

LESZEK BOLIBOK, MICHAŁ BRACH, HENRYK SZELIGOWSKI, MICHAŁ ORZECHOWSKI

## Wpływ wysokości otaczającego drzewostanu, wystawy i pochylenia terenu na mikroklimat radiacyjny na gnieździe – wyniki modelowania

Effect of surrounding stand height, terrain aspect and inclination on radiation microclimate on the gap – results of the modelling

### ABSTRACT

Bolibok L., Brach M., Szeligowski H., Orzechowski M. 2015. Wpływ wysokości otaczającego drzewostanu, wystawy i pochylenia terenu na mikroklimat radiacyjny na gnieździe – wyniki modelowania. Sylwan 159 (10): 813-823.

Different kinds of solar radiation (direct, diffuse) shape microclimate of forest gaps and have significant influence on establishment and growth of young trees. Adjustment of the shape and size of artificial gaps could create favourable conditions that meet the demands of particular species. Unfortunately there is lack of publications concerning this topic, which could be used directly for silvicultural planning in Polish conditions. Empirical assessment of radiation regimes in a wide range of different shaped gaps is impossible from practical reasons, so modelling in ArcGis environment was used instead. Gaps of different shape and size were modelled as elliptical depression in terrain by the use digital elevation model. The Solar Radiation tool was used to model direct and global radiation on the bottom of the gaps with area varying between 2 and 50 are surrounded by stands of height between 15 to 35 meters. The outcome of modelling was presented in form of nomograms. Additional series of analyses was created to describe the influence of terrain aspect and inclination on solar radiations supplies on the forest floor in gaps. Presented nomograms could be helpful in silvicultural planning, because they could be used to design artificial gaps with expected solar radiations supplies.

### KEY WORDS

radiation, aspect, inclination, gap size, modelling

### ADDRESSES

Leszek Bolibok <sup>(1)</sup> – e-mail: leszek.bolibok@wl.sggw.pl

Michał Brach <sup>(2)</sup>, Henryk Szeligowski <sup>(1)</sup>, Michał Orzechowski <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Katedra Hodowli Lasu, SGGW w Warszawie; ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

<sup>(2)</sup> Katedra Urządzenia Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa, SGGW w Warszawie; ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

## Wstęp

Odnowianie sztuczne lub naturalne na gniazdach gatunków wymagających zabezpieczenia przeciw szkodom od przymrozków jest bardzo rozpowszechnioną w Polsce praktyką gospodarczą. Nie wiele jest jednak opublikowanych wyników badań dotyczących związku pomiędzy parametrami gniazd (np. wielkością, kształtem lub orientacją przestrzenną, wystawą i nachyleniem terenu) a warunkami wzrostu odnowień [Tomanek 1958, 1974; Magnuski 1975]. Dostęp bezpośredniego

promieniowania słonecznego (obejmującego zarówno światło widzialne, jak i promieniowanie podczerwone) zwiększa ilość ciepła docierającego do gniazda, co ma również wpływ na bilans cieplny powietrza i gleby w tym fragmencie odnawianego drzewostanu [Bolibok, Andrzejczyk 2008; Bolibok i in. 2013]. W większości sytuacji leśnik ma względnie dużą swobodę przy ustalaniu rozmiarów, kształtu i orientacji gniazd, jakie będą wykonywane na odnawianej powierzchni, a co za tym idzie ma potencjalną możliwość dostosowywania warunków świetlnych i termicznych panujących na gniazdach. Ogólnie dostępne wskazówki kładą nacisk na rozmiary gniazda (zazwyczaj powierzchnię) lub na stosunek średnicy gniazda do wysokości otaczającego drzewostanu. Niestety, brak jest bardziej szczegółowych informacji o wpływie parametrów gniazda na warunki w nim panujące.

