

ARKADIUSZ BRUCHWALD, ELŻBIETA DMYTERKO

Zastosowanie modeli ryzyka uszkodzenia drzewostanu przez wiatr do oceny zagrożenia lasów nadleśnictwa*

Application of wind damage risk models for the assessment of danger to stands within a forest district

ABSTRACT

Arkadiusz Bruchwald, Elżbieta Dmyterko 2011. Zastosowanie modeli ryzyka uszkodzenia drzewostanu przez wiatr do oceny zagrożenia lasów nadleśnictwa. Sylwan 155 (7): 459-471.

The study presents a risk model for stand damage caused by wind. It is associated with the following groups of factors: the variable characteristics of stand, its permanent characteristics, the position of a forest district in the region of the country, the damage that occurred in the stand in the past. The model generates a risk factor for tree damage ranging from 0 to 3. The higher value it indicates, the higher risk for the stand. The model serves for the assessment of risks to stands in the Cracow Regional Directorate of the State Forests.

KEY WORDS

wind damage, risk models, wind damage risk indices

ADDRESSES

Arkadiusz Bruchwald – e-mail: A.Bruchwald@ibles.waw.pl

Elżbieta Dmyterko – e-mail: E.Dmyterko@ibles.waw.pl

Zakład Zarządzania Zasobami Leśnymi; Instytut Badawczy Leśnictwa; Sękocin Stary, Braci Leśnej 3; 05-090 Raszyn

Wstęp

Lasy Polski znajdują się w zasięgu oddziaływania ekstremalnych czynników abiotycznych, takich jak silne wiatry, intensywne opady mokrego śniegu, szadź czy susza. Nasiliły się one zwłaszcza w bieżącym stuleciu i występują głównie w południowej i północnej części naszego kraju. W osłabionych drzewostanach zachodzi masowy rozwój chorób infekcyjnych i dochodzi do gradacji owadów. Takie drzewostany stają się mniej stabilne, a przez to podatne na powstanie kolejnych szkód.

W 2002 roku przez północno-wschodnią część Polski przeszedł potężny huragan, który spowodował olbrzymie szkody zwłaszcza w Nadleśnictwie Pisz [Mikułowski 2002]. W tym samym regionie w lipcu 2006 roku miał miejsce huragan zwany „Biały Szkwiał”. Inny huragan wyrządził w listopadzie 2004 roku duże szkody w drzewostanach nadleśnictw położonych w południowej części katowickiej dyrekcji Lasów Państwowych. W lasach Beskidu Śląskiego i Żywieckiego w lipcu 2006 roku ekstremalna susza doprowadziła do zamierania drzewostanów świerkowych, a proces ten przyspieszyła gradacja kornika drukarza [Szabla 2009]. W listopadzie 2006 roku

* Pracę zrealizowano w ramach tematu „Opracowanie symulacji zagrożeń od czynników abiotycznych ekosystemów leśnych”, zleconego przez Dyрекję Generalną Lasów Państwowych. Część wyników prezentowano jako referat „Model ryzyka uszkodzenia drzewostanu przez wiatr” na konferencji „Klęski żywiołowe w lasach” zorganizowanej przez Wydział Leśny Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, w dniach 16-18 sierpnia 2010 roku w Poznaniu i Puszczykowie.

w olsztyńskiej dyrekcji Lasów Państwowych opady śniegu spowodowały szkody w drzewostanach ocenione na 1,5 mln m³ surowca drzewnego, a także szkody powierzchniowe w uprawach i młodnikach. W 2007 roku przez Europę przeszedł potężny huragan „Cyril”, który wywołał szkody w lasach oszacowane na 40 mln m³ grubizny. Dotarł on do południowo-zachodniej części naszego kraju, łamiąc lub przewracając drzewa o łącznej miąższości około 2,5 mln m³ [Filipek 2008; Grabowski 2008]. W Polsce odnotowano wiele innych huraganów, niekiedy powiązanych z trąbami powietrznymi, w wyniku których powstały bardzo wysokie szkody, np. w nadleśnictwach: Przedbórz w 2006 roku [Janusz 2008], Koszęcin w 2008 roku czy Legnica i Wołów w 2009 roku.

Prace nad poznaniem wpływu wiatru na las prowadzone były w Polsce od wielu lat [Zajązkowski 1991; Zawiła-Niedźwiecki 1994; Zajązkowski i in. 2004; Zachara 2006; Gil, Zachara 2006, Koziński, Nienartowicz 2006]. Podobne badania w zagranicznych ośrodkach naukowych przyczyniły się do opracowania modeli ryzyka uszkodzenia lasu [Peltola, Kellomäki 1993; Peltola 1996; Valinger, Fridmann 1998, 1999; Ni Dhubhain i in. 2001]. W naszym kraju opracowano także modele ryzyka uszkodzenia drzewostanu przez czynniki abiotyczne [Bruchwald, Dmyterko 2010]. Współczynniki modeli, zawarte w tej publikacji, oparto na stosunkowo skromnym materiale empirycznym, głównie na informacjach z nadleśnictw (regionalne dyrekcje Lasów Państwowych we Wrocławiu i Katowicach), w których szkody spowodował huragan „Cyril”. Korekta tych współczynników wymagała pozyskania bogatszego materiału – danych z nadleśnictw różnych regionów kraju. Analiza tych danych umożliwiła również weryfikację niektórych założeń modelu.

Celem pracy jest prezentacja zweryfikowanych modeli ryzyka uszkodzenia drzewostanu przez czynniki abiotyczne, w tym głównie wiatr. Modele zastosowane zostaną do oceny zagrożenia drzewostanów nadleśnictw pod nadzorem Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Krakowie.

