

STANISŁAW DROZDOWSKI

Wykorzystanie modelu macierzowego do prognozowania rozwoju drzewostanów o złożonej postaci

Application of a matrix model for projecting the development of stands with complex structure

ABSTRACT

Drozdowski S. 2006. Wykorzystanie modelu macierzowego do prognozowania rozwoju drzewostanów o złożonej postaci. Sylwan 2: 3-13.

In this study, the principles of building, parameterisation and validation of matrix models of stands are presented. Three basic processes occurring in stand development such as regeneration, growth and dieback of trees are discussed. The study points out to the potential advantages and directions of application of stand matrix models in solving silvicultural problems.

KEY WORDS

forest modelling, linear and non-linear programming, stand with complex structure, silvicultural planning

ADDRESSES

Stanisław Drozdowski – Katedra Hodowli Lasu SGGW;
ul. Nowoursynowska 159 bud. 34; 02-776 Warszawa; e-mail: drozdowski@delta.sggw.waw.pl

Wstęp

Decydującą rolę w rozwoju polskiego leśnictwa odgrywa obecnie kierunek trwale zrównoważonej gospodarki leśnej, uwzględniającej nie tylko konieczność zachowania walorów produkcyjnych drzewostanów, ale także, w jak najszerszym zakresie, pozaprodukcyjne (ochronne i społeczne) funkcje lasów [Rykowski 1994]. Promowane są w pierwszym rzędzie takie sposoby zagospodarowania lasu i metody hodowlane, które pozwalają na kształtowanie zróżnicowanej, pod względem gatunkowym, genetycznym, wiekowym i przestrzennym, struktury drzewostanu (Zarządzenie nr 11 [1995] i 11a [1999] DGLP). Złożoność postaci takich drzewostanów znacznie komplikuje proces podejmowania decyzji gospodarczych oraz planowanie hodowlane, szczególnie wtedy, gdy poszukuje się kompromisu pomiędzy różnymi funkcjami lasu. Rodzi to zapotrzebowanie na efektywne narzędzia z zakresu planowania, prognozowania i regulacji użytkowania w takich drzewostanach [Poznański 1999, Poznański, Jaworski 2000].

Rolę takich narzędzi mogą pełnić, między innymi, matematyczne modele lasu. W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat powstało na świecie bardzo dużo matematycznych modeli i programów symulacyjnych, obejmujących różne aspekty gospodarowania zasobami naturalnymi, w tym również zasobami leśnymi [Brzeziecki 2002]. Również w Polsce powstało i nadal powstaje wiele modeli i programów komputerowych związanych z gospodarką leśną. Od przeszło dwudziestu lat realizowany jest program badań zmierzających do zbudowania empirycznych modeli wzrostu dla ważniejszych gatunków drzew leśnych [Bruchwald 1979]. Dotychczas zbudowano modele wzrostu dla sosny [Bruchwald 1985, 1991], świerka [Bruchwald 1999], jodły [Zasada 1999], dębu szypułkowego [Bruchwald i in. 1996], buka [Bruchwald i in. 1998] oraz brzozy

[Bruchwald i in. 2001]. Wymienione tutaj modele wzrostu reprezentują klasę tzw. stochastycznych modeli drzewa indywidualnego. Wykorzystuje się je do prognozowania rozwoju drzewostanów, zarówno litych jak i mieszanych.

Obecnie prowadzone są prace nad budową modeli empirycznych służących do analizowania i naśladowania rozwoju wielogatunkowych, wielogeneracyjnych drzewostanów o złożonej budowie, zagospodarowanych sposobem przerębowym i przerębowo-zrębowym. W leśnictwie wielu krajów wykorzystuje się w tym celu często tzw. macierzowe modele rozwoju drzewostanu. W ciągu ostatnich lat powstało wiele takich modeli, np. w USA modele SouthPro [Schulte, Buongiorno 1998] oraz NorthPro [Kolbe i in. 1999], umożliwiające symulację rozwoju różnych typów lasów mieszanych, występujących w wybranych regionach Ameryki Północnej, przy założeniu różnych scenariuszy ich zagospodarowania. Podobne modele zostały także skonstruowane dla europejskich wielogeneracyjnych lasów mieszanych, występujących w Jurze Francuskiej [Buongiorno i in. 1995] oraz w Dolomitach Włoskich [Volin, Buongiorno 1996; Virgilietti, Buongiorno 1997]. Również w Polsce zbudowano macierzowy model rozwoju drzewostanu [Drozdowski 2002] naśladowujący wzrost drzew w drzewostanie o złożonej postaci w warunkach przyrodniczo-leśnych Puszczy Białowieskiej. Model ten pozwala analizować wybrane scenariusze zagospodarowania lasu (uwzględniając nowoczesne metody regulacji użytkowania) i ich wpływ na produkcyjne i ekologiczne aspekty działalności ludzkiej w lesie.

Celem prezentowanego opracowania jest przedstawienie macierzowego modelu drzewostanu jako narzędzia wspierającego podejmowanie decyzji z zakresu prognozowania, planowania i regulacji w lesie o złożonej postaci.

