plonów od wskaźników suszy w okresach dwumiesięcznych: maj–czerwiec (jęczmień jary) oraz czerwiec–lipiec (pozostałe uprawy). Porównując współczynniki korelacji charakteryzujące omawiane zależności (tab. 3) można stwierdzić, iż były

one najwyższe w przypadku kukurydzy, nieco niższe w odniesieniu do uprawy ziemniaka i jęczmienia, natomiast zdecydowanie najniższe i istotne tylko na poziomie 0,05 w przypadku bobiku.

Tabela 3. Współczynniki korelacji charakteryzujące zależności efektów produkcyjnych nawadniania od wskaźników suszy meteorologicznej i rolniczej
Table 3. Correlation coefficients characterizing the production effects of irrigation depending on meteorological and agricultural drought indicators

Testowana uprawa Crop	Okres wzmożonych potrzeb wodnych Period of increased needs of water	Wskaźniki suszy meteorologicznej i rolniczej Indices of meteorological and agricultural drought			
		RPI	SPI	KBW	RKBW
Ziemniak jadalny	VI–VII	0,9310**	0,9397**	0,9582**	0,9571**
Kukurydza na ziarno	VI–VII	0,9664**	0,9499**	0,9560**	0,9485**
Jęczmień browarny	V–VI	0,9124**	0,9009**	0,9406**	0,9586**
Bobik	VI–VII	0,8266*	0,8026*	0,8424*	0,8361*

** – istotność na poziomie 0,01, * – istotność na poziomie 0,05

** – significant at the 0.01 level, * – significant at the 0.05 level

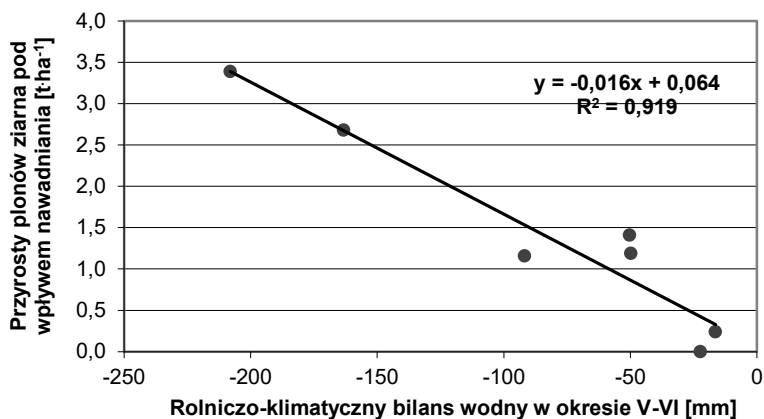
Ziemniak jadalny – Table potatoes

Kukurydza na ziarno – Corn for grain

Jęczmień browarny – Malting barley

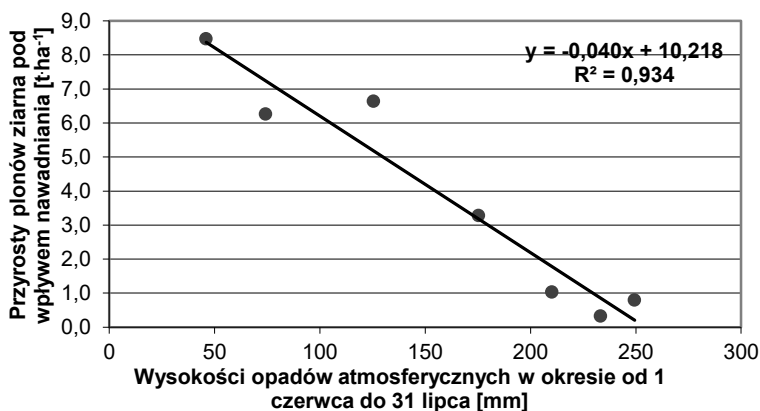
Bobik – Beans

Spośród wskaźników susz bardziej istotnie korelowały z wielkością efektów produkcyjnych wskaźniki klimatycznego lub rolniczoklimatycznego bilansu wodnego, w porównaniu ze wskaźnikami wyliczonymi tylko na bazie pomiarów wysokości opadów atmosferycznych. Przykładowo, efekty produkcyjne nawadniania jęczmienia jarego browarnego najlepiej zależały od wskaźnika rolniczoklimatycznego bilansu wodnego w okresie od 1 maja do 30 czerwca (rys. 1). Jednak w przypadku kukurydzy najwyższy współczynnik korelacji charakteryzował zależność przyrostów plonów suchej masy ziarna od sumy opadów atmosferycznych w okresie od 1 czerwca do 31 lipca danego roku (rys. 2).