Doświadczalne określenie związku zmienności wspomnianych parametrów gniazd z warunkami w nich panującymi wymagałoby długotrwałych pomiarów prowadzonych na wielu gniazdach reprezentujących różne warianty analizowanych parametrów, co jest praktycznie niewykonalne. Z tego powodu już od dość dawna próbowano charakteryzować warunki radiacyjne (obejmujące dostęp światła widzialnego i promieniowania podczerwonego) na gniazdach za pomocą modeli opisujących mikroklimat radiacyjny przy osłonie bocznej drzewostanu [Bolibok i in. 2013]. W polskim piśmiennictwie leśnym jako jeden z pierwszych zajął się tym zagadnieniem Graniczny [1952, 1959], jeszcze przed upowszechnieniem się elektronicznych technik obliczeniowych. Złożoność geometryczna omawianych zjawisk (potrzeba wyliczenia położenia słońca nad horyzontem i długości cienia rzucanego przez drzewostan dla dowolnego momentu w roku) sprawia, że konieczne jest modelowanie komputerowe. Modele warunków świetlnych na dnie lasu przy osłonie bocznej znalazły zastosowanie w badaniach hodowlanych: przy analizie wpływu warunków świetlnych na wzrost odnowień na gniazdach [Canham i in. 1990; Coates, Burton 1997; Coates 1998; Bolibok, Andrzejczyk 2008], jak też przy projektowaniu doświadczeń, które miały na celu optymalizację wielkości gniazd [Spittlehouse 2004]. W cytowanych pracach wyniki modelowania odnosiły się do konkretnych wybranych wielkości gniazd bądź luk, w większości w lokalizacjach bardzo odmiennych pod względem szerokości geograficznej od warunków Polski, co ogranicza możliwość wykorzystania tych wyników dla potrzeb doskonalenia cięć gniazdowych w naszym kraju.

Celem pracy jest analiza potencjalnej zmienności warunków radiacyjnych na małych eliptycznych powierzchniach otwartych (o wielkości od około 2 do 50 arów), znajdujących się w drzewostanach o wysokości z zakresu od 15 do 35 metrów, o różnej wystawie i pochyleniu terenu. Jako narzędzie do modelowania warunków radiacyjnych na gniazdach został zastosowany program Solar Analyst, opracowany jako dodatek do programu ArcView [Fu, Rich 2002]. W pracy wykorzystano implementację tego programu w ArcGIS 10.2 występującą pod nazwą Solar Radiation tools.

## **Materiał i metody**

Model Solar Analyst wykorzystuje zlokalizowany geograficznie rastrowy model terenu i wylicza wartości promieniowania docierającego do wybranych pikseli. Do analiz warunków radiacyjnych na gniazdach przyjęto model terenu o wymiarach 200×200 m, dla którego podstawowy piksel miał rozdzielczość 0,5 m. Gniazdo definiowane było jako zagłębienie o pionowych ścianach i głębokości równej wysokości otaczającego drzewostanu, położone w środku modelowanego terenu. W tej konwencji powierzchnia terenu odpowiada górnej powierzchni koron drzewostanu. Założono, że dno gniazda miało takie samo nachylenie i wystawę jak górna powierzchnia koron drzewostanu (powierzchnia terenu). Poprzez odpowiednie zdefiniowanie zagłębienia opisywa-

nego przez numeryczny model terenu zmieniano kształt, orientację i rozmiary eliptycznego gniazda. Stosunek dłuższej osi elipsy do krótszej wynosił 3:2, podobnie jak to często spotyka się w praktyce w drzewostanach gospodarczych. Za pomocą zmian parametrów numerycznego modelu terenu symulowano gniazda wykonane w drzewostanie na terenie płaskim lub pochyłym.

W numerycznym modelu terenu zawarto też informację o szerokości geograficznej, na jakiej położone jest gniazdo. Wartość ta ma podstawowe znaczenie podczas modelowania pozornego ruchu słońca po nieboskłonie. Szerokość geograficzna i wysokość n.p.m. mają potencjalny wpływ na ilość energii słonecznej docierającej do analizowanej lokalizacji. Aby uprościć obliczenia i prezentację wyników, wyłączono to źródło zmienności wyników poprzez modelowanie warunków świetlnych w jednej lokalizacji – przyjęto centralną część kraju (51,82° N, okolice Rogowa). Niezależnie od pochyłości terenu lub jego wystawy środek dna gniazda był zawsze położony na wysokości 190 m n.p.m. Informacja ta jest istotna dla modelowania warunków radiacyjnych, ponieważ wysokość n.p.m. wpływa na długość drogi, jaką pokonuje promieniowanie słoneczne przez atmosferę do dna gniazda [Bolibok i in. 2013]. Podczas obliczeń założono, że intensywność promieniowania rozproszonego dochodzącego z różnych sektorów nieboskłonu zgodna jest z modelem SOC (standard overcast sky).

Wykorzystany do obliczeń model wymaga założenia, jaka część promieniowania słonecznego nie ulega pochłonięciu podczas przechodzenia przez atmosferę. Podczas modelowania przyjęto wartość współczynnika transmisji równą 0,4, zgodnie z wartością podawaną dla Warszawy [Bogdańska, Podogrocki 2000]. Na powierzchni otwartej energia promieniowania całkowitego jest sumą energii niesionej przez promieniowanie bezpośrednie i rozproszone. Udział promieniowania rozproszonego w promieniowaniu całkowitym średnio dla Polski wynosi 50% [Woś 1996], co przyjęto jako wartość domyślną do obliczeń w niniejszym opracowaniu.

