

## PRACE ORYGINALNE

---

**Tomasz ROZBICKI**

Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW  
Zakład Meteorologii i Klimatologii  
Department of Hydraulic Engineering and Environmental Recultivation WAU  
Division of Meteorology and Climatology

### **Złożone zmienne niezależne w modelach pogoda – plon** **Complex independent variables in crop – weather modeling**

**Słowa kluczowe:** modele pogoda – plon, pszenica ozima, analiza regresji wielokrotnej  
**Key words:** crop – weather modeling, winter wheat, multiple regression analysis

#### **Wprowadzenie**

Zadaniem algorytmów obliczeniowych, zwanych modelami pogoda – plon, jest symulacja zachowania się rośliny pod wpływem zmieniających się z sezonu na sezon warunków meteorologicznych. Zastosowanie takich równań jest szerokie: bezpośrednie prognozowanie wysokości i jakości plonów, określanie wartości plonotwórczej elementów meteorologicznych, prognozowanie wysokości plonów o określonym prawdopodobieństwie, sporządzanie ogólnych map bonitacyjnych agroklimatu oraz map bonitacyjnych pod kątem przydatności klimatu dla określonych upraw.

Potrzeba opracowywania nowych modeli i udoskonalanie już istniejących jest uzasadniona. Rolnictwo światowe, europejskie, a także polskie musi

przystosować się do systematycznego zmniejszania arealu. Ten nieuchronny proces, polegający na wyłączaniu spod uprawy użytków rolnych, jest związany z urbanizacją, industrializacją i rozwojem komunikacji. Jednym ze składników ekonomicznej analizy szacowania związanych z tym strat jest prawidłowa ocena plonów. Drugim problemem, który pojawił się w ostatnich latach, a dotyczy rolnictwa, zwłaszcza na półkuli północnej, jest konieczność przystosowania się do długotrwałego trendu klimatycznego. Istnieje poza tym ryzyko coraz większego różnicowania się przebiegu pogody z roku na rok. W takich przypadkach prawidłowa ocena wysokości plonów jest niezbędna. Jest ona pierwszym etapem w poszukiwaniu takich rozwiązań, które przy znacznych wahaniami przebiegu pogody z sezonu na sezon minimalizują skutki przypadkowości zmian produkcji roślinnej. Problem ten wykracza poza samą sferę produkcji płodów rolnych, dotyczy bowiem całej gospodarki: racjonalizacji dystrybucji i magazynowania

żywności oraz racjonalizacji struktury cen.

W badaniach dotyczących atmosfery ziemskiej używane są tak zwane preprocesory meteorologiczne. Preprocesor meteorologiczny jest to zespół algorytmów obliczeniowych, służących do wyznaczania parametrów granicznej warstwy atmosfery oraz pionowych rozkładów wiatru i temperatury na podstawie danych pomiarowych z sieci stacji meteorologicznych i sondaży aerologicznych. Pozwala na pełniejsze wykorzystanie informacji meteorologicznej dostępnej ze stacji pomiarowych i usuwa niedostatki tradycyjnej metody opisu warunków meteorologicznych. Dzięki temu możliwe jest podwyższenie jakości obliczeń za pomocą modeli rozprzestrzeniania zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym czy też symulacji synoptycznych. W przypadku badania wpływu warunków pogodowych na rozwój i plonowanie roślin może być podobnie. Oprócz takich zmiennych, jak podstawowe elementy meteorologiczne: średnia okresowa temperatura powietrza, średnia temperatura ekstremalna, wysokość opadu atmosferycznego, średnia wartość wilgotności powietrza – elementów, które są obliczane na podstawie wyników codziennych pomiarów, do określenia związków pogoda – plon można wykorzystać również zmienne bardziej złożone. Algorytmy obliczeniowe takich zmiennych bazują na zależności rozwoju fizjologicznego roślin od warunków środowiskowych, między innymi warunków meteorologicznych. Podobnie jak w przypadku preprocesorów meteorologicznych można spodziewać się, że zastosowanie tak obliczonych zmiennych pozwoli na pełniejsze wykorzystanie in-

formacji meteorologicznych dostępnych ze stacji pomiarowych, usunie niedostatki tradycyjnej metody opisu warunków meteorologicznych i dzięki temu możliwe będzie podwyższenie jakości obliczeń oraz udoskonalenie modeli pogoda – plon.

Celem opracowania badań jest znalezienie związków między zmiennymi parametrami charakteryzującymi ilościowy i jakościowy rozwój roślin uprawnych (wysokość plonów, długość faz rozwojowych rośliny) a parametrami opisującymi zmienne warunki pogodowe (dane meteorologiczne), a następnie porównanie charakterystyk statystycznych równań zawierających jako zmienne niezależne proste elementy meteorologiczne z równaniami, które zawierają jako zmienne niezależne parametry złożone.