Rys. 1. Zależność przyrostów plonów ziarna jęczmienia browarnego w $t \cdot ha^{-1}$ od wskaźnika rolniczo-klimatycznego bilansu wodnego w okresie od 1 maja do 30 czerwca w mm

Fig. 1. Relationship between the increase of malting barley grain yield [$t \cdot ha^{-1}$] and the agro-climatic water balance index in the period from 1 May to 30 June [mm]



Rys. 2. Zależność przyrostów plonów suchej masy ziarna kukurydzy w $t \cdot ha^{-1}$ od wysokości opadów atmosferycznych w okresie od 1 czerwca do 31 lipca w mm

Fig. 2. Relationship between the increase of dry matter content of corn grain yield [$t \cdot ha^{-1}$] and the rainfall in the period from 1 June to 31 July [mm]

3.3. Prognozowanie efektów nawadniania na podstawie wysokości opadów atmosferycznych

Omówione w podrozdziale 3.2. istotne zależności upoważniają do potraktowania wskaźników suszy meteorologicznej, jako bezpośrednich wyznaczników efektów produkcyjnych nawadniania roślin. Łatwość pomiaru i najlepsza dostępność danych wieloletnich, przemawia za przyjęciem wysokości opadów atmosferycznych (P) jako najlepszego wyznacznika przyrostów plonów możliwych do uzyskania dzięki zastosowaniu nawadniania. Warto także zwrócić uwagę, że współczynniki korelacji charakteryzujące zależność efektów nawadniania od wysokości opadów w okresach wzmożonych potrzeb wodnych testowanych upraw nie odbiegały zasadniczo od cechujących porównywane zależności, a w przypadku uprawy kukurydzy były nawet najwyższe.

W celu przekształcenia otrzymanych na podstawie badań równań regresji można zaproponować formułę prostoliniowej, odwrotnie proporcjonalnej zależności [14, 19] o ogólnej postaci:

$$Q = (P_{OPT} - P_{RZ}) \cdot k \quad (1)$$

gdzie:

Q – spodziewany przyrost plonu pod wpływem nawadniania w $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$,

k – przyrost plonu na 1 mm deficytu opadów atmosferycznych, uzupełnianego nawadnianiem w $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$,

P – suma opadów atmosferycznych optymalnych, to znaczy takich, przy których nie występują już zwwyżki plonów dzięki nawadnianiu (P_{OPT}) oraz rzeczywistych (P_{RZ}) w okresie wzmożonego zapotrzebowania danego gatunku na wodę w mm.

W odniesieniu do testowanych w ścisłych doświadczeniach polowych upraw zależności te przedstawiono w tabeli 4. Pozwalają one na interpolację wyników doświadczeń własnych na różne regiony kraju i uściślenie prognozowanych efektów nawadniania roślin w różnych strefach opadowych Polski, przy założeniu podobnych warunków glebowych. W strefie o opadach atmosferycznych niższych w okresach wzmożonych potrzeb wodnych roślin, obejmującej centralną Polskę, spodziewane przeciętne zwwyżki plonu będą największe, zaś na obszarach o opadach wyższych – odpowiednio mniejsze.

Tabela 4. Równania regresji i formuły prognozujące wielkość efektów nawadniania na podstawie wysokości opadów atmosferycznych w okresie wzmożonych potrzeb wodnych roślin

Table 4. Regression equations and formulas for forecasting the effects of irrigation based on the amount of rainfall during the period of increased water needs for plants

