

DARIUSZ GOZDOWSKI¹
WIESŁAW MĄDRY¹
ZDZISŁAW WYSZYŃSKI²
MARIA KALINOWSKA-ZDUN²

¹Katedra Doświadczalnictwa i Bioinformatyki, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

²Katedra Agronomii, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Charakterystyka i empiryczne porównanie prostej oraz złożonej analizy ścieżek w ocenie determinacji plonu roślin przez ich cechy plonotwórcze Część II. Przykład z jęczmieniem jarym

Characteristics and empirical comparison of simple and complex path analysis in grain yield determination by yield - related traits Part II. Example on spring barley

Ocena determinacji plonu roślin zbóż jest ważna przy określaniu, które cechy plonotwórcze wpływają na zmienność plonu ziarna i jakie kryteria powinny być uwzględniane w procesie hodowli wysokoplonujących genotypów. W pracy przedstawiono analizę determinacji plonu ziarna jęczmienia jarego przez wybrane cechy plonotwórcze. Analizy wykonano stosując dwa podejścia tj. ścieżki proste, gdzie zakładamy, że wszystkie cechy bezpośrednio wpływają na plon oraz ścieżki złożone, gdzie cechy plonotwórcze zostały podzielone na cechy pierwszego rzędu (bezpośrednio wpływające na plon) i cechy drugiego rzędu. Uzyskane wyniki wykazały, że podejście wykorzystujące prosty model przyczynowo-skutkowy nie powinno być stosowane w przypadku wzajemnego skorelowania cech plonotwórczych kształtujących się na różnych etapach rozwojowych rośliny. W podejściu wykorzystującym ścieżki proste nie wykazano wpływu krzewienia produktywnego i liczby roślin po wschodach, które to cechy niewątpliwie wpływają na wielkość plonu ziarna. Podejście wykorzystujące ścieżki złożone w analizowanym przykładzie okazało się lepsze, ze względu na uwzględnienie ontogenetycznej kolejności kształtowania się poszczególnych cech plonotwórczych.

Słowa kluczowe: analiza ścieżek, cechy plonotwórcze, składowe plonu

Evaluation of determination of cereals yield is important for determining, which yield-related traits influence yield variability, and what criteria should be taken in breeding of high-yielding genotypes. This paper shows the determination of spring barley yield by some yield-related traits. The analyses were conducted using two approaches: simple paths, in which we assume that all traits have direct effects on grain yield, and complex paths, where yield-related traits were divided into primary yield-

related traits (which have direct influence on yield) and secondary yield-related traits. The obtained results proved that the approach with simple casual model should not be used when yield-related traits formed at different developmental stages are correlated. Using the simple path analysis the effects of tillering and of a number of plants were not proved, although these traits certainly have significant influence on yield variability. The approach with complex paths appeared to be more useful as it relates to the ontogenetic sequence of forming of particular yield-related traits.

Key words: path analysis, yield-related traits, yield components

WSTĘP

Prawidłowa ocena determinacji plonu przez wiele cech plonotwórczych kształtujących się na różnych etapach ontogenezy z użyciem analizy ścieżek często nie jest łatwa przede wszystkim ze względu na trudności wynikające z doboru właściwego modelu przyczynowo-skutkowego (Dofing i Knight, 1992; Samonte i in., 1998; Sinebo, 2002; Kozak i Mądry, 2006). Różne podejścia stosowane w takich analizach zostały opisane w pierwszej części pracy (Gozdowski i Mądry, 2008). Ze względu na rodzaj modelu przyczynowo-skutkowego można wyróżnić analizę ścieżek prostą, w której oceniamy jednoczesny wpływ wielu cech plonotwórczych na plon oraz analizę ścieżek złożoną, w której cechy plonotwórcze dzielimy ze względu na etap ontogenezy, w którym się kształtują a następnie tworzymy model, w którym poszczególne grupy cech są traktowane jako cechy plonotwórcze pierwszego rzędu, drugiego rzędu i ewentualnie dalszych rzędów. Takie podejście wydaje się słuszne ze względu na branie pod uwagę biologicznych i fizjologicznych podstaw plonowania. Często jednak ustalenie etapu ontogenezy na którym kształtuje się dana cecha nie jest łatwe, wynika to z równoczesnego kształtowania się wielu cech w dłuższym okresie rozwoju rośliny (Klepper i in., 1998, Slafer, 2003). W takim wypadku konieczne jest arbitralne przyjęcie fazy rozwojowej rośliny, w której kształtuje się dana cecha na bazie dostępnej wiedzy o wzroście i rozwoju danego gatunku. Z tego względu, że wielu badaczy prezentuje do podobnych problemów różne podejścia, to opracowywane modele przyczynowo-skutkowe uwzględniające podobne cechy często znacznie się różnią między sobą. Wraz z zwiększaniem liczby badanych cech następuje coraz większe skomplikowanie przyjmowanych modeli, które dodatkowo mogą być modyfikowane w czasie wykonywanych analiz, np. cechy o znikomym wpływie bezpośrednim i pośrednim na plon mogą być usuwane z modelu (Samonte i in., 1998; Sinebo, 2002; Moragues i in., 2006). Należy również pamiętać o eliminacji z modelu cech plonotwórczych wzajemnie bardzo silnie skorelowanych lub też, jeśli występuje takie merytoryczne uzasadnienie, przyporządkowanie ich różnych rzędów poziomów) cech plonotwórczych.