## **Material i metoda**

Do opracowania związków między wysokością plonu pszenicy ozimej a warunkami meteorologicznymi wykorzystano materiał pochodzący ze Stacji Doświadczalnej Oceny Odmian (COBORU) Sulejów z lat 1971–1990. Stacja ta położona jest w strefie klimatu wielkich dolin, a uprawa pszenicy ozimej prowadzona jest na glebie średniozwięzłej.

Jako zmienne niezależne w równaniach regresji wykorzystano dwa różne typy danych wejściowych. Pierwszą grupę stanowią podstawowe elementy meteorologiczne, takie jak: temperatura powietrza, temperatura ekstremalna, wysokość opadu atmosferycznego, niedosyt wilgotności powietrza, wilgotność względna, i tylko te elementy zostały użyte w analizie. W drugim przypadku

oprócz prostych elementów meteorologicznych jako zmienne niezależne wykorzystano nieliniowe modyfikacje tych elementów, takie jak kwadrat i pierwiastek kwadratowy. W trzecim przypadku w grupie zmiennych niezależnych znalazły się także zmienne obliczone na podstawie algorytmów służących do wyznaczania parametrów charakteryzujących oddziaływanie przebiegu pogody na rozwój roślin. Takimi parametrami są: suma temperatury efektywnej ( $ST$ ) wraz z jej nieliniowymi modyfikacjami (kwadrat –  $ST^2$ , pierwiastek –  $ST^{1/2}$ ), temperatura optymalna ( $STo$ ,  $STo^2$ ), różnica między wysokością opadów optymalnych a rzeczywistą sumą opadów atmosferycznych ( $Po$ ) wraz z jej nieliniowymi modyfikacjami ( $Po^2$ ,  $Po^{1/2}$ ), wskaźnik opadów uprzednich ( $I$ ) oraz wskaźnik opadów uprzednich, uwzględniający straty spowodowane parowaniem ( $Ie$ ).

Parametr określony jako suma temperatury efektywnej jest wygodnym wskaźnikiem ciepła, jaki otrzymuje roślina podczas okresu między kolejnymi fazami rozwojowymi. Danemu okresowi odpowiada stała suma średniej temperatury dobowej; sumę temperatury efektywnej ( $ST$ ) oblicza się ze wzoru:

$$ST = \sum (\bar{t}_i - tp) \quad (1)$$

W analizie wzięto również pod uwagę sumę kwadratów i pierwiastek kwadratowy temperatury efektywnej:

$$ST^2 = \sum (\bar{t}_i - tp)^2 \quad (2)$$

$$ST^{1/2} = \sum (\bar{t}_i - tp)^{1/2} \quad (3)$$

gdzie:

$t_i$  – średnia dobowa temperatura powietrza,

$tp$  – temperatura progowa w danym okresie międzyfazowym, przy czym:

$$\bar{t}_i - tp < 0 \Rightarrow \bar{t}_i - tp = 0$$

Innym wskaźnikiem odzwierciedlającym wpływ temperatury powietrza na rozwój roślin jest temperatura optymalna. U większości roślin uprawnych wartości temperatury optymalnej są bliskie naturalnemu cyklowi klimatycznemu i odchylenie od optimum powoduje straty w plonach zarówno przez nadmierne przyspieszenie lub opóźnienie wegetacji, jak i przez zakłócenia procesu asymilacji. Do analizy przyjęto parametr określony jako odchylenie średniej dobowej temperatury powietrza od temperatury optymalnej ( $STo$ ):

$$STo = \sum (\bar{t}_i - topt) \quad (4)$$

$$STo^2 = \sum (\bar{t}_i - topt)^2 \quad (5)$$

gdzie  $topt$  – temperatura optymalna dla danego okresu międzyfazowego.

W przypadku gdy okres międzyfazowy jest długi i wartości temperatury optymalnej są inne w fazie początkowej i końcowej, zmienność temperatury optymalnej można ustalić w formie funkcji  $F(t)$ :

$$Z = \sum [F_i(t) - t_i]^2 \quad (6)$$

$$Z = \frac{\sum [F_i(t) - t_i]^2}{l} \quad (7)$$

gdzie:

$F_i(t)$  – funkcja opisująca przebieg temperatury optymalnej w określonym okresie międzyfazowym,

$l$  – długość okresu międzyfazowego.