Konstrukcja macierzowego modelu drzewostanu

PODSTAWOWE PROCESY ZAWARTE W MODELU. Model uwzględnia trzy podstawowe procesy zachodzące w drzewostanach o złożonej postaci: odnowienie, wzrost i zamieranie drzew. Procesy te są modelowane za pomocą równań regresji wieloczynnikowej. Liczbowe parametry równań (wzrost i zamieranie) określa się, w przeciwieństwie do klasycznych równań regresji, operując nie bezwzględными wartościami zmiennych zależnych, tylko prawdopodobieństwami zajścia odpowiednich zdarzeń, np. przejścia drzewa z mniejszej do większej klasy grubości.

Odnowienie definiuje się jako liczbę żywych drzew określonego gatunku, które wejdą do pierwszej klasy pierśnic w okresie roku. Proces wyraża się funkcją pierśnicowego pola przekroju (B) poszczególnych gatunków oraz liczby drzew (N) gatunku, dla którego określano liczbę dorostów. Oczekuje się, że wraz ze wzrostem wartości B będzie malała liczba dorostów jako odzwierciedlenie wzrostu konkurencji w drzewostanie. Dopuszcza się odstępstwa od tej reguły, bo może zaistnieć sytuacja, w której obecność jednego gatunku w drzewostanie stymuluje odnawianie innego gatunku. Liczba dorostów danego gatunku wzrasta wraz ze wzrostem liczby drzew (reprezentacji) tego samego gatunku, jako odzwierciedlenie tzw. reguły Eka [1974] mówiącej o dodatnim wpływie liczby drzew danego gatunku na jego odnawianie. Oczekuje się ponadto, że wyraz wolny równania opisującego proces będzie przyjmował wartości nieujemne, odzwierciedlając fakt, że dorosty mogą się pojawić niezależnie od cech taksacyjnych drzewostanu, np. jeśli dany gatunek nie występuje w drzewostanie, to jego dorosty mogą się pojawić w wyniku dyspersji nasion z drzewostanów sąsiednich lub w wyniku podsadzeń.

Wzrost drzew definiuje się jako prawdopodobieństwo przejścia drzewa danego gatunku do następnej klasy pierśnic w ciągu roku. Proces ten wyraża się jako funkcję pierśnicowego pola przekroju drzewostanu (B) i średniej pierśnicy drzewa w klasie pierśnic (D oraz D^2). Oczekuje

się zmniejszania przyrostu pierśnicy wraz ze wzrostem B (wzrost konkurencji) oraz odpowiednio: dodatniego wpływu wielkości pierśnicy (D) i ujemnego wpływu kwadratu pierśnicy (D²) na tempo przyrostu pierśnicy, które na ogół wzrasta wraz z wiekiem, osiąga maksimum, a następnie maleje.

Przykładowy rozkład prawdopodobieństwa przejścia drzew świerka do wyższej klasy pierśnic w ciągu roku określony w modelu zbudowanym dla Puszczy Białowieskiej [Drozdowski 2002] przedstawia rycina 1.

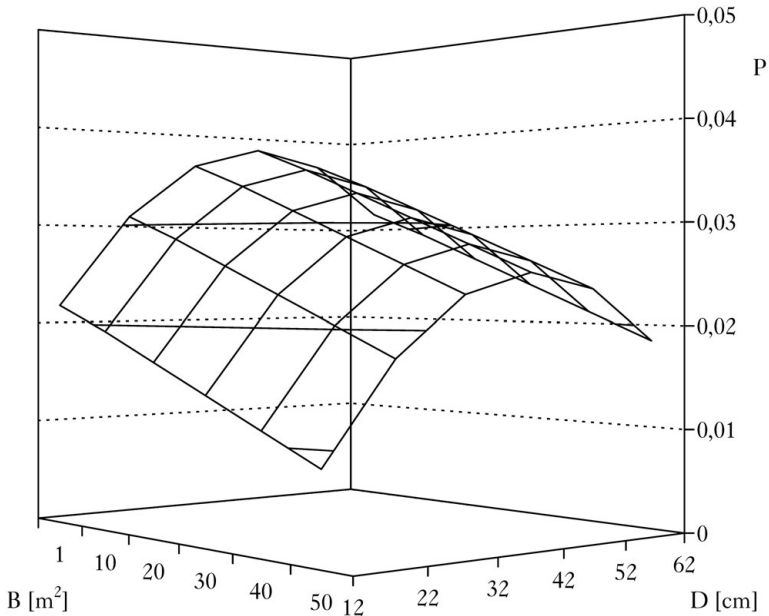
Zamieranie drzew definiuje się jako proces odwrotny do procesu przeżycia drzewa, które to wyraża się analogicznie jak wzrost drzew, tzn. jako funkcję B, D oraz D². Oczekuje się wzrostu prawdopodobieństwa przeżycia drzewa wraz ze zmniejszaniem się B (zmniejszenie konkurencji) oraz odpowiednio, dodatniego wpływu wielkości D i ujemnego wpływu D² na kształtowanie się prawdopodobieństwa przeżycia drzewa, jako odzwierciedlenie mniejszej przeżywalności drzew najcieńszych (młodych) i najgrubszych (starych). Przykładowy rozkład prawdopodobieństwa zamierania drzew świerka w ciągu jednego roku określony w modelu zbudowanym dla Puszczy Białowieskiej [Drozdowski 2002] przedstawia rycina 2.