Celem niniejszej pracy jest porównanie dwóch podejść do analizy ścieżek w determinacji plonu na przykładzie z jęczmieniem jarym. Prezentowane są prosta i złożona analiza ścieżek oraz różnice wynikające z każdego z podejść.

MATERIAŁ I METODY

Dane doświadczalne pochodzą z doświadczenia z jęczmieniem jarym odm. Rasbet z 4 lat (1999–2002) przeprowadzonego w RZD SGGW Chylice.

W każdym roku liczba jednostek obserwacyjnych wynosiła 16 (4 poziomy nawożenia N – 0, 30, 60 i 90 kg/ha \times 4 powtórzenia). Łączna liczba jednostek obserwacyjnych w badaniach z 4 lat wynosiła $n = 64$. Każde z poletek miało powierzchnię 30 m².

Na różnych etapach ontogenezy oceniano poszczególne cechy plonotwórcze:

X_1 — Liczba roślin po wschodach na jednostce powierzchni (szt./m²)

X_2 — Krzewienie produktywne

X_3 — Liczba kłosów w czasie zbioru (szt./m²)

X_4 — Średnia masa pojedynczego ziarniaka (na podstawie MTZ) (w mg)

X_5 — Średnia liczba ziaren w kłosie (szt.)

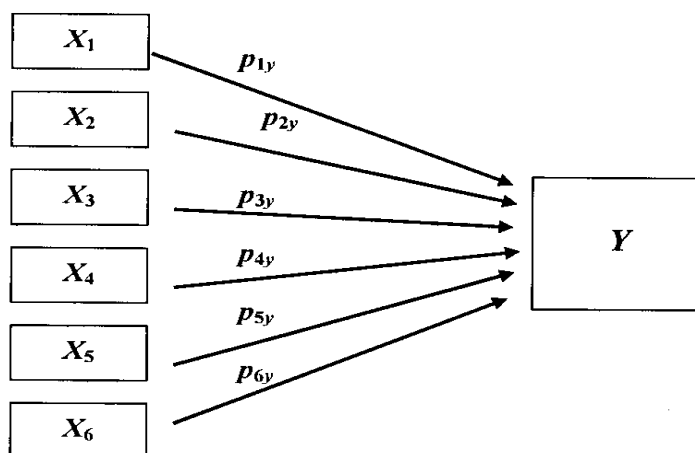
X_6 — Masa ziarna z kłosa (g).

W czasie zbioru oceniono plon ziarna (Y) z poletki i przeliczono na plon w t/ha.

Cechy X_1 , X_3 , X_4 i Y oceniane były bezpośrednio, natomiast pozostałe zostały wyliczone pośrednio na podstawie wartości tych cech. Liczbę roślin po wschodach oceniono na 9 mb rzędów wybranych w trzech częściach poletki. Liczbę kłosów oceniono na podstawie próby z roślin zebranych z 1 m² z środkowej części poletki w czasie zbioru, a MTZ oceniono na 1000 ziarniakach wybranych z tej próby.