Według zasady van't Hoffa, sprawność funkcji życiowych rośliny podwaja się przy wzroście temperatury powietrza o każde  $10^\circ\text{C}$  (Radomski 1977). Zasada ta obowiązuje w przedziale temperatury  $0\text{--}35^\circ\text{C}$ . Można tę zasadę sformułować za pomocą zależności:

$$FH = 2^{\frac{t+5}{10}-1} \quad (8)$$

gdzie  $t$  – średnia dobową temperaturą powietrza.

Optymalne dla wysokości plonu ilości wody zmieniają się dość wyraźnie w trakcie wegetacji. Okresy, w których przedziały tolerancji zawężają się, nazywane są okresami krytycznymi. Pokrywają się one zazwyczaj ze wzmożonym wzrostem rośliny (u zbóż przed okresem kłoszenia). Różnica między opadem optymalnym a wysokością opadu w sposób oczywisty powinna wpływać na wysokość plonowania. Obliczono następujące wskaźniki opadu optymalnego:

$$Po = \sum (P_{opt} - P_i) \quad (9)$$

$$Po^2 = \sum (P_{opt} - P_i)^2 \quad (10)$$

$$Po^{1/2} = \sum (P_{opt} - P_i)^{1/2} \quad (11)$$

gdzie:

$P_o$  – wysokość opadu optymalnego,

$P_i$  – suma rzeczywistego opadu atmosferycznego.

Do zmiennych niezależnych należących do grupy danych o opadzie atmosferycznym trzeba jeszcze zaliczyć wskaźniki opadów uprzednich, obrazujące wilgotność gleby. Jednym ze sposobów jest zastąpienie wilgotności gleby wskaźnikiem opadów uprzednich, który jest funkcją sumy opadów, jakie wystąpiły w okresie do dnia poprzedzającego dzień, dla którego oblicza się wskaźnik. Można go ogólnie zdefiniować jako:

$$I = \sum a_i P_i \quad (12)$$

W niniejszym opracowaniu wprowadzono modyfikację wskaźnika wilgotności gleby, który jest uzależniony od meteorologicznego bilansu wodnego. W formule obliczeniowej zamiast wysokości opadu atmosferycznego pojawia się różnica między opadem a parowaniem:

$$Ie = \sum a_i (P_i - E_i) \quad (13)$$

gdzie:

$a_i$  – współczynnik wagowy zależny od wystąpienia czasu opadu,

$P_i$  – dobową sumą opadu atmosferycznego w  $i$ -tym dniu,

$E_i$  – wielkość parowania.

W celu uzyskania równania możliwie najlepiej opisującego związek między plonowaniem roślin a pogodą należy przebadać możliwie jak największą liczbę zmiennych niezależnych. Duża liczba elementów meteorologicznych, będących zmiennymi niezależnymi w równaniu, pozwala na pełniejszy obraz przebiegu pogody podczas wegetacji rośliny, a przez to na lepsze oszacowanie wysokości plonu. Z drugiej jednak strony ze względu na trudności związane z uzyskiwaniem informacji o zmien-

nych niezależnych, na skomplikowaną procedurę obliczeniową przygotowania danych wyjściowych i skorelowaniem zmiennych między sobą należy dokonać wyboru zmiennych najlepiej opisujących badane związki. Niestety nie ma uniwersalnej procedury statystycznej do opracowania tego wyboru i nieodzownym elementem takiej analizy musi być własny sąd oparty na ogólnej znajomości występujących prawidłowości badanego zjawiska. W pracy zostanie zastosowana metoda analizy regresji wielokrotnej. Ze względu na stosunkowo dużą liczbę zmiennych niezależnych poddanych analizie wyznaczenie ostatecznego modelu (równania), czyli takiego, które opisuje związek pogody z plonem po uwzględnieniu wszystkich faz fenologicznych, będzie wymagało przyjęcia następujących etapów obliczeń.

W pierwszej kolejności materiałem wyjściowym będą wszystkie rozpatrywane elementy meteorologiczne uwzględnione w każdej fazie rozwojowej. W wyniku obliczeń dla każdej ze stacji ustalone zostaną równania dla każdej z faz. Następnie obliczone zostanie równanie końcowe, to znaczy takie, które zawiera elementy meteorologiczne z całego okresu rozwojowego rośliny. Jako parametry wyjściowe równania będą wyselekcjonowane te elementy, które znalazły się wcześniej w modelach dla faz, oraz te, które miały najwyższe współczynniki korelacji cząstkowej ze zmienną zależną w kroku zerowym, a nie znalazły się w modelach.