OGÓLNA STRUKTURA MODELU. Macierzowy model drzewostanu można przedstawić ogólnym równaniem:

$$y_{t+1} = \mathbf{G}_t(y_t - h_t) + c$$

w którym:

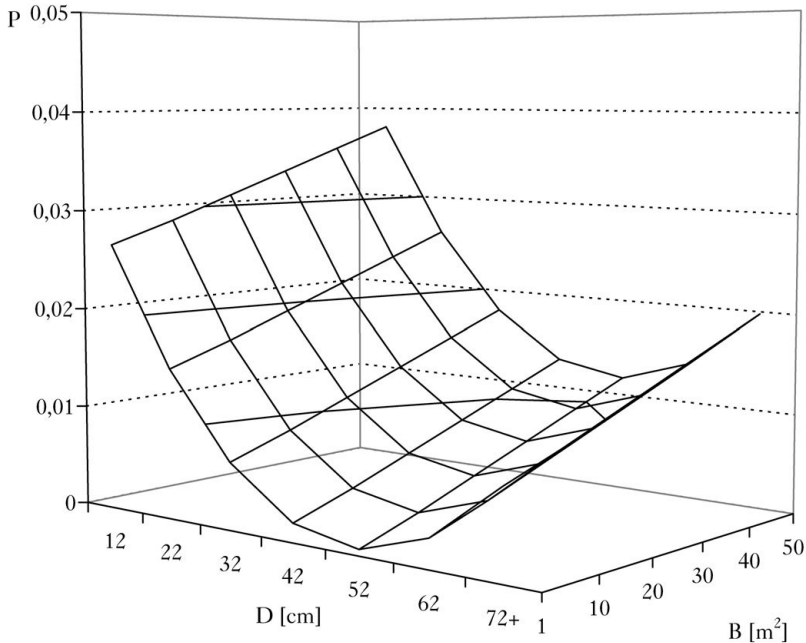
y_{t+1} – jest kolumnowym wektorem opisującym skład gatunkowy i strukturę pierśnic drzew w czasie $t+1$;



Ryc. 1.

Prawdopodobieństwo przejścia drzew świerka do wyższej klasy pierśnic w ciągu 1-go roku (BMśw, Puszcza Białowieska)

Likelihood for a given tree species to be transferred to the next DBH class within a year (526c, Białowieża Primeval Forest)



Ryc. 2.

Prawdopodobieństwo śmierci drzew świerka w ciągu 1-go roku (BMśw, Puszcza Białowiecka)
Likelihood of spruce tree dieback within a year (526c, Białowieża Primeval Forest)

G_t – jest dynamiczną macierzą przejść;

y_t – jest kolumnowym wektorem opisującym skład gatunkowy i strukturę pierśnic drzew w czasie t ;

h_t – jest kolumnowym wektorem opisującym proces pozyskania drzew;

c – jest kolumnowym wektorem, który zawiera wyrazy wolne z równań określających liczbę dorostów poszczególnych gatunków.

Stan drzewostanu w czasie $t+1$ uzyskuje się w wyniku pomnożenia wektora y_t przez dynamiczną macierz przejść G_t .

Prawdopodobieństwa określone za pomocą równań regresji stanowią podstawowy element dynamicznej (zmienną w zależności od zmieniających się cech taksacyjnych drzewostanu) macierzy przejść G_t , głównego elementu modelu (stąd jego nazwa). Macierz składa się: z przekątnej – zawierającej prawdopodobieństwa pozostania drzew w danej klasie pierśnic; podprzekątnej – zawierającej prawdopodobieństwa przejścia drzew do wyższej klasy pierśnic oraz pierwszego wiersza macierzy służącego do określenia liczby dorostów danego gatunku w rozpatrywanym przedziale czasu. Pozostałe elementy macierzy są równe zero.

Przykładowe parametry macierzy przejść G , obliczone dla pierśnicowego pola przekroju drzewostanu (B) równego $20 \text{ m}^2/\text{ha}$, przedstawia tabela 1.

DANE EMPIRYCZNE POTRZEBNE DO PARAMETRYZACJI MODELU. Warunkiem zbudowania empirycznego modelu drzewostanu jest posiadanie dwóch rodzajów informacji: 1) danych, na podstawie których dokonuje się parametryzacji modelu oraz 2) niezależnych danych służących do sprawdzenia poprawności działania modelu (walidacji modelu).

Tabela 1.