Materiał badawczy

Do opracowania modeli ryzyka uszkodzenia drzewostanu wykorzystano materiał empiryczny pochodzący z nadleśnictw, w których wiatr lub inne czynniki wyrządziły różnych rozmiarów szkody. Dane uzyskano głównie z Systemu Informatycznego Lasów Państwowych (SILP), a ściślej z raportów nadleśnictw, zawierających wielkość pozyskanego surowca drzewnego, zaliczonego do złomów, wywrotów i posuszu. Nadleśnictwa wchodziły w skład 14 regionalnych dyrekcji Lasów Państwowych, najwięcej jednak danych było z dyrekcji: Wrocław, Katowice i Kraków, a także Gdańsk, Białystok, Olsztyn, Szczecinek, Szczecin oraz Radom. Informacje z 2007 roku pochodziły ze 140 nadleśnictw, a z 2008 roku ze 109 nadleśnictw.

Modele ryzyka uszkodzenia drzewostanów przez wiatr oceniono na przykładzie lasów 6 nadleśnictw (3 nizinnych i 3 górskich). Zastosowano je również do oceny zagrożenia drzewostanów wszystkich nadleśnictw Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Krakowie. Analiza dotyczyła zatem 16 nadleśnictw, obejmujących zarówno tereny nizinne, jak i górskie.

Modele ryzyka

Opracowanie modeli ryzyka uszkodzenia drzewostanu przez czynniki abiotyczne wymagało przyjęcia następujących założeń:

- jednostką statystyczną jest drzewostan,
- populację stanowią wszystkie drzewostany nadleśnictwa (obrębu),
- ryzyko uszkodzenia drzewostanu oceniane jest w przedziale od 0 do 3, gdzie 0 oznacza brak zagrożenia, a 3 – zagrożenie bardzo wysokie.

Przyjęto również, że podatność drzewostanu na niszczycielską działalność wiatru zależy od 4 następujących grup czynników:

- zmiennych cech drzewostanu,
- stałych cech drzewostanu,
- położenia nadleśnictwa, a tym samym drzewostanu, w regionie kraju,
- szkód występujących w drzewostanie w przeszłości, z wyjątkiem drzewostanów młodych.

W modelu I współczynnik ryzyka (R_1) oparto na zmiennych cechach drzewostanu:

$$R_1 = 0,505 \cdot X_1 + 0,030 \cdot X_2 + 0,240 \cdot X_3 + 0,160 \cdot X_4 + 0,065 \cdot X_5 \quad [1]$$

Poszczególne składowe modelu dotyczą następujących, transformowanych cech drzewostanu:

- X_1 – średniej wysokości gatunku głównego,
- X_2 – wieku gatunku głównego,
- X_3 – składu gatunkowego,
- X_4 – średniej smukłości,
- X_5 – czynnika zadrzewienia.

Średnią wysokość gatunku głównego transformowano do postaci:

$$X_1 = \frac{H}{12} \quad [2]$$

W przypadku $X_1 > 3$, należy przyjąć $X_1 = 3$.

Wiek gatunku głównego transformowano do postaci:

$$X_2 = \frac{\varpi}{40} \quad [3]$$

Gdy $X_2 > 3$, należy przyjąć $X_2 = 3$.

Cechę powiązaną ze składem gatunkowym drzewostanu określa się wzorem:

$$X_3 = \frac{u_1 \cdot y_1 + u_2 \cdot y_2 + \dots + u_k \cdot y_k}{u_1 + u_2 + \dots + u_k} \quad [4]$$

gdzie:

- u_1, u_2, \dots, u_k – udział powierzchniowy poszczególnych gatunków drzew w drzewostanie,
- y_1, y_2, \dots, y_k – współczynnik ryzyka gatunku, charakteryzujący jego podatność na uszkodzenie przez wiatr (tab. 1),
- k – liczba gatunków drzew w drzewostanie.

Cechę X_4 powiązaną ze smukłością, a ściślej jej odwrotnością, określono algorytmem:

$$S = 100 \frac{D}{H} \quad [5]$$

gdzie:

- D – średnia pierśnica gatunku głównego,
- H – średnia wysokość gatunku głównego.

Jeżeli $S \leq 60$, to należy przyjąć $X_4 = 0$, gdy $60 < S \leq 120$, to $X_4 = \frac{S}{20} - 3$, a w przypadku gdy $S > 120$, to $X_4 = 3$.

Algorytm powiązany z czynnikiem zadrzewienia (Zad), a w uprawach ze współczynnikiem zagęszczenia, ma postać:

$$Zad \leq 0,6, \text{ to } X_5 = 5 \cdot (1,2 - Zad) \quad [6a]$$

$$0,6 < Zad \leq 1,0, \text{ to } X_5 = 5 \cdot Zad \quad [6b]$$

$$Zad > 1,0, \text{ to } X_5 = 1 \quad [6c]$$

Tabela 1.

Współczynniki ryzyka uszkodzenia drzewostanu dla gatunków drzew
Wind damage risk index by tree species

Współczynnik ryzyka uszkodzenia drzewostanu	Gatunek drzewa
0	jarzębina, wierzba, kosówka, jabłoń, grusza
0,5	grab, olsza, akacja, limba, wiąz, brzoza
1	dąb, buk, klon, jawor, jesion
1,5	brzoza, osika, lipa, modrzew
2	sosna
2,5	jodła, dagleżja
3	świerk

Spośród uwzględnionych parametrów, najsilniej na wartość współczynnika ryzyka wpływa cecha X_1 , powiązana ze średnią wysokością, a następnie cecha X_3 , powiązana ze składem gatunkowym drzewostanu. Najsłabszy związek ze współczynnikiem ryzyka wykazuje cecha X_5 , powiązana z czynnikiem zadrzewienia.