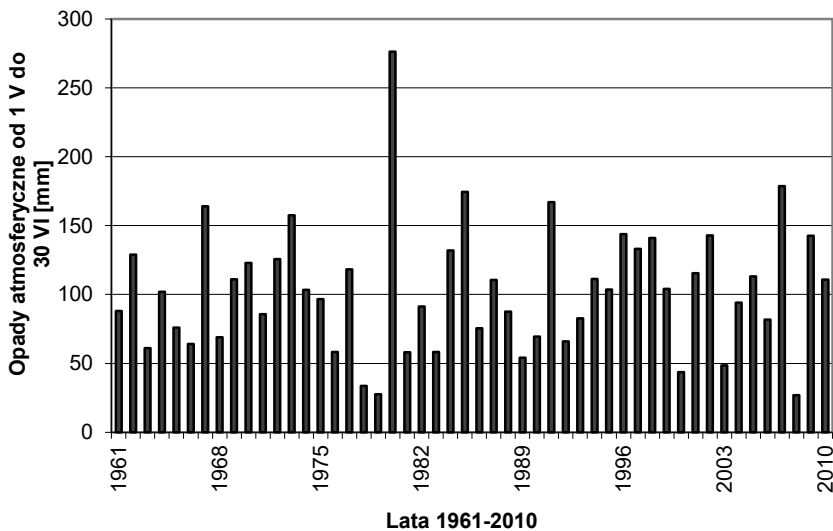
Roślina Plant	Równanie regresji Regression equation	Formuła prognozująca Formulas for forecasting
Ziemniak jadalny	$Y = -0,15x + 36,1$	$Q = (240 - P_{RZ}) \cdot 150$
Kukurydza na ziarno	$Y = -0,04x + 10,2$	$Q = (255 - P_{RZ}) \cdot 40$
Jęczmień browarny	$Y = -0,022x + 4,03$	$Q = (180 - P_{RZ}) \cdot 22$
Bobik	$Y = -0,013x + 3,13$	$Q = (240 - P_{RZ}) \cdot 13$

Objaśnienia – jak pod. Tab. 3; Explanations – see Table 3

Przekształcone równania regresji umożliwiają także określenie zmienności efektów produkcyjnych nawadniania w konkretnej miejscowości w poszczególnych sezonach wegetacyjnych (zmienność czasowa), wynikającej ze zmiennych warunków opadowych w okresach wzmożonych potrzeb wodnych kolejnych lat. Zmienność tych warunków w okresie wieloletnim 1961–2010 w punkcie pomiarowym Mochełek, reprezentatywnym dla rejonu Bydgoszczy zaprezentowano na rys. 3 (okres wzmożonych potrzeb wodnych jęczmienia jarego browarnego) oraz rys. 4 (okres wzmożonych potrzeb wodnych pozostałych upraw testowanych w badaniach z zastosowaniem nawadniania).

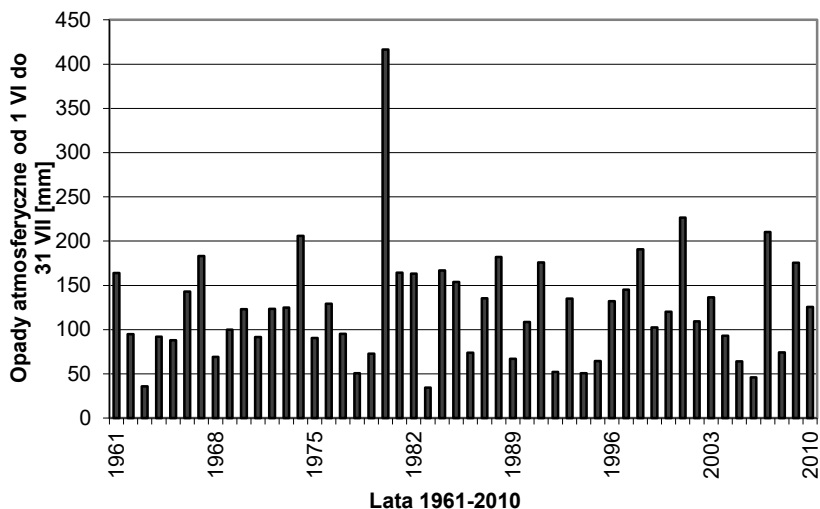
Analiza wysokości opadów atmosferycznych w miesiącach maj–czerwiec w latach 1961–2010 w rejonie Bydgoszczy (rys. 3) wykazała, że ich średnia wieloletnia suma wynosi 103 mm. Zatem średnie niedobory opadów w okresie wzmożonego zapotrzebowania jęczmienia na wodę kształtują się na poziomie 77 mm. Przyjęto, że niedobory opadów o wysokości nie przekraczającej jednej dawki nawodnieniowej (30 mm na glebie lekkiej o podłożu zwięzłym) nie skutkują potrzebą zastosowania nawadniania. Taka sytuacja dotyczyła tylko 6 spośród analizowanych 50 sezonów. W pozostałych latach występują potrzeby nawadniania, które sklasyfikowano jako małe (konieczność zastosowania 1–2 dawek nawodnieniowych), średnie (3–4 dawki nawodnieniowe) lub duże (więcej