Fragment struktury macierzy przejść G oraz wektor c dla pierśnicowego pola przekroju drzewostanu równego 20 m²/ha i przedziału czasu równego jeden rok (BMśw, oddz. 526c, Puszcza Białowieska)
 Fragment of transition matrix structure G and vector c for the stand breast height diameter equalled 20m²/ha and time interval of one year (BMśw habitat, compartment 526c, Białowieża Primeval Forest)

Gatunek	Klasa pierśnic	Sosna					Świerk					Wektor c					
		12	22	32	42	52	62	72+	12	22	32	42	52	62	72+	c	
	12	***	0,964	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	22		0,018	0,964													
	32			0,018	0,964												
Sosna	42				0,018	0,964											
	52					0,018	0,964										
	62						0,018	0,964									
	72+							0,018	0,982								
	12	***	-0,004	-0,014	-0,030	-0,051	-0,078	-0,111	-0,150	0,945	-0,043	-0,091	-0,158	-0,242	-0,343	-0,463	35,221
	22									0,017	0,961						
	32										0,026	0,964					
	42											0,031	0,967				
Świerk	52												0,033	0,968			
	62													0,032	0,972		
	72+														0,027	0,993	

Podstawowym (i najbardziej pożądanym) rodzajem danych empirycznych wykorzystywanych do budowy macierzowych modeli drzewostanów są dane pochodzące z sieci stałych powierzchni próbnych, np. założonych w jednostkach kontrolnych zagospodarowanych sposobem przerębowym lub przerębowo-zrębowym. Warunkiem koniecznym, umożliwiającym przystąpienie do parametryzacji modelu, jest posiadanie danych co najmniej dwóch kolejnych oddalonych w czasie pomiarów (inventaryzacji).

Ważną rzeczą jest również przedział czasu pomiędzy kolejnymi inwentaryzacjami, który może mieć wpływ na jakość równań zawartych w modelu. Przyjmuje się, że ustalając parametry funkcji obrazującej proces zamierania drzew, przedział czasu pomiędzy kolejnymi pomiarami nie powinien być dłuższy niż 7-8 lat.

SPOSOBY PARAMETRYZACJI I MODELU. Najprostszą metodą określenia parametrów odzwierciedlających procesy zamierania, awansu z mniejszej klasy grubości do większej (wzrostu), czy pozostania w danej klasie pierśnic, jest obliczanie zwykłej proporcji, przy której prawdopodobieństwa wyrażane są liczbą w przedziale od zera do jeden. Prawdopodobieństwa można ustalić także za pomocą równań wieloczynnikowej regresji liniowej, jak również równań regresji logistycznej.

Liczbę dorostów można określać na podstawie funkcji odzwierciedlającej liczbę nowych drzew powstałych w miejscu drzew pozyskanych z większych klas grubości lub drzew zamarych. W najnowszych modelach (np. SouthPro i NorthPro) liczba dorostów zależy od cech taksacyjnych drzewostanu macierzystego i jest określana za pomocą równania wieloczynnikowej regresji liniowej.

W modelach macierzowych przyjmuje się na ogół, że drzewa odnawiają się w sposób naturalny, ale możliwe jest również uwzględnienie sztucznego odnawiania drzew, np. w wyniku podsadzeń. Liczba drzew odnowionych sztucznie jest uwzględniana w wektorze stałych c , po ustaleniu prawdopodobieństwa przeżycia sadzonek oraz wieku osiągnięcia minimalnej pierśnicy założonej w modelu, w zależności od stopnia osłony drzewostanu macierzystego.

WALIDACJA MODELU (SPRAWDZENIE POPRAWNOŚCI DZIAŁANIA). Przed zastosowaniem modelu w praktyce należy przeprowadzić jego walidację na bazie niezależnych danych, czyli takich, które nie zostały użyte do budowy modelu (parametryzacji lub kalibracji). Ze względu na częsty brak lub niedostępność wystarczająco obszernej bazy spostrzeżeń empirycznych przyjęło się dzielić dane na dwie części, jedną służącą do parametryzacji i drugą do walidacji modelu. W przypadku modeli prognostycznych o właściwej walidacji można mówić wtedy, gdy do budowy modelu używa się danych z wcześniejszych okresów pomiarowych, a do walidacji danych pochodzących z ostatniego terminu inwentaryzacji. Często spotykanym zabiegiem jest ponowna parametryzacja modelu, po udanej walidacji, na bazie wszystkich dostępnych danych [West i in. 1984, 1986].

Fundamentalnym założeniem przy walidacji modelu jest jego sprawdzenie w związku z celem w jakim został on zbudowany [Van Horn 1971]. Jedyną drogą do oceny poprawności działania modelu jest porównywanie wartości uzyskiwanych z symulacji (przewidywanych) z danymi rzeczywistymi (obserwowanymi) [Vanclay 1995].

Walidację krótkookresową (kilka, kilkanaście lat) o charakterze prognostycznym można wykonać za pomocą testu t , tj. sprawdzić hipotezę zerową, zgodnie z którą średnia wartość zmiany liczby drzew danego gatunku w klasie pierśnic, obserwowana i przewidywana przez model, nie różni się znacząco na ustalonym poziomie istotności, np. jeden procent.

Walidacja długookresowa modelu polega na wykonaniu prognozy rozwoju drzewostanu w długim okresie (kilkaset lat). Walidację tę wykonuje się w celu sprawdzenia, czy model nie prognozuje nierzeczywistych, znacznie odbiegających od możliwych, wartości podstawowych charakterystyk drzewostanu np. pierśnicowego pola przekroju drzewostanu i liczby drzew.