Do stałych cech drzewostanu mogących wpływać na powstanie szkód w drzewostanie zaliczono:

- typ siedliskowy lasu,
- rzeźbę terenu, dla gór zwłaszcza: wysokość położenia drzewostanu nad poziomem morza, względne położenie drzewostanu w stosunku do wierzchołka góry, wystawę stoku i jego nachylenie,
- położenie drzewostanu względem skraju lasu,
- otwartą ścianę drzewostanu, względnie jej brak.

Na obecnym etapie budowy modeli ryzyka uszkodzenia drzewostanu wykorzystano jedynie typ siedliskowy lasu, ponieważ jest on zawarty w bazie SILP i jego pozyskanie nie stanowi problemu.

Poszczególnym typom siedliskowym lasu przyporządkowano wartości z zakresu od 0 do 3 według następujących zasad:

- najniższe ryzyko dotyczy typów nizinnych, a najwyższe – górskich,
- w każdej z wymienionych grup typów siedliskowych lasu, ryzyko uszkodzeń wzrasta z nasileniem uwilgotnienia siedlisk.

Zgodnie z wymienionymi zasadami, najniższą wartość współczynnika ryzyka związanego z siedliskiem przydzielono borowi suchemu, najwyższą zaś wilgotnym lasom górskim (tab. 2).

Celem uwzględnienia ryzyka uszkodzenia związanego z siedliskiem przyjęto cechę:

$$X_6 = \frac{W_s}{12} - c_1 \quad [7]$$

gdzie:

- W_s – współczynnik ryzyka uszkodzenia drzewostanu związany z siedliskiem,
- c_1 – wielkość stała; w pracy przyjęto $c_1=0,125$.

Uwzględniając cechę X_6 , koryguje się wartość ryzyka uszkodzenia uzyskaną za pomocą modelu I, a tym samym stosuje się model II:

$$R_2 = R_1 + X_6 \quad [8]$$

Tabela 2.

Współczynniki ryzyka uszkodzenia drzewostanu dla typów siedliskowych lasu
Wind damage risk index by forest habitat types

Współczynnik ryzyka uszkodzenia drzewostanu	Typ siedliskowy lasu
0	Bs
0,5	Bśw
1	BMśw, LMśw, Lśw
1,5	Bw, BMw, LMw, Lw, BMwyż, LMwyż
2	Lł, Ol, OIj, Bb, BMb, LMb, Lwyż, LG, LMG, BG, BMG
2,5	BWG
3	BbG, LłG

Za pomocą powyższego modelu uzyskuje się niższe, niż za pomocą modelu I, wartości ryzyka uszkodzenia drzewostanu dla siedlisk nizinnych i wyższe dla górskich. Model II przyjmuje niższe wartości dla siedlisk suchych, natomiast wyższe dla wilgotnych i bagiennych.

Dla poszczególnych regionalnych dyrekcji Lasów Państwowych przyjęto współczynniki ryzyka uszkodzenia drzewostanów nadleśnictwa z zakresu od 0 do 3. Przy ich ustalaniu oparto się m.in. na danych dotyczących szkód, które wystąpiły w tych dyrekcjach w okresie 1999-2008 [Filipek 2008]. Niskie wartości współczynników przydzielono RDLP Warszawa, wysokie zaś dyrekcjom Wrocław, Katowice, Białystok i Olsztyn (tab. 3). W niektórych dyrekcjach zróżnicowano wartości współczynników dla nadleśnictw, przydzielając wyższe wartości nadleśnictwom położonym nad morzem, a w dyrekcjach Zielona Góra i Poznań, nadleśnictwom położonym na południu (tab. 3). Współczynniki te są podstawą korekty modelu II o cechę X_7 :

$$X_7 = \frac{W_r}{c_2} \quad [9]$$

gdzie:

W_r – współczynnik ryzyka regionalnego uszkodzenia,

c_2 – wielkość stała, w modelu przyjęto $c_2=24$.

$$R_3 = R_2 + X_7 \quad [10]$$

Stosując model III uzyskuje się, w stosunku do modelu II, wyższe wartości współczynnika ryzyka uszkodzenia drzewostanów, zwłaszcza dla regionalnych dyrekcji: Białystok, Olsztyn, Wrocław i Katowice.

Gdy wiatr lub inny czynnik wyrządzą szkody w drzewostanie, wówczas należy oczekiwać ich nasilenia w przypadku wystąpienia kolejnego huraganu. Problem ten uwzględnia model IV, za pomocą którego otrzymuje się współczynnik ryzyka R_4 . W pierwszej kolejności określa się:

$$X_8 = \sum \frac{[10 - (rb - r_i)] \cdot V_i}{30 \cdot H} \quad [11]$$

gdzie:

$i=1, 2, \dots, 10$,

rb – rok bieżący,

r – rok powstania szkody,

V – miąższość drzew zniszczonych przez wiatr (lub inny czynnik) [m^3/ha].

Sumowanie dotyczy 10 ostatnich lat. Cecha X_8 ma ograniczenia. Gdy $X_8 > 1$, to $X_8 = 1$, natomiast gdy wiatr uszkodził cały drzewostan, to $X_8 = 0$.

Tabela 3.