niż 4 dawki nawodnieniowe). Stwierdzono, że duże potrzeby deszczowania jęczmienia, wymagające zastosowania co najmniej 5 dawek nawodnieniowych, występują w rejonie Bydgoszczy w 10% lat (tab. 5). Zastosowanie nawadniania prowadzi w tych latach do wzrostu plonów ziarna jęczmienia, wynoszącego co najmniej $2,95 \text{ t ha}^{-1}$. W kolejnych 46% lat występują średnie potrzeby nawadniania jęczmienia i prognozowane przyrosty plonu ziarna $1,65\text{--}2,95 \text{ t ha}^{-1}$. Są to efekty produkcyjne bardzo wysokie, jednak w aktualnych uwarunkowaniach ekonomicznych, wartość nawet tak wysokich efektów produkcyjnych nawadniania jęczmienia może nie zapewnić efektywności ekonomicznej tego zabiegu.



Rys. 3. Zmienność czasowa sum opadów atmosferycznych od 1 maja do 30 czerwca w rejonie Bydgoszczy w latach 1961–2010

Fig. 3. Temporal variability of rainfall totals from 1 May to 30 June in the region of Bydgoszcz in the years 1961–2010



Rys. 4. Zmienność czasowa sum opadów atmosferycznych od 1 czerwca do 31 lipca w rejonie Bydgoszczy w latach 1961–2010

Fig. 4. Temporal variability of rainfall totals from 1 June to 31 July in the region of Bydgoszcz in the years 1961–2010

Tabela 5. Prognoza potrzeb i efektów nawadniania jęczmienia browarnego w rejonie Bydgoszczy

Table 5. Forecast of needs and effects of irrigation for malting barley in the region of Bydgoszcz

Klasyfikacja potrzeb Water needs classification	Częstotliwość (% lat) Frequency (% of years)	Liczba jednorazowych dawek wody 30mm No. of single doses of 30mm	Prognozowany efekt produkcyjny nawadniania t ^{ha} ⁻¹ Effect of irrigation forecast t ^{ha} ⁻¹
Brak None	12	0	< 0,65
Małe Low	32	1–2	0,65–1,65
Średnie Mean	46	3–4	1,65–2,95
Duże High	10	> 4	> 2,95

Tabela 6. Prognoza potrzeb i efektów nawadniania ziemniaka jadalnego w rejonie Bydgoszczy

Table 6. Forecast of needs and effects of irrigation for table potatoes in the region of Bydgoszcz

Klasyfikacja potrzeb Water needs classification	Częstotliwość (% lat) Frequency (% of years)	Liczba jednorazowych dawek wody 30mm No. of single doses of 30mm	Prognozowany efekt produkcyjny nawadniania $t\ ha^{-1}$ Effect of irrigation forecast $t\ ha^{-1}$
Brak None	8	0	< 4,5
Małe Low	18	1–2	4,5–11,2
Średnie Mean	34	3–4	11,2–20,2
Duże High	40	> 4	> 20,2

W uprawie pozostałych omawianych upraw polowych o efektach produkcyjnych nawadniania decydowała suma opadów atmosferycznych w miesiącach czerwiec–lipiec. Wynosiła ona średnio w wieloleciu 1961–2010 124 mm i cechowała się bardzo dużą zmiennością czasową (rys. 4). Analizując potrzeby i efekty nawadniania roślin w tym okresie na przykładzie ziemniaka jadalnego (tab. 6) można stwierdzić, że duże potrzeby nawadniania tej rośliny występują w rejonie Bydgoszczy w 40% lat. Zastosowanie nawadniania w takich posusznych sezonach powoduje zwiększenie plonu bulw większą od $20,2\ t\ ha^{-1}$. Z kolei brak potrzeb nawadniania ziemniaka stwierdzono tylko w 8% lat.

Opracowanie zmienności efektów produkcyjnych nawadniania upraw polowych, wynikających ze zmienności warunków meteorologicznych, w tym zwłaszcza opadów atmosferycznych, stanowi dobrą podstawę analiz celowości stosowania tego zabiegu, zarówno pod względem kryteriów środowiskowych, jak i ekonomicznych.