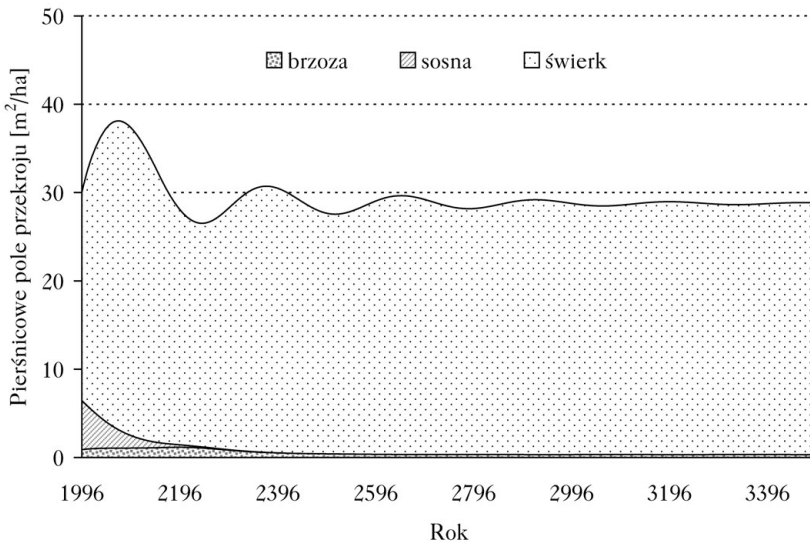
Zastosowanie modelu

Zasadniczą zaletą modeli macierzowych jest możliwość prognozowania wzrostu i rozwoju mieszanych, wielogeneracyjnych drzewostanów o złożonej postaci. Model może naśladować wzrost drzew w zróżnicowanych stanach drzewostanu, np. po zastosowaniu różnych sposobów

cięć. Wynikiem symulacji komputerowej przy użyciu modelu macierzowego jest wektor opisujący stan drzewostanu w czasie $t+1$. Wektor ten zawiera liczbę drzew w klasach grubości z uwzględnieniem poszczególnych gatunków drzew.

Tak uzyskane szczegółowe dane wyjściowe modelu umożliwiają przeprowadzenie wielu analiz dotyczących wpływu postępowania hodowlanego na różne aspekty gospodarki leśnej, jak również umożliwiają badanie rozwoju drzewostanów bez ingerencji człowieka (ryc. 3). Najbardziej elementarne informacje, jakie można uzyskać za pomocą modelu, to sumaryczna produkcja grubizny drzewostanu z uwzględnieniem udziału poszczególnych klas grubości i gatunków drzew (tab. 2). Za pomocą modelu można badać efektywność gospodarki leśnej pod względem produkcyjnym i finansowym. Można określać wpływ gospodarki leśnej na pozaprodukcyjne funkcje lasu, wpływ cięć na różnorodność drzewostanu oraz określać koszt zachowania różnorodności biologicznej w lesie. Ponadto, można analizować długotrwały efekt stosowania określonego sposobu regulacji użytkowania lasu na budowę i strukturę drzewostanu (np. metody regulacji użytkowania BDq [Baker i in. 1996], metody pierśnicy docelowej (PD) [Sterba, Zingg 2001] np. za pomocą wskaźników zróżnicowania drzewostanu) (tab. 2; ryc. 4), określać fazę rozwojową drzewostanu oraz strukturę powierzchniową (na podstawie powierzchni kołowych) i udział poszczególnych faz rozwojowych w jednostce kontrolnej.

Model może służyć jako narzędzie optymalizacyjne, np. do maksymalizacji produkcji określonych sortymentów drzewnych (np. wielkowymiarowych, małowymiarowych), maksymalizacji wyniku finansowego gospodarstwa leśnego, optymalizacji wielkości nawrotu/obiegu cięć, optymalizacji intensywności cięć, jak też optymalizacji postępowania hodowlanego w zależności od ważności produkcyjnych i pozaprodukcyjnych funkcji lasu. Ponadto, model jest bardzo przydatnym narzędziem w planowaniu hodowlanym, np. za pomocą modelu można planować



Ryc. 3.

Dynamika pierśnicowego pola przekroju w trakcie symulowanego rozwoju drzewostanu na podstawie danych wejściowych uzyskanych w wyniku inwentaryzacji przeprowadzonej w 1996 r. (526c, BMśw, Puszcza Białowiecka)

Dynamics of the dbh basal area in the simulation of stand development on the basis of input data obtained as a result of the 1996 inventory (526c, BMśw, Białowieża Primeval Forest)

Tabela 2.

Struktura miąższości pozyskanego surowca drzewnego [m³/ha] w dwudziestu 5-letnich obiegach cięć (100 lat) na siedlisku BMśw (526c, Puszcza Białowieńska)

Volume structure of raw timber [m³/ha] in twenty 5-year cutting cycles (100 years) in BMśw habitat (526c, Białowieża Primeval Forest)