## Wyniki

Wyniki analizy regresji, obejmującej wybór najlepszego równania opisującego wpływ warunków meteorologicznych na wysokość plonu pszenicy ozimej, przedstawiono w tabeli 1. W pierwszym przypadku, gdy zmiennymi niezależnymi były jedynie proste elementy meteorologiczne, uzyskano równanie zawierające następujące elementy: z okresu między wiosennym ruszeniem rośliny a strzelaniem w źdźbło średnia temperatura powietrza ( $t_2$ ), średnia minimalna temperatura powietrza przy gruncie ( $tn_2$ ) oraz średnia minimalna temperatura powietrza przy gruncie ( $tg_2$ ) i dodatkowo wskaźnik opadu ( $PZ_3$ ), obliczony jako suma opadu podzielona przez długość okresu, z okresu od strzelania w źdźbło do początku kłoszenia. W drugim przypadku, gdy zmiennymi niezależnymi pozostawały proste elementy meteorologiczne i ich nieliniowe modyfikacje, uzyskano równanie zawierające tylko parametry charakteryzujące opad atmosferyczny z okresu strzelanie w źdźbło – początek kłoszenia ( $P_3$ ,  $PZ_3$ ,  $ia_3$ ). W trzecim przypadku oprócz zmiennych charakteryzujących warunki opadowe równanie zawiera zmienne temperatury powietrza ( $t_2$ ,  $tg_2$  i  $tn_2$ ) i wskaźnik parowania ( $du_2^{1/2}$ ) z okresu od wiosennego ruszenia rośliny do strzelania w źdźbło.

W przypadku wszystkich trzech równań zmienne niezależne, które zawarte są w tych równaniach, odzwierciedlają silną zależność wysokości plonu od warun-

TABELA 1. Postać równania oraz charakterystyki statystyczne równań regresji wielokrotnej pogoda – plon uzyskanych dla stacji Sulejów

TABLE 1. Form of equations and statistics of multiple regression equations crop – weather for Sulejów

| Zmienne niezależne<br>Independent variables | Postać równania<br>Form of equation   | R <sup>2</sup> adj<br>[%] | SEE  |
|---|---|---------------------------|------|
| 1   | $Y = 7,34 - 1,498t_2 + 4,650tn_2 - 2,637tg_2 - 0,248PZ_3$   | 60,3                      | 0,71 |
| 2   | $Y = 32,005 + 1,456P_3 - 0,00571P_3^2 - 11,659P_3^{1/2} - 0,386PZ_3 + - 0,179ia_3$                            | 72,4                      | 0,59 |
| 3   | $Y = 50,2 - 1,579t_2 - 1,681tg_2 + 3,566tnd_2 - 0,227du_2^{1/2} + + 0,993P_3 - 0,00377P_3^2 - 8,719P_3^{1/2}$ | 74,4                      | 0,39 |

Objaśnienia / Explanations:

1 – równanie określone na podstawie elementów prostych / equation stated on the base of simple meteorological elements,

2 – równanie określone na podstawie elementów prostych i ich nieliniowych modyfikacji / equation stated on the base of simple meteorological elements and their nonlinear modifications,

3 – równanie określone na podstawie elementów prostych, ich nieliniowych modyfikacji oraz zmiennych złożonych / equation stated on the base of simple meteorological elements, their nonlinear modifications and complex variables,

R<sup>2</sup><sub>adj</sub> – adjustowany współczynnik determinacji równania regresji / squared correlation coefficient (adjusted),

SEE – błąd standardowy / standard error of estimation,

Y – wysokość plonu pszenicy ozimej / yield of winter wheat,

t<sub>2</sub> – średnia temperatura powietrza w okresie od wiosennego ruszenia wegetacji do strzelania w źdźbło / mean air temperature for the stage spring start of vegetation – shooting,

tn<sub>2</sub> – średnia minimalna temperatura powietrza w okresie od wiosennego ruszenia wegetacji do strzelania w źdźbło / mean minimum air temperature for the stage spring start of vegetation – shooting,

tg<sub>2</sub> – średnia minimalna temperatura powietrza przy gruncie w okresie od wiosennego ruszenia wegetacji do strzelania w źdźbło / mean minimum air temperature near the ground level for the stage spring start of vegetation – shooting,

PZ<sub>3</sub> – wskaźnik opadu (obliczony jako suma opadu podzielona przez długość okresu) w okresie od strzelania w źdźbło do początku kłoszenia / index of precipitation (precipitation divided by period duration) for the stage shooting – start of heading,