Dane doświadczalne poddano analizie statystycznej z wykorzystaniem analizy ścieżek (Wright, 1921). Przyjęto dwa różne modele przyczynowo-skutkowe:

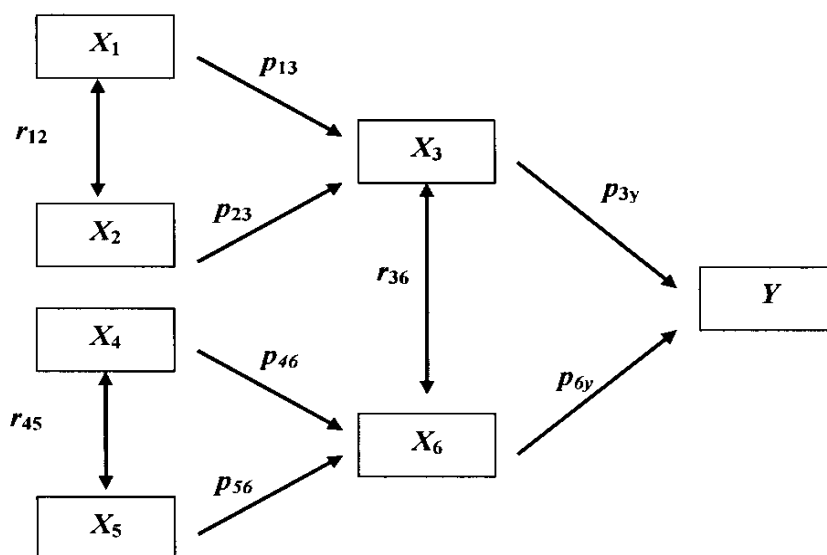
— prosty model (rys. 1) w którym wszystkie cechy plonotwórcze jednocześnie wpływają na plon ziarna.



p_{iy} — współczynniki ścieżek, path coefficients

Rys. 1. Diagram przedstawiający model przyczynowo-skutkowy przyjęty do prostej analizy ścieżek
Fig. 1. Cause and effect relationship diagram for simple path analysis

— model złożony (rys. 2) w którym cechy plonotwórcze zostały podzielone na dwie grupy tj. cechy plonotwórcze pierwszego rzędu (wpływające bezpośrednio na plon) oraz cechy plonotwórcze drugiego rzędu (kształtujące się na wcześniejszych etapach ontogenezy).



p_{ij} ; p_{ij} — współczynniki ścieżek, path coefficients
 r_{ij} — współczynniki korelacji prostej, simple correlation coefficients
 X_3, X_6 — cechy plonotwórcze I rzędu, primary yield – related traits
 X_1, X_2, X_4, X_5 — cechy plonotwórcze II rzędu, secondary yield - related traits

Rys. 2. Diagram przedstawiający model przyczynowo-skutkowy przyjęty do złożonej analizy ścieżek
Fig. 2. Cause and effect relationship diagram for complex path analysis

Należy dodać, że przyjęty model zależności przyczynowo-skutkowych nie jest jedynym możliwym modelem i istnieje więcej możliwości konstruowania modeli z wykorzystaniem tych cech. Podstawowym kryterium przy budowie modelu zależności przyczynowo-skutkowych było jasne przedstawienie różnic między tymi dwoma podejściami oraz jednocześnie uwzględnienie kolejności kształtowania się poszczególnych cech plonotwórczych. Celem niniejszej pracy nie było konstruowanie możliwie najlepszego modelu przyczynowo-skutkowego, dlatego też może się okazać, że inny model dla tych samych danych doświadczalnych lepiej oddawałby rzeczywiste zależności plonu od badanych cech plonotwórczych.

WYNIKI BADAŃ

Dane przedstawione w tabeli 1 wskazują na stosunkowo niewielką zmienność badanych cech. Spośród nich największą zmiennością charakteryzowały się krzewienie produktywne

(CV=22,0%) oraz liczba kłosów w czasie zbioru (CV=22,1%), natomiast cechami o najmniejszej zmienności były średnia masa pojedynczego ziarniaka (CV=10,3%) oraz masa ziarna z kłosa.