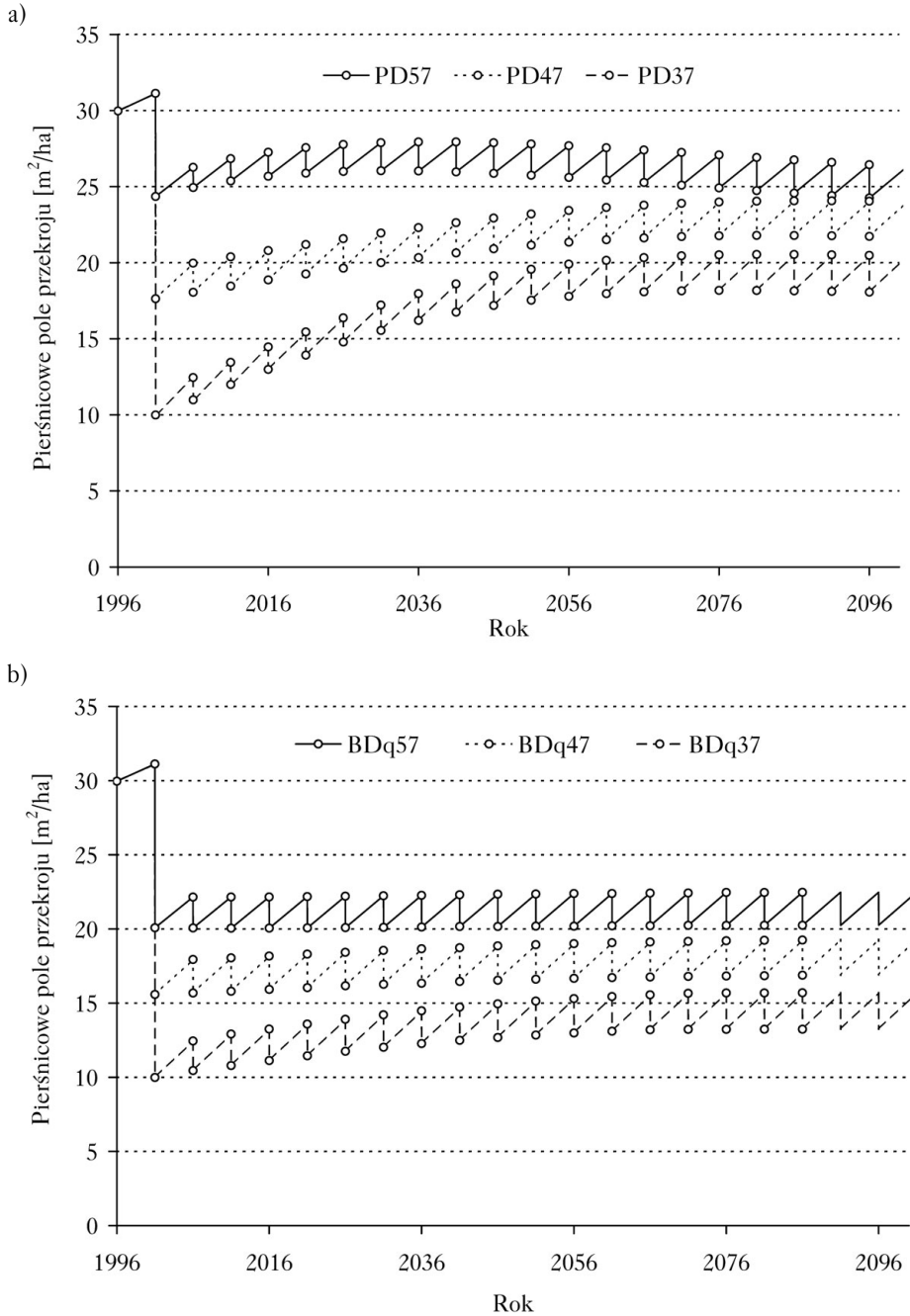
Gatunek	Klasa pierzńic	Metoda pierśnicy docelowej			Metoda BDq		
		PD57	PD47	PD37	BDq57	BDq47	BDq37
Brzoza	12	–	–	–	0,00	0,00	0,00
	22	–	–	–	0,00	0,00	0,00
	32	–	–	–	0,00	0,00	0,00
	42	–	–	4,36	0,00	0,00	4,33
	52	–	14,46	0,70	0,00	15,04	0,76
	62	15,48	1,05	0,04	21,86	1,38	0,04
	72+	0,05	0,02	0,00	0,61	0,03	0,00
	Suma	15,53	15,52	5,10	22,47	16,45	5,13
Sosna	12	–	–	–	0,00	0,00	0,00
	22	–	–	–	0,00	0,00	0,00
	32	–	–	–	0,00	0,00	0,00
	42	–	–	1,16	0,00	0,00	1,16
	52	–	10,74	0,07	0,00	10,74	0,07
	62	22,89	0,60	0,00	23,14	0,60	0,00
	72+	1,20	0,02	0,00	1,22	0,02	0,00
	Suma	24,09	11,35	1,24	24,36	11,35	1,24
Świerk	12	–	–	–	22,27	36,24	50,48
	22	–	–	–	0,00	0,00	0,00
	32	–	–	–	0,00	0,00	5,21
	42	–	–	412,02	70,68	92,31	353,89
	52	–	465,83	47,03	143,06	335,36	41,77
	62	438,35	44,32	2,36	230,97	32,61	2,17
	72+	31,37	1,68	0,05	17,00	1,28	0,04
	Suma	469,72	511,83	461,46	483,97	497,81	453,57
Suma		548,96	565,58	474,13	577,63	553,41	466,30

wielkość pozyskania w obiegu/nawrocie cięć (strukturę gatunkową i wielkość drzew przeznaczonych do pozyskania), zakres prac pielęgnacyjnych i odnowieniowych (np. wielkość podsadzeń gatunków słabo odnawiających się naturalnie).