Współczynniki ryzyka regionalnego uszkodzenia drzewostanów (W_r) dla regionalnych dyrekcji Lasów Państwowych

Regional wind damage risk factors for the Regional Directorates of State Forests

RDLP	W_r	RDLP	W_r
Białystok	3	Poznań	0-1
Gdańsk	0-2	Radom	0,5
Katowice	3	Szczecin	0-2
Kraków	1,5	Szczecinek	0-2
Krosno	1,5	Toruń	0,5
Lublin	2	Warszawa	0
Łódź	0-1	Wrocław	3
Olsztyn	3	Zielona Góra	0-1,5
Piła	0,5		

Model ryzyka IV, uwzględniający konsekwencje szkód powstałych wcześniej, ma postać:

$$R_4 = R_3 + X_8 \quad [12]$$

z ograniczeniem, że gdy $R_4 > 3$, to należy przyjąć $R_4 = 3$.

W dalszej części pracy zastosowano pojęcie drzewostanu uszkodzonego. Jest to taki drzewostan, w którym miąższość złomów, wywrotów i posuszu przekroczyła wielkość określoną wzorem:

$$V_k = 1 + \frac{H}{12} \quad [13]$$

gdzie H jest średnią wysokością gatunku głównego.

Ocena modeli ryzyka

Modele ryzyka oceniono na przykładzie sześciu nadleśnictw: trzech położonych na nizinach, gdzie przeważa sosna, i trzech w górach, o dominacji świerka. Dla każdego wydzielenia drzewostanowego danego nadleśnictwa obliczono współczynnik ryzyka uszkodzenia, po czym utworzono 6 klas tej cechy. Dla każdej klasy określono powierzchnię drzewostanów i jej udział w powierzchni całkowitej nadleśnictwa. Następnie obliczono w klasach ryzyka powierzchnię drzewostanów uszkodzonych przez wiatr i wyrażono ją w procentach powierzchni wszystkich drzewostanów zaliczonych do danej klasy (tab. 4).

W pierwszym nadleśnictwie nizinym miała miejsce w 2002 roku potężna wichura, która połamała lub przewróciła drzewa o łącznej miąższości około 72 tys. m³, a szkody odnotowano na 20% powierzchni. Największy udział powierzchniowy mają drzewostany 4 i 5 klasy współczynnika ryzyka uszkodzenia. Występują również drzewostany klasy 6 o ryzyku najwyższym (tab. 4). Wraz ze wzrostem klasy ryzyka, wzrasta w niej udział drzewostanów uszkodzonych. W klasie najwyższego ryzyka stwierdzono 46% powierzchni drzewostanów uszkodzonych. W drugim nadleśnictwie nizinym w wyniku działania w 2007 roku potężnej wichury pozyskano około 47 tys. m³ złomów i wywrotów, a szkody odnotowano na 21% powierzchni. Największy udział mają drzewostany 4 i 5 klasy współczynnika ryzyka, a drzewostany klasy 6 występują na 10% powierzchni. Wyższej klasie współczynnika ryzyka odpowiada większy udział drzewostanów uszkodzonych. W klasie najwyższego ryzyka stwierdzono około 58% powierzchni drzewostanów uszkodzonych. W trzecim nadleśnictwie nizinym wystąpił w styczniu 2007 roku huragan „Cyryl”, w wyniku którego pozyskano około 61 tys. m³ złomów i wywrotów, a szkody odno-

towano na 22% powierzchni. Największy udział mają drzewostany 4 i 5 klasy ryzyka uszkodzenia, a drzewostany klasy 6 występują na 14,5% powierzchni. Wzrostowi klasy ryzyka odpowiada większy udział drzewostanów uszkodzonych. W klasie najwyższego ryzyka stwierdzono około 51% powierzchni drzewostanów uszkodzonych. W czwartym nadleśnictwie, górskim, uszkodzenia spowodował huragan „Cyryl”. Szkody wystąpiły na 43% powierzchni nadleśnictwa, a pozyskanie złomów i wywrotów wyniosło około 100 tys. m³. Największy udział mają drzewostany 6 klasy współczynnika ryzyka, natomiast uszkodzenia dotyczą 66% powierzchni drzewostanów tej klasy (tab. 5). W piątym nadleśnictwie, o uszkodzeniach spowodowanych również przez huragan „Cyryl”, szkody wystąpiły na 33,5% powierzchni, a pozyskanie złomów i wywrotów wyniosło około 110 tys. m³. Największy udział mają drzewostany 5 i 6 klasy współczynnika ryzyka, a uszkodzenia w tych klasach wynoszą odpowiednio 23 i 54% powierzchni. W szóstym nadleśnictwie, górskim, w 2007 roku pozyskano 340 tys. m³ posuszu z 69% powierzchni. Z wielu przyczyn tak olbrzymich szkód do najważniejszych należą pogorszenie się klimatycznego bilansu wodnego [Durló 2007], na co wpłynęła m.in. susza z lipca 2006 roku, powierzchniowe szkody od huraganu z 2004 roku, a także powiązana z tymi czynnikami gradacja kornika drukarza i rozwój chorób infekcyjnych, zwłaszcza opieńkowej zgnilizny korzeni. Największy udział mają drzewostany 6 klasy współczynnika ryzyka, natomiast uszkodzenia dotyczą 87% powierzchni drzewostanów tej klasy.

Tabela 4.