Tabela 1

Średnie i parametry charakteryzujące zmienność badanych cech
Mean values and parameters of examined traits variability

	Średnia Mean	Min.	Max.	Odchylenie standardowe Standard deviation	Współczynnik zmienności (%) Coefficient of variability
Liczba roślin po wschodach (szt./m ²) (X_1) Number of plants per m ² after emergence	321	210	457	61	18,9
Krzewienie produktywne (X_2) Tillering index	1,86	1,00	2,93	0,41	22,0
Liczba kłosów w czasie zbioru (szt./m ²) (X_3) Number of spikes per m ² during harvest	586	359	868	129	22,1
Średnia masa pojedynczego ziarniaka (mg) (X_4) Weight of individual kernel	42,44	29,35	48,78	4,35	10,3
Średnia liczba ziaren w kłosie (X_5) Average number of grains per spike	17,9	12,9	24,7	2,51	14,0
Masa ziarna z kłosa (g) (X_6) Weight of grains per spike	0,754	0,495	0,899	0,090	12,0
Plon ziarna (t/ha) (Y) Grain yield	4,33	2,42	5,73	0,66	15,2

Wartości współczynników korelacji wskazują na umiarkowanie silne współzależności między liczbą kłosów w czasie zbioru a krzewieniem produktywnym oraz masą ziarna z kłosa a masą pojedynczego ziarniaka i liczbą ziaren w kłosie (dodatnie współzależności), jak również między masą ziarna z kłosa a liczbą kłosów w czasie zbioru i masą ziarna z kłosa a krzewieniem produktywnym (ujemne współzależności). Nie stwierdzono jednak bardzo silnych współzależności między badanymi cechami, co uzasadnia włączenie wszystkich ocenianych cech do modeli analiz ścieżek. Na uwagę zasługuje również to, że między prawie wszystkimi cechami występują istotne współzależności, zatem uzasadnione jest zastosowanie wielowymiarowej metody (np. analizy ścieżek) w ocenie determinacji plonu.

Wartości współczynników ścieżek w przypadku ścieżek prostych, w których oceniono jednoczesny wpływ wszystkich badanych cech plonotwórczych na plon wskazują na zdecydowanie najsilniejszy wpływ liczby kłosów na plon ziarna (wsp. ścieżki 1,42). Wpływ pozostałych cech był zdecydowanie mniejszy, przy czym w podobnym stopniu plon determinowały masa ziarna z kłosa i średnia masa ziarniaka (współczynniki ścieżek odpowiednio 0,49 i 0,42), nieco mniejszy wpływ miała liczba ziaren w kłosie (0,29). Brak istotnego wpływu (współczynniki ścieżek bliskie wartości 0) stwierdzono dla liczby roślin po wschodach oraz krzewienia produktywnego. Było to spowodowane wzajemnym

skorelowaniem z innymi cechami plonotwórczymi, a zwłaszcza z liczbą kłosów w czasie zbioru.

Tabela 2

Macierz współczynników korelacji prostej między badanymi cechami
Matrix of correlation coefficients between examined traits

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆
Krzewienie produktywne (X ₂) Tillering index	-0,42*					
Liczba kłosów w czasie zbioru (szt./m ²) (X ₃) Number of spikes per m ² during harvest	0,39*	0,66*				
Średnia masa pojedynczego ziarniaka (mg) (X ₄) Weight of individual kernel	-0,43*	-0,22	-0,55*			
Średnia liczba ziaren w kłosie (X ₅) Average number of grains per spike	0,27*	-0,39*	-0,21	-0,55*		
Masa ziarna z kłosa (g) (X ₆) Weight of grains per spike	-0,10	-0,63*	-0,74*	0,26*	0,65*	
Plon ziarna (t/ha) (Y) Grain yield	0,50*	0,38*	0,79*	-0,58*	0,29*	-0,19

*- Współzależność istotna przy $\alpha=0,05$, Correlation significant at $\alpha=0,05$

Tabela 3

Współczynniki ścieżek i współczynniki korelacji z plonem
Path coefficients and correlation coefficients with grain yield