P<sub>3</sub> – suma opadu w okresie od strzelania w źdźbło do początku kłoszenia / precipitation in the stage shooting – start of heading,

ia<sub>3</sub> – średnia wartość wskaźnika wilgotności gleby w okresie od strzelania w źdźbło do początku kłoszenia / mean value of anterior precipitation index for the stage shooting – start of heading,

tnd<sub>2</sub> – suma różnic między temperaturą minimalną a temperaturą progową dla temperatury efektywnej w okresie od wiosennego ruszenia wegetacji do strzelania w źdźbło / sum of differences between minimum air temperature and threshold of effective temperature for the stage spring start of vegetation – shooting,

du<sub>2</sub><sup>1/2</sup> – wskaźnik parowania (obliczony jako iloczyn średniej dobowej wartości niedosytu wilgotności i pierwiastka kwadratowego średniej prędkości wiatru) w okresie od wiosennego ruszenia wegetacji do strzelania w źdźbło / index of evaporation (multiplication of vapor pressure deficit and wind velocity) for the stage spring start of vegetation – shooting.

ków opadowych podczas okresu między strzelaniem w źdźbło a początkiem kłoszenia. Takie postaci uzyskanych równań potwierdzają, że dla upraw zbożowych faza między strzelaniem w źdźbło a początkiem kłoszenia, pokrywająca się okresem intensywnego wzrostu roślin, jest okresem krytycznym w odniesieniu do opadu atmosferycznego.

W przypadku parametrów charakteryzujących warunki termiczne widać, że ważnym okresem dla rozwoju i wysokości plonu pszenicy ozimej jest okres wiosenne ruszenie wegetacji – strzelanie w źdźbło. Pokazuje to dość silny związek plonu z czynnikami termicznymi w tym okresie w równaniach określonych na podstawie prostych elementów meteorologicznych oraz na podstawie zmiennych złożonych.

## Podsumowanie

Analiza postaci uzyskanych równań regresji między wysokością plonu a elementami meteorologicznymi oraz analiza charakterystyk statystycznych tych równań pozwala na sformułowanie dwóch ogólnych wniosków.

Zastosowanie w analizie regresji jako zmiennych niezależnych nieliniowych modyfikacji elementów meteorologicznych pozwoliło na uzyskanie silniejszego związku i równania regresji lepiej opisującego zależność wysokość plonu – warunki meteorologiczne niż w przypadku równania zawierającego tylko elementy proste. Współczynnik determinacji równania wzrósł z 60,3 do 72,4%.

Zastosowanie złożonych zmiennych niezależnych określonych na podstawie algorytmów obliczeniowych, bazujących

na zależności rozwoju fizjologicznego roślin od warunków środowiskowych, między innymi warunków meteorologicznych, nieznacznie poprawiło charakterystyki statystyczne równania regresji w stosunku do równania ze zmiennymi – nieliniowymi modyfikacjami elementów meteorologicznych. Należy jednak zauważyć, że forma równania zawierającego zmienne złożone odzwierciedla pełniej wpływ warunków opadowych z okresu strzelanie w źdźbło – początek kłoszenia na wysokość plonu oraz wpływ warunków termicznych z okresu wiosenne ruszenie wegetacji – strzelanie w źdźbło.

## Literatura

- Agroekologiczne podstawy uprawy roślin, 1983 (red.) A. Listowski. PWN, Warszawa.
- DRAPPER N.R., SMITH H. 1973: Analiza regresji stosowana. PWN, Warszawa.
- MARKIEWICZ M.T. 2004: Podstawy modelowania rozprzestrzeniania zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- RADOMSKI Cz. 1977: Agrometeorologia. PWN, Warszawa.
- ROZBICKI T. 2005: Zastosowanie wskaźników opadowych jako parametrów w modelowaniu agrometeorologicznym. *Przegląd Naukowy Inż. i Kształt. Środ* 2(32): 102–110.

## Summary

**Complex independent variables in crop – weather modeling.** The relationships between the yield and meteorological elements have been stated by the use of multiple regression model selection. Winter wheat yield was taken as dependent variable and three groups of meteorological elements

were taken as independent variables. Simple meteorological elements belong to the first group of independent variables; their non-linear combinations (square, square root) belong to the second group. The third group has included complex elements they are functions basing on the relationships between plant growing and environmental conditions among others meteorological conditions. Stations Sulejów has been the source of long-term meteorological, phenological and winter wheat yield data. The station is situated in central part of Poland and winter wheat is grown on medium type of soil.

The regression equations including both simple meteorological elements, their non-linear combinations and complex variables achieves the best statistical characteristics than the equations including simple elements only.

**Author's address:**

Tomasz Rozbicki  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska  
Zakład Meteorologii i Klimatologii  
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa  
e-mail: tomasz\_rozbicki@sggw.pl