Udział [%] powierzchni łącznej ($Upł$) i drzewostanów uszkodzonych (Upu) w klasach współczynnika ryzyka uszkodzenia drzewostanu R_4 dla badanych nadleśnictw nizinnych

Share [%] of total ($Upł$) and damaged stand area (Upu) in R_4 wind damage risk index classes for the analysed lowland forest districts

R_4		1		2		3	
klasa	zakres	$\overline{Upł}$	\overline{Upu}	$\overline{Upł}$	\overline{Upu}	$\overline{Upł}$	\overline{Upu}
1	0,0-0,5	17,9	1,9	8,8	1,7	6,7	3,2
2	0,5-1,0	7,1	4,7	7,9	5,0	2,5	5,6
3	1,0-1,5	4,7	8,3	4,4	8,4	3,2	9,1
4	1,5-2,0	36,0	22,3	22,7	15,0	23,3	15,7
5	2,0-2,5	29,9	29,7	46,2	22,9	49,8	20,5
6	2,5-3,0	4,5	46,0	10,0	57,9	14,5	51,3
Razem		100	20,1	100	20,7	100	21,9

Tabela 5.

Udział [%] powierzchni łącznej ($Upł$) i drzewostanów uszkodzonych (Upu) w klasach współczynnika ryzyka uszkodzenia drzewostanu R_4 dla badanych nadleśnictw górskich

Share [%] of total ($Upł$) and damaged stand area (Upu) in R_4 wind damage risk index classes for the analysed upland forest districts

R_4		4		5		6	
klasa	zakres	$\overline{Upł}$	\overline{Upu}	$\overline{Upł}$	\overline{Upu}	$\overline{Upł}$	\overline{Upu}
1	0,0-0,5	9,1	4,9	6,5	0,3	3,1	7,3
2	0,5-1,0	5,1	5,0	3,5	5,7	5,9	12,2
3	1,0-1,5	2,5	8,2	2,8	5,9	4,2	21,1
4	1,5-2,0	12,1	19,9	15,0	17,5	5,3	20,8
5	2,0-2,5	22,7	32,6	27,1	23,4	11,4	46,0
6	2,5-3,0	48,5	65,7	45,1	53,6	70,1	86,8
Razem		100	42,6	100	33,5	100	69,0

Z przeprowadzonej analizy wynika, że ze wzrostem klasy współczynnika ryzyka następuje wzrost udziału powierzchni drzewostanów uszkodzonych. Zależność ta jest tym wyraźniejsza, im większy jest udział powierzchni drzewostanów uszkodzonych w nadleśnictwie. Otrzymane wyniki, które należy traktować jako wstępne, wskazują na przydatność modeli ryzyka do przewidywania miejsc o zróżnicowanym stopniu zagrożenia. Najważniejsza informacja dotyczy drzewostanów zaliczonych do klasy najwyższego ryzyka uszkodzenia. Tam w pierwszej kolejności należy podjąć odpowiednie działania, prowadzące do obniżenia ryzyka powstania szkód.

Ocena zagrożenia drzewostanów nadleśnictw RDLP w Krakowie

Dla każdego drzewostanu poszczególnych nadleśnictw RDLP Kraków obliczono współczynniki ryzyka, stosując model IV [wzór 12]. Następnie utworzono 6 klas o szerokości 0,5 każda. Najbardziej zagrożone są drzewostany, które zaliczono do klasy 6, o zakresie współczynnika ryzyka 2,5-3,0. Udział drzewostanów tej klasy przyjęto jako wskaźnik zagrożenia lasów nadleśnictwa (W_{ZN}). Większemu udziałowi powierzchni drzewostanów, a więc większej wartości wskaźnika, odpowiada większe zagrożenie lasów nadleśnictwa (tab. 6).

Udział powierzchni drzewostanów w klasie 6 współczynnika ryzyka waha się od 1,2% w Nadleśnictwie Dąbrowa Tarnowska, do 54,4% w Nadleśnictwie Nowy Targ (tab. 7). Drzewostany pierwszego nadleśnictwa ($W_{ZN}=0$) można zatem uznać za najmniej zagrożone w krakowskiej dystrykcji LP, a drugiego ($W_{ZN}=3$) za zagrożone najbardziej. O małym zagrożeniu Nadleśnictwa Dąbrowa Tarnowska zdecydowały siedliska nizinne oraz wysoki udział sosny, zaś o bardzo dużym zagrożeniu Nadleśnictwa Nowy Targ – siedliska górskie oraz duży udział świerka w składzie gatunkowym drzewostanów. W RDLP Kraków są 3 nadleśnictwa o małym zagrożeniu lasów, 4 o zagrożeniu średnim, 7 o zagrożeniu dużym i 2 nadleśnictwa o zagrożeniu bardzo dużym. Do nadleśnictw o największym zagrożeniu lasów, poza Nadleśnictwem Nowy Targ, należy również Nadleśnictwo Nawojowa.

Powierzchniowy układ drzewostanów wysokiego ryzyka uszkodzenia może mieć charakter losowy, skupiskowy lub mieszany. Groźne są zwłaszcza skupiska drzewostanów wysokiego ryzyka, ponieważ tam uszkodzenie jednego drzewostanu zwiększa prawdopodobieństwo uszkodzenia pozostałych drzewostanów. Wykrycie skupiskowego układu drzewostanów wysokiego ryzyka wymaga analiz przestrzennych, co można przeprowadzić na mapach numerycznych. W trzech nadleśnictwach o małym zagrożeniu ($W_{ZN}=0$) nie wystąpił skupiskowy układ drzewostanów wysokiego ryzyka. Przykładem jest Nadleśnictwo Dębica, w którym drzewostany o największym ryzyku uszkodzenia, zajmujące 4,8% powierzchni, rozmieszczone są losowo (ryc. 1). Z czterech nadleśnictw średnio zagrożonych ($W_{ZN}=1$), we wszystkich stwierdzono skupi-

Tabela 6.