Cecha plonotwórcza Yield - related trait	współczynniki ścieżek (efekty bezpośrednie) path coefficients (direct effects)		współczynniki korelacji z plonem ziarna (efekt całkowity) correlation coefficients with grain yield (total effect)(r _{iy})
	ścieżki złożone complex paths	ścieżki proste simple paths	
Liczba roślin po wschodach (X ₁) Number of plants after emergence	$p_{13} \times p_{3y} = 0,81 \times 1,43 = 1,16^{**}$	$p_{1y} = 0,002$	0,50**
Krzewienie produktywne (X ₂) Tillering index	$p_{23} \times p_{3y} = 0,99 \times 1,43 = 1,42^{**}$	$p_{2y} = -0,02$	0,38**
Liczba kłosów w czasie zbioru (X ₃) Number of spikes during harvest	$p_{3y} = 1,43^{**}$	$p_{3y} = 1,42^{**}$	0,79**
Średnia masa pojedynczego ziarniaka (X ₄) Weight of individual kernel	$p_{46} \times p_{6y} = 1,14 \times 0,87 = 0,99^{**}$	$p_{4y} = 0,42^{**}$	-0,58**
Średnia liczba ziaren w kłosie (X ₅) Average number of grains per spike	$p_{56} \times p_{6y} = 0,77^{**}$	$p_{5y} = 0,29^*$	0,29*
Masa ziarna z kłosa (g) (X ₆) Weight of grains per spike	$p_{6y} = 0,87^{**}$	$p_{6y} = 0,49^{**}$	-0,19

** - Współzależność istotna przy $\alpha = 0,01$, Relationship significant at $\alpha = 0,01$

W przypadku analizy ścieżek, w których wykorzystano ścieżki złożone, efekty bezpośrednie na plon wyrażone przez współczynniki ścieżek były dla wielu cech zupełnie inne niż w podejściu z ścieżkami prostymi. Wynikało to z wydzielenia cech plonotwórczych pierwszego rzędu i cech plonotwórczych drugiego rzędu, które są wzajemnie skorelowane. Przeprowadzone analizy przy przyjęciu złożonego modelu analizy ścieżek

wykazały podobnie jak w przypadku ścieżek prostych najsilniejszy wpływ liczby kłosów na plon (wsp. ścieżki 1,43). Nieco tylko mniejszy wpływ stwierdzono dla krzewienia produktywnego (wsp. ścieżki 1,42), wszystkie pozostałe cechy również silnie determinowały zmienność plonu, przy czym względnie słabszy wpływ stwierdzono dla masy ziarna z kłosa i liczby ziaren w kłosie (wsp. ścieżek odpowiednio 0,87 i 0,77). Wszystkie badane cechy miały dodatni wpływ na plon. Porównując wartości współczynników ścieżek dla ścieżek prostych i złożonych możemy stwierdzić, że największe różnice występowały w ocenie wpływu liczby roślin po wschodach i krzewienia produktywnego. Stosując podejście z wykorzystaniem ścieżek złożonych możemy stwierdzić bardzo duży wpływ tych dwóch cech plonotwórczych podczas gdy w podejściu z ścieżkami prostymi nie stwierdzono determinacji plonu przez te cechy.

DYSKUSJA

Przeprowadzone analizy z zastosowaniem dwóch odmiennych podejść do analizy ścieżek tj. ścieżek prostych i złożonych pozwalają na porównanie tych dwóch metod, jak również ich ocenę. Uzyskane wyniki ujawniają główną wadę prostych modeli analizy ścieżek, którą jest brak możliwości oceny wpływu cech wzajemnie silnie skorelowanych i kształtujących się na kolejnych etapach ontogenezy. Wykonane analizy z wykorzystaniem ścieżek prostych nie pozwoliły na udowodnienie wpływu liczby roślin po wschodach i krzewienia produktywnego, co było możliwe stosując ścieżki złożone. Analizowany przykład bardzo wyraźnie przedstawia zalety stosowania ścieżek złożonych, a to między innymi z powodu włączenia cech plonotwórczych multiplikatywnych. Obecnie obydwa podejścia, tj. z wykorzystaniem ścieżek prostych (Seker i Serin, 2004; Wu i in., 2006) i złożonych są nadal powszechnie stosowane. Wzrasta jednak liczba badań, w których wykorzystuje się złożone modele przyczynowo-skutkowe dla wyjaśnienia determinacji plonu przez różne cechy plonotwórcze (Sinebo, 2002; Board i in., 2003; Garcia del Moral i in., 2005). Podstawową zaletą takiego podejścia jest uwzględnienie wszystkich cech plonotwórczych z uwzględnieniem etapu rozwoju rośliny, w którym się kształtują. Jednocześnie taka metoda analizy pozwala na udowodnienie wpływu wielu cech plonotwórczych, wzajemnie silnie skorelowanych, które kształtują się sekwencyjnie w kolejnych fazach rozwojowych rośliny a których wpływ na zmienność plonu przy podejściu wykorzystującym prostą analizę ścieżek nie byłby udowodniony.