Niniejszy rozdział zawiera jedynie wybrane przykłady zastosowania modeli macierzowych, bez szczegółowego omawiania wykorzystanych w modelu metod, które w ostatnich latach dobrze opisano i udokumentowano w literaturze światowej (np. [Volin i Buongiorno 1996]; [Buongiorno 2001]).

Podsumowanie

Czasoprzestrzenna złożoność problematyki środowiskowo-leśnej, ogromne ilości danych, informacji oraz wiedzy występującej w różnych postaciach, powodują, że podejmowanie dobrych decyzji bez pomocy efektywnych narzędzi staje się coraz trudniejsze [Janssen 1992]. W leśnictwie wielu krajów rolę takich narzędzi pełnią modele macierzowe. Wykorzystuje się je do szacowania i prognozowania zmian zasobów leśnych gospodarstwa leśnego w skali kraju [Sallnäs 1990], jak też znacznie szerszej, czego przykładem może być model EFISCEN zbu-



Ryc. 4.

Wpływ metody regulacji użytkowania na wielkość pierśnicowego pola przekroju drzewostanu podczas 100 lat stosowania regulacji z 5-letnim obiegiem cięć na siedlisku BMśw (a – metoda pierśnicy docelowej, b – metoda BDq)

Effect of harvest regulation method on stand dbh basal area value over 100 years of using the regulation with a 5-year cutting cycle in the BMśw habitat (a – target diameter method, b – BDq method)

dowany w Europejskim Instytucie Lasów w Joensuu [Nabuurs 2001, Pussinen i in. 2001, Nabuurs i in. 2000]. Macierze przejść można wykorzystywać do prognozowania rozwoju drzewostanów jednowiekowych [Pukkala i Kolstrom 1988], jak również do modelowania przebudowy drzewostanów jednogeneracyjnych na wielogeneracyjne [Buongiorno 2001].

Najczęściej jednak macierze przejść wykorzystuje się do budowy modeli naśladowujących rozwój drzewostanów o złożonej postaci.

Obecnie największym ograniczeniem w zakresie budowy macierzowych modeli drzewostanu jest brak właściwych danych do ich parametryzacji, kalibracji (reparametryzacji) i walidacji. Na tej podstawie można też zasugerować, że szersze rozpowszechnienie metod inwentaryzacji drzewostanów opartych na sieci stałych kontrolnych powierzchni próbnych zaowocowałoby w przyszłości powstaniem danych empirycznych, które m.in. mogłyby być wykorzystane do budowy modeli macierzowych.

Mimo swoich wielu potencjalnych zalet i wielokierunkowych zastosowań modele macierzowe nie cieszyły się dotychczas w Polsce większym zainteresowaniem. Wydaje się jednakże, że względu na swoją stosunkowo prostą budowę oraz możliwość zastosowania przy rozwiązywaniu szerokiego spektrum problemów, występujących w gospodarce leśnej, powinny być wykorzystane również w warunkach trwale zrównoważonej, wielofunkcyjnej gospodarki leśnej w Polsce.

Literatura

- Baker J. B., Cain M. D., Guldin J. M., Murphy P. A., Shelton M. G. 1996. Uneven-aged silviculture for the loblolly and shortleaf pine forest types. USDA For. Serv., Gen. Tech. Rep. SO-118. 65.
- Bruchwald A. 1979. Zmiana z wiekiem wysokości górnej w drzewostanach sosnowych. Sylwan 2: 1-11.
- Bruchwald A. 1985. Model wzrostowy MDI – 1 dla sosny. Las Polski 9: 10-15.
- Bruchwald A. 1991. Modele wzrostowe dla drzewostanów sosnowych będących pod wpływem emisji przemysłowych. Centralny Program Badań Podstawowych 04.10, Ochrona i Kształtowanie Środowiska Przyrodniczego. Z. 76: 182-192.
- Bruchwald A., Dudzińska M., Wirowski M. 1996. Model wzrostu dla drzewostanów dębu szypułkowego. Sylwan 10: 35-44.
- Bruchwald A., Dudzińska M., Wirowski M. 1998. Model wzrostu dla buka. Dokumentacja naukowa w Instytucie Badawczym Leśnictwa.
- Bruchwald A., Dudek A., Rymer-Dudzińska T., Michalak K., Wróblewski L., Zasada M. 1999. Model wzrostu dla drzewostanów świerkowych. Sylwan 1: 19-31.
- Bruchwald A. i in. 2001. Budowa modeli wzrostu dla brzozy i drzewostanów mieszanych oraz zastosowanie modeli wzrostu w praktyce leśnictwa. Maszynopis. Zakład Dendrometrii i Nauki o Produkcyjności Lasu SGGW.
- Brzezicki B. 2002. Rola Systemów Wspomagania Decyzji (SWD) w praktycznym wdrażaniu zasad leśnictwa ekosystemowego. W: Stępień E. Urządzenie lasu wielofunkcyjnego – opinie – poglądy – propozycje. Str. 135-156. Fundacja rozwój SGGW. Warszawa.
- Buongiorno J. 2001. Quantifying the implications of transformation from even to uneven-aged forest stands. For. Ecol. Manage. 151: 121-132.
- Buongiorno J., Peyron J. L., Houllier F., Bruciamachcchie M. 1995. Growth and Management of Mixed-Species, Uneven-Aged Forests in the French Jura: Implications for Economic Returns and Tree Diversity. For. Sci. 41 (3): 397-429.
- Drozdowski S. 2002. Macierzowy model rozwoju drzewostanu. Rozprawa doktorska KHL SGGW. 109.
- Ek A. R. 1974. Nonlinear models for stand table projection in northern hardwood stands. Can. J. For. Res. 4: 23-27.
- Janssen R. 1992. Multiobjective Decision Support for Environmental Management. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands 232.
- Kolbe A. E., Buongiorno J., Vasievich M. 1999. Geographic extension of an uneven-aged, multi-species matrix growth model for northern hardwood forests. Ecological Modelling 121: 235-253.
- Nabuurs G. J. 2001. European forests in the 21st century: impacts of nature-oriented forest management assessed with a large-scale scenario model. Alterra, Wageningen. 130.
- Nabuurs G. J., Schelhaas M. J., Pussinen A. 2000. Validation of the European Forest Information Scenario Model (EFISCEN) and a projection of Finish forests. Silva Fennica 34 (2): 167-179.
- Poznański R. 1999. Nowa metoda programowania rozwoju zasobów leśnych w przerębowo-zrębowym sposobie zagospodarowania z rębnią stopniową. Sylwan 5: 13-25.