Powiązanie nasilenia zagrożenia lasów nadleśnictwa z wartością wskaźnika W_{ZN} i powierzchnią lasów w najwyższej klasie ryzyka

Relation among intensity of the danger in forest district stands and value of W_{ZN} index and share of afforested areas in the highest risk class

Stopień wskaźnika W_{ZN}	Udział [%] powierzchni drzewostanów w 6 klasie współczynnika ryzyka	Nasilenie zagrożenia lasów nadleśnictwa
0	do 5	małe
1	5-15	średnie
2	15-25	duże
3	powyżej 25	bardzo duże

Tabela 7.

Udział powierzchni drzewostanów w klasach współczynnika ryzyka uszkodzenia drzewostanu (R_4) dla nadleśnictw RDLP Kraków

Share of stand area of trees in wind damage risk factor classes (R_4) for the forest districts of the Cracow Regional Directorate of the State Forests

Nadleśnictwo	Klasa					
	1	2	3	4	5	6
Brzesko	3,6	3,5	2,8	17,4	59,8	12,9
Dąbrowa Tarnowska	9,6	3,6	2,7	19,7	63,2	1,2
Dębica	5,8	3,9	5,9	25,3	54,3	4,8
Gorlice	0,7	1,9	1,1	21,1	61,1	14,1
Gromnik	1,0	1,6	3,2	19,6	57,1	17,5
Krościenko	6,4	3,2	1,2	17,4	49,1	22,8
Krzyszowice	6,4	3,2	1,2	16,7	48,5	24,0
Limanowa	5,3	7,5	6,6	26,6	41,0	13,1
Łosie	2,0	2,4	3,1	13,9	57,0	21,0
Miechów	2,1	1,8	4,5	24,4	60,7	5,7
Mysłenice	5,4	3,3	3,8	25,0	47,2	15,2
Nawojowa	1,5	2,2	2,2	11,3	44,4	38,4
Niepołomice	8,8	4,1	6,8	24,3	54,7	1,3
Nowy Targ	5,2	6,1	1,1	8,8	24,4	54,4
Piwniczna	3,1	2,5	3,5	17,2	51,7	22,0
Stary Sącz	1,7	4,9	2,3	21,3	50,1	19,6



Ryc. 1.

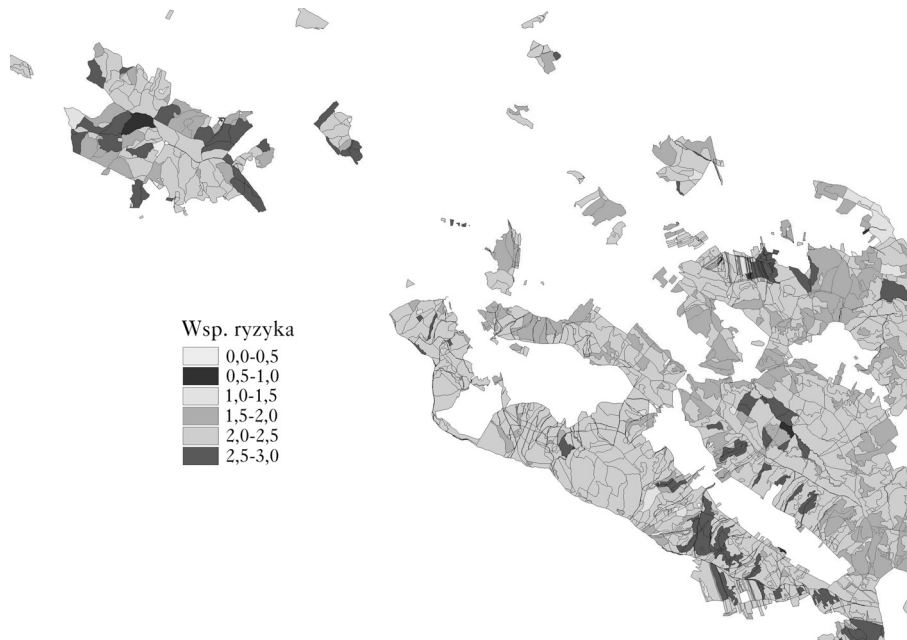
Przestrzenne zróżnicowanie wartości współczynnika ryzyka uszkodzenia drzewostanu w Nadleśnictwie Dębica (część północna)

Spatial distribution of wind damage risk indices for the stands in the Dębica Forest District (northern part)

skowy układ drzewostanów wysokiego ryzyka. Taka sytuacja wystąpiła w Nadleśnictwie Gorlice, w którym drzewostany wysokiego ryzyka zajmują 14,1% (ryc. 2). W pozostałych nadleśnictwach, z dużym i bardzo dużym zagrożeniem drzewostanów ($W_{ZN}=2$ i 3), występuje także skupiskowy układ drzewostanów wysokiego ryzyka. Przykładem jest Nadleśnictwo Łosie o współczynniku ryzyka 21,0% (ryc. 3) i Nadleśnictwo Nawojowa o współczynniku 38,4% (ryc. 4). Ostatnie z wymienionych nadleśnictw, ze względu na duże powierzchnie leśne z drzewostanami największego ryzyka oraz ich rodzaj rozmieszczenia, jest szczególnie silnie zagrożone.