4. Wnioski

Na podstawie wyników ścisłych doświadczeń polowych z nawadnianiem upraw polowych na glebie lekkiej w rejonie Bydgoszczy, prowadzonych w latach 2006–2012, oraz zależności tych wyników od parametrów meteorologicznych, można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Uzyskane w badaniach bezwzględne, względne i jednostkowe przeciętne efekty produkcyjne nawadniania wybranych upraw polowych

wskazują na duże możliwości powiększenia produktywności krajowego rolnictwa pod warunkiem optymalizacji czynnika wodnego. Nawadnianie przyczyniło się także do stabilizacji plonowania testowanych upraw.

2. W siedmioletnim okresie badawczym efekty produkcyjne nawadniania poszczególnych upraw cechowały się bardzo dużą zmiennością czasową w poszczególnych sezonach wegetacyjnych. Przeprowadzona analiza regresji wykazała, że we wszystkich przypadkach efekty te zależały istotnie, prostoliniowo i odwrotnie proporcjonalnie od wybranych wskaźników suszy atmosferycznej i glebowej. Najlepsze związki uzyskano uzależniając zwyczki plonów od wskaźników suszy w okresach dwumiesięcznych: maj–czerwiec (jęczmień jary) oraz czerwiec–lipiec (pozostałe uprawy).
3. Formuły prognostyczne, wyprowadzone na podstawie uzyskanych równań regresji, umożliwiły określenie zmienności efektów produkcyjnych nawadniania w rejonie Bydgoszczy w poszczególnych sezonach wegetacyjnych (zmienność czasowa) oraz pozwalają prognozować efekty nawadniania roślin w różnych strefach opadowych Polski (zmienność przestrzenna).
4. Opracowanie zmienności efektów produkcyjnych nawadniania upraw polowych, wynikających ze zmienności wskaźników suszy meteorologicznej i rolniczej w okresach wzmożonych potrzeb wodnych roślin powinno być wykorzystane do analiz celowości stosowania tego zabiegu, zarówno pod względem kryteriów środowiskowych, jak i ekonomicznych.

Literatura

1. **Drupka S.:** *Techniczna i rolnicza eksploatacja deszczowni*. PWRiL Warszawa, ss. 310 (1976).
2. **Dzięzyca J., Nowak L.:** *Deszczowanie*. Rozdział w pracy zbiorowej „Czynniki plonotwórcze – plonowanie roślin” pod red. J. Dzięzyca. PWN Warszawa-Wrocław, 329–352 (1993).
3. **Jankowiak J., Bieńkowski J.:** *Kształtowanie i wykorzystanie zasobów wodnych w rolnictwie*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich. Nr 5, 39–48 (2011).
4. **Jeznach J.:** *Aktualne trendy w rozwoju mikronawodnień*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich. Nr 6, 83–94 (2009).

5. **Kowalik P.:** *Agrohydrologia obliczeniowa*. Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, z. 33, ss. 207 (2010).
6. **Kuchar L., Iwański S.:** *Symulacja opadów atmosferycznych dla oceny potrzeb nawodnień roślin w perspektywie oczekiwanych zmian klimatycznych*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich. Nr 5, 7–18 (2011).
7. **Kuśmerek-Tomaszewska R., Żarski J., Dudek S.:** *Meteorological automated weather station data application for plant water requirements estimation*. Computers and Electronics in Agriculture, vol. 88, 44–51 (2012).
8. **Lipiński J.:** *Efekty produkcyjne i ekonomiczne nawadniania truskawek uprawianych na glebach lekkich*. Wiadomości Melioracyjne i Łąkarskie. Nr 4, 180–183 (2012).
9. **Łabędzki L.:** *Susze rolnicze. Zarys problematyki oraz metody monitorowania i klasyfikacji*. Wydawnictwo IMUZ Falenty, ss.107 (2006).
10. **Łabędzki L.:** *Przewidywane zmiany klimatyczne a rozwój nawodnień w Polsce*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich. Nr 3, 7–18 (2009).
11. **Ostrowski J., Łabędzki L.:** *Atlas niedoborów wodnych roślin uprawnych i użytków zielonych w Polsce*. Wydawnictwo IMUZ Falenty, 2008.
12. **Rolbiecki S., Żarski J., Grabarczyk S.:** *Yield-irrigation relationships for field vegetable crops grown in central Poland*. Acta Horticulturae, 537, 867–870 (2000).
13. **Rolbiecki S., Rolbiecki R., Rzekanowski C., Żarski J.:** *The influence of sprinkler irrigation on yields of some vegetable crops in the region of Bydgoszcz, Poland*. Acta Horticulturae, 537, 871–877 (2000).
14. **Rzekanowski C., Żarski J., Rolbiecki S.:** *Potrzeby, efekty i perspektywy nawadniania roślin na obszarach szczególnie deficytowych w wodę*. Postępy Nauk Rolniczych. Nr 1, 51–63 (2011).
15. **Stachowski P.:** *Celowość stosowania nawodnień deszczownianych w zagospodarowaniu rolniczym gruntów pogórnich*. Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection), 11, 1131–1142 (2009).
16. **Stachowski P., Markiewicz J.:** *Potrzeba nawodnień w centralnej Polsce na przykładzie powiatu kutnowskiego*. Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection), 13, 1453–1472 (2011).
17. **Treder W., Wójcik K., Tryngiel-Gać A., Krzewińska D., Klamkowski K.:** *Rozwój nawodnień roślin sadowniczych w świetle badań ankietowych*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich. Nr 5, 61–69 (2011).
18. **Żarski J., Rolbiecki S., Dudek S., Rolbiecki R., Rzekanowski C.:** *Potrzeby i efekty nawadniania roślin w rejonie Bydgoszczy*. Rozdział w monografii „*Bilanse wodne ekosystemów rolniczych*” pod red. M. Rojka, Wydawnictwo AR Wrocław, 187–203 (2004).