- Poznański R., Jaworski A. 2000. Nowoczesne metody gospodarowania w lasach górskich. CILP. Warszawa.
- Pukkala T., Kolstrom T. 1988. Simulation of the development of Norway spruce stands using a transition matrix. For. Ecol. Manage. 25: 255-268.
- Pussinen A., Schelhaas M. J., Verkaik E., Heikkinen E., Liski J., Karjalainen T., Päivinen R., Nabuurs G. J. 2001. Manual for the European Forest Information Scenario Model (EFISCEN 2.0). EFI. Joensuu Finland.
- Rykowski K. 1994. Kryteria i indykatory trwałego i zrównoważonego rozwoju lasów. Zarys problematyki i propozycje dla polskiego leśnictwa. IBL. Warszawa.
- Sallnäs O. 1990. A matrix growth model of the Swedish forest. Studia Forestalia Suecica. 183: 1-23.
- Schulte J. B., Buongiorno J., Lin Ch. R., Skog K. 1998. SouthPro: a computer program for managing uneven-aged loblolly pine stands. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-112. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory 47p.
- Sterba H., Zingg A. 2001. Target diameter harvesting – a strategy to convert even-aged forests. For. Ecol. Manage. 151: 95-105.
- Vanclay J. K. 1995. Growth models for Tropical Forests: a synthesis of models and methods. For. Sci. 41 (1): 7-42.
- Van Horn R. L. 1971. Validation of simulation results. Manage. Sci. 17: 247-258.
- Virgiliotti P., Buongiorno J. 1997. Modeling forest growth with management data: A matrix approach for the Italian Alps. Silva Fennica 31 (1): 27-42.
- Volin V. C., Buongiorno J. 1996. Effects of alternative management regimes on forest stand structure, species composition, and income: a model for the Italian Dolomites. For. Ecol. Manage. 87: 107-125.
- West P. W., Davis A. W., Ratkowsky D. A. 1986. Approaches to regression analysis with multiple measurements from individual sampling units. J. Statist. Comp. Simul. 26: 149-175.
- West P. W., Ratkowsky D. A., Davis A. W. 1984. Problems of hypothesis testing of regressions with multiple measurements from individual sampling units. For. Ecol. Manage. 7: 207-224.
- Zasada M. 1999. The growth model for fir (*Abies alba* Mill.). Fol. For. Pol. Ser. A, 41: 37-46.
- Zarządzenie nr 11 Dyrektora Generalnego LP (1995) w Sprawie Doskonalenia Gospodarki Leśnej na Podstawach Ekologicznych.
- Zarządzenie nr 11a Dyrektora Generalnego LP (1999) w Sprawie Doskonalenia Gospodarki Leśnej na Podstawach Ekologicznych.

SUMMARY

Application of a matrix model for projecting the development of stands with complex structure

In this study, the principles of building matrix models of stands as tools supporting silviculture-related decisions including projecting, planning and regulation in the complex-structure forests are presented. The ways of modelling three basic processes occurring in stands with a complex structure are discussed. These are: regeneration, growth and dieback of trees. Regeneration is defined as the number of live trees of a defined species which are entered in the first (lowest) class of diameter at breast height within a year. This process is expressed by the function of the diameter at breast height basal area of individual species and the number of trees of the species for which the number of ingrowths are determined. Tree growth is defined as the likelihood for a given tree species to be transferred to the next dbh class within a year. This process is expressed by the function of the dbh basal area of a stand and the average dbh of a tree in the dbh class. Tree dieback is defined as a process reversal to the tree survival process and is expressed analogically to the tree growth process. A general model structure is presented and component elements of the transfer matrix are discussed. The type of empirical data needed for model parameterisation and validation is characterized. The ways of model parameterisation and validation are presented and potential advantages and directions of using the matrix models of stands for addressing silvicultural problems in a forest with a complex structure are discussed.