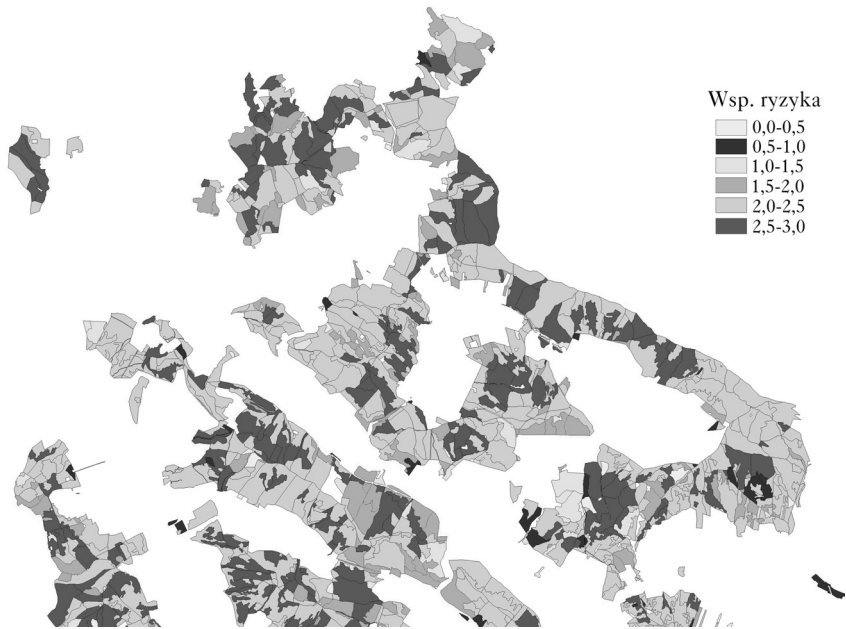
Wnioski

- ✦ W pracy przedstawiono modele ryzyka uszkodzenia drzewostanów przez czynniki abiotyczne, głównie wiatr. Oparte zostały one na zmiennych cechach drzewostanu, jego cechach stałych, położeniu nadleśnictwa w części kraju, powiązanych z prawdopodobieństwem powstawania szkód regionalnych, a także szkodach występujących w drzewostanie w przeszłości.
- ✦ Stosowanie modeli jest mało pracochłonne, ponieważ wykorzystują one dane dla drzewostanu zawarte w Systemie Informatycznym Lasów Państwowych oraz wyniki badań naukowych dotyczących stabilności lasu.
- ✦ Uzyskane za pomocą modeli ryzyka uszkodzenia drzewostanu współczynniki tego ryzyka są silnie skorelowane ze szkodami spowodowanymi zwłaszcza przez wiatr. Modele są zatem przydatne do prognozowania szkód w drzewostanach wywołanych niektórymi czynnikami abiotycznymi.
- ✦ Modele ryzyka uszkodzenia wraz z mapą numeryczną mogą być wykorzystywane do określania przestrzennego rodzaju zagrożeń. Za niekorzystny można uznać skupiskowy układ drzewo-



Ryc. 2.

Przestrzenne zróżnicowanie wartości współczynnika ryzyka uszkodzenia drzewostanu w Nadleśnictwie Gorlice (część północna)
Spatial distribution of wind damage risk indices for the stands in the Gorlice Forest District (northern part)



Ryc. 3.

Przestrzenne zróżnicowanie wartości współczynnika ryzyka uszkodzenia drzewostanu w Nadleśnictwie Łosie (część północna)

Spatial distribution of wind damage risk indices for the stands in the Łosie Forest District (northern part)



Ryc. 4.

Przestrzenne zróżnicowanie wartości współczynnika ryzyka uszkodzenia drzewostanu w Nadleśnictwie Nawojowa (część wschodnia)

Spatial distribution of wind damage risk indices for the stands in the Nawojowa Forest District (eastern part)

stanów wysokiego ryzyka zagrożenia, ponieważ prowadzić on może do wielkopowierzchniowych szkód w nadleśnictwie.

- ✦ Prostym wskaźnikiem zagrożenia lasów nadleśnictwa jest udział powierzchni drzewostanów w najwyższej 6 klasie współczynnika ryzyka (o zakresie od 2,5 do 3). Wyróżniono 4 stopnie tego wskaźnika, gdzie stopień 0 oznacza małe zagrożenie lasów nadleśnictwa, a stopień 3 zagrożenie bardzo duże.
- ✦ Analizy przestrzenne współczynnika ryzyka uszkodzenia drzewostanów, przeprowadzone na mapach numerycznych nadleśnictw będących pod nadzorem RDLP w Krakowie, wskazały, że gdy stopień wskaźnika zagrożenia lasów nadleśnictwa wynosi 1, wówczas występuje duże prawdopodobieństwo powstania skupiskowego układu drzewostanów wysokiego ryzyka zagrożenia. Prawdopodobieństwo to jest bardzo duże, gdy stopień wskaźnika zagrożenia lasów nadleśnictwa wynosi 2 lub 3.
- ✦ Silnie zagrożone są nadleśnictwa, w których stopień wskaźnika zagrożenia lasów nadleśnictwa wynosi 3. Występują w nich bardzo duże skupiska drzewostanów zagrożonych rozpadem, co może spowodować wielkopowierzchniową katastrofę ekologiczną.
- ✦ Wyniki uzyskane za pomocą modeli ryzyka uszkodzenia drzewostanu mogą być podstawą realizacji programu badawczego prowadzącego do ograniczenia wielkości szkód. Można tego dokonać metodami hodowli i urządzania lasu.