19. **Żarski J.:** *Potrzeby i efekty nawadniania zbóż*. Rozdział w pracy zbiorowej „*Nawadnianie roślin*” pod red. S. Karczmarczyka i L. Nowaka. PWRiL Poznań, 383–403 (2006).
20. **Żarski J.:** *Tendencje zmian klimatycznych wskaźników potrzeb nawadniania roślin w rejonie Bydgoszczy*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich. Nr 5, 29–37 (2011).

Forecasting Effects of Plants Irrigation Based on Selected Meteorological and Agricultural Drought Indices

Abstract

In Poland, irrigation of plants cultivated in field has been not developed yet on a larger scale mainly due to unfavorable economic conditions and infrastructure. An increase of irrigated area is still prospective, and is a major standby of agricultural production. Factors accelerating the development of irrigation next to providing higher and stable yields of good quality are a need for competitiveness and modernity in farms as well as the projected climate changes.

Main indicators of the purpose of irrigation are the effects of production; it means absolute increases in yields obtained under the influence of this treatment in agricultural production technology. Quantity and value of the effects of irrigation production can be analyzed in terms of the average (mean years) or in relation to a particular growing season. In the first case, the effects depend primarily on the criterion of the soil, and the secondly – on the meteorological conditions, particularly the amount and distribution of rainfall.

The cognitive aim of this study was finding a significant correlation between the amounts of the production effects under irrigation and selected indicators of meteorological and agricultural drought during periods of increased water needs for tested plants. The utility goal was to propose a forecast method of application of these results based on a temporal and spatial variability of these indicators.

The research was accomplished on the basis of long-term, field experiments with irrigation of following crops: table potatoes, malting barley, beans and corn harvested for grain. The experiments were conducted in the years 2006-2012 at the Research Station of University of Technology and Life Sciences in Mochełek, located nearby Bydgoszcz on Luvisols, grouped to the class IVa and very good rye complex of valuation on agricultural suitability. The tested crops were optimally irrigated in periods of agricultural droughts, and were guaranteed by moisture content in a layer of soil with a controlled water supply readily available to plants over the whole period of increased water needs.

In the seven-year research period the production effects of irrigation for the certain crops were characterized by very high temporal variability. For example, for malting barley the effects amounted to an average of 1.44 t ha^{-1} , varying from 0 (in the year 2009) to 3.39 t ha^{-1} . These effects authors subordinate to selected indicators of meteorological and agricultural droughts during periods of increased water needs for the studied crops: rainfall (P), standardized precipitation index (SPI), the relative rate of precipitation (RPI), climatic water balance (KBW) and agricultural-climatic water balance (RKBW). In all cases, authors obtained significant relationships between the compared data which lead to a determination of variability of production effects with irrigation in the region of Bydgoszcz in different growing seasons (temporal variability), and allowed to predict the effects of irrigation plants in a distinct Polish rainfall zones (spatial variability). Compilation of the variability of production effects of irrigation in field crops is the basis for the analysis of the purpose of the treatment, both in terms of environmental criteria, as well as economic.