WNIOSKI

1. Analiza ścieżek w ocenie determinacji plonu roślin uprawnych jest metodą pozwalającą stwierdzić, które z plonotwórczych cech roślin najsilniej wpływają na zmienność plonu. Te informacje pozwalają określić bardziej efektywne kryteria selekcyjne w hodowli wartościowych genotypów.
2. Przyjęcie właściwego modelu, zwłaszcza w modelach złożonych, oraz prawidłowa interpretacja wyników badań nad determinacją plonu przez cechy plonotwórcze powinna opierać się na znajomości biologicznych podstaw plonowania badanego

gatunku, w szczególności ważna jest kolejność kształtowania się plonotwórczych cech roślin i wzajemne związki między nimi.

3. Od doboru właściwego modelu przyczynowo-skutkowego analizy ścieżek zależą uzyskane wyniki oraz wnioski wysunięte na ich podstawie. Konsekwencje przyjęcia nieadekwatnego modelu analizy ścieżek w badaniach są szczególnie niekorzystne w przypadku występowania silnych współzależności między zmiennymi objaśniającymi.

LITERATURA

- Board J., Kang, M. S., Bodrero M. L. 2003. Yield components as indirect selection criteria for late-planted soybean cultivars. *Agron. J.* 95: 420 — 429.
- Dofing M., Knight W. 1992. Alternative model for path analysis of small-grain yield. *Crop Sci.* 32: 487 — 489.
- Garcia del Moral L., Rharrabti Y., Elhani S., Martos V., Royo C. 2005. Yield formation in Mediterranean durum wheat's under two contrasting water regimes based on path-coefficient analysis. *Euphytica* 146: 203 — 212.
- Gozdowski D., Mądry W. 2008. Charakterystyka i empiryczne porównanie prostej oraz złożonej analizy ścieżek w ocenie determinacji plonu roślin przez ich cechy plonotwórcze. Cz. I Prezentacja stosowanych metod. *Biul. IHAR (złożone)*
- Klepper B., Rickman R., Waldman S., Chevalier, P. 1998. The physiological life cycle of wheat: Its use in breeding and crop management. *Euphytica* 100: 341 — 347.
- Kozak M., Mądry W. 2006. Note on yield component analysis. *Cereal Research Communications* 34 (2-3): 933 — 940.
- Moragues M., Garcia del Moral L., Moralejo M., Royo C. 2006. Yield formation strategies of durum wheat landraces with distinct pattern of dispersal within the Mediterranean basin I: Yield components. *Field Crops Res.* 95: 194 — 205.
- Samonte S., Wilson L., McClung A. 1998. Path analyses of yield and yield-related traits of fifteen diverse rice genotypes. *Crop Sci.*, 38: 1130 — 1136.
- Seker H., Serin Y. 2004. Explanation of relationship between seed yield and some morphological traits in smooth brome grass (*Bromus inermis* Leys.) by path analysis. *European Journal of Agronomy* 21: 1 — 6
- Sinebo W. 2002. Yield relationships of barleys grown in a tropical highland environment. *Crop Sci.* 42: 428 — 437.
- Slafer G. 2003: Genetic basis of yield as viewed from a crop physiologist's perspective. *Ann. Appl. Biol.* , 142: 117 — 128.
- Wright S. 1921. Correlation and causation. *J. Agric. Res.*, 20: 557 — 585.
- Wu Y., Taliaferro C., Martin D., Goad C., Anderson J. 2006. Genetic variability and relationships for seed yield and its components in Chinese *Cynodon* accessions. *Field Crops Research* 98: 245 — 252.