Literatura

- Bruchwald A., Dmyterko E. 2010. Metoda określania ryzyka uszkodzenia drzewostanu. *Leśne Prace Badawcze* 2: 165-173.
- Durlo G. B. 2007. Klimatyczny bilans wodny okresów wegetacyjnych w Beskidach Zachodnich. *Acta Agrophysica* 19 (3): 553-562.
- Gil W., Zachara T. 2006. Analiza szkód od wiatru w wybranych drzewostanach świerkowych i sosnowych. *Leśne Prace Badawcze* 4: 77-99.
- Grabowski L. 2008. Szkody od huraganu w 2007 r. w RDLP Wrocław. W: *Klęski żywiołowe w lasach zagrożeniem dla wielofunkcyjnej gospodarki leśnej*. Wyd. „Świat”, Warszawa. 55-71.
- Filipek Z. 2008. Szkody w wyniku zjawisk klęskowych na terenie Lasów Państwowych w ostatnich latach. W: *Klęski żywiołowe w lasach zagrożeniem dla wielofunkcyjnej gospodarki leśnej*. Wyd. „Świat”, Warszawa. 5-13.
- Janusz E. 2008. Szkody od huraganu w 2007 r. w drzewostanach RDLP Łódź. W: *Klęski żywiołowe w lasach zagrożeniem dla wielofunkcyjnej gospodarki leśnej*. Wyd. „Świat”, Warszawa. 14-16.
- Koziński G., Nienartowicz A. 2006. Spatial distribution and extent of damages by wind storms in tree stands of the Tuchola Forest. W: *Kolk A. [red.] Insect outbreaks in managed and unmanaged forests*. IBL, Warszawa. 89-105.
- Mikułowski M. 2002. Problemy zagospodarowania lasu na terenie klęski wiatrowej z lipca 2002 r. w północno-wschodniej Polsce. *Prace Inst. Bad. Leśń. Seria A*. 3 (937-943): 129-133.
- Ni Dhubhain A., Walshe J., Bulfin M., Keane M., Mills P. 2001. The initial development of a windthrow risk model for Sitka spruce in Ireland. 74 (2): 161-170.
- Peltola H. 1996. Model computations on wind flow and turning moment by wind for Scot pines along the margins of clear cut areas. *Forest Ecology and Management* 83: 203-215.
- Peltola H., Kellomäki S. 1993. A mechanistic model for calculating windthrow and stem breakage of *Scots pines* at stand edge. *Silva Fennica* 27, 2: 99-111.
- Szabla K. 2009. Aktualny stan drzewostanów świerkowych w Beskidach i ich geneza. W: *Starzyk J. [red.] Problem zamierania drzewostanów świerkowych w Beskidzie Śląskim i Żywieckim*. Oficyna Wydawniczo-Drukarska „Secesja”, Kraków. 13-43.
- Valinger E., Fridman J. 1998. Modeling probability of snow and wind damage using tree, stand, and site characteristics from *Pinus sylvestris* sample plots. *Scand J. For. Res.* 13: 348-356.
- Valinger E., Fridman J. 1999. Models to assess the risk of snow and wind damage in pine, spruce, and birch forests in Sweden. *Environmental Management* 24 (2): 209-217.
- Zachara T. 2006. Problem szkód w lasach powodowanych przez śnieg i wiatr oraz sposoby przeciwdziałania im. *Sylvan* 150 (10): 56-64.
- Zajączkowski J. 1991. Odporność lasu na szkodliwe działanie wiatru i śniegu. Wydawnictwo „Świat”, Warszawa.
- Zajączkowski J., Mikułowski M., Zachara T., Gil W., Kopyk W. 2004. Możliwości zwiększenia efektywności zabiegów hodowlanych w kształtowaniu odporności lasu na szkodliwe działanie wiatru i śniegu. IBL, Warszawa.
- Zawiła-Niedźwiecki T. 1994. Ocena stanu lasu w ekosystemach zagrożonych z wykorzystaniem zdjęć satelitarnych i systemu informacji przestrzennej. *Prace Instytutu Geodezji i Kartografii* 41.

SUMMARY

Application of wind damage risk models for the assessment of danger to stands within a forest district

The wind damage risk model was based on the assumption that the damage caused by wind to the stand is associated with the following groups of factors: the variable characteristics of the stand, its permanent characteristics, the position of a forest district in the region, the damage that occurred in the stand in the past. The model provides a risk factor for stand damage ranging from 0 to 3. A higher value indicates a higher risk factor for the stand.

The model includes five variable stand characteristics: mean height, age, species composition, mean slenderness (more precisely its inversed value) and stand density index. From among permanent characteristics, only forest habitat type was taken into account, while in further studies topography will also be taken into consideration. For the stands located in north-eastern and south-western part of the country characterized by frequent strong winds in the area of Regional Directorates of the State Forests in Olsztyn, Białystok, Wrocław and Katowice, the model generates higher values of the risk factor. A similar solution was applied to the stands where damage occurred in the past.

The empirical form of the risk model is based on the data obtained from many forest districts, including information about the stand damage caused in January 2007 by the 'Cyril' hurricane (within the Regional Directorates of the State Forests in Wrocław and Katowice):

$$R_4 = 0,505 \cdot X_1 + 0,030 \cdot X_2 + 0,240 \cdot X_3 + 0,160 \cdot X_4 + 0,065 \cdot X_5 + X_6 + X_7 + X_8$$

- R_4 – wind damage risk factor,
- X – symbols associated with stand characteristics,
- X_1 – mean height,
- X_2 – age,
- X_3 – species composition,
- X_4 – mean slenderness,
- X_5 – stocking density,
- X_6 – forest habitat type,
- X_7 – location in the region of the country,
- X_8 – the extent of damage in previous years.

The presented wind damage risk model requires improvement, in particular more precise elaboration of the risk factors on the basis of a more comprehensive empirical material from various regions of the country. Another important task is to extend the risk model by including the characteristics associated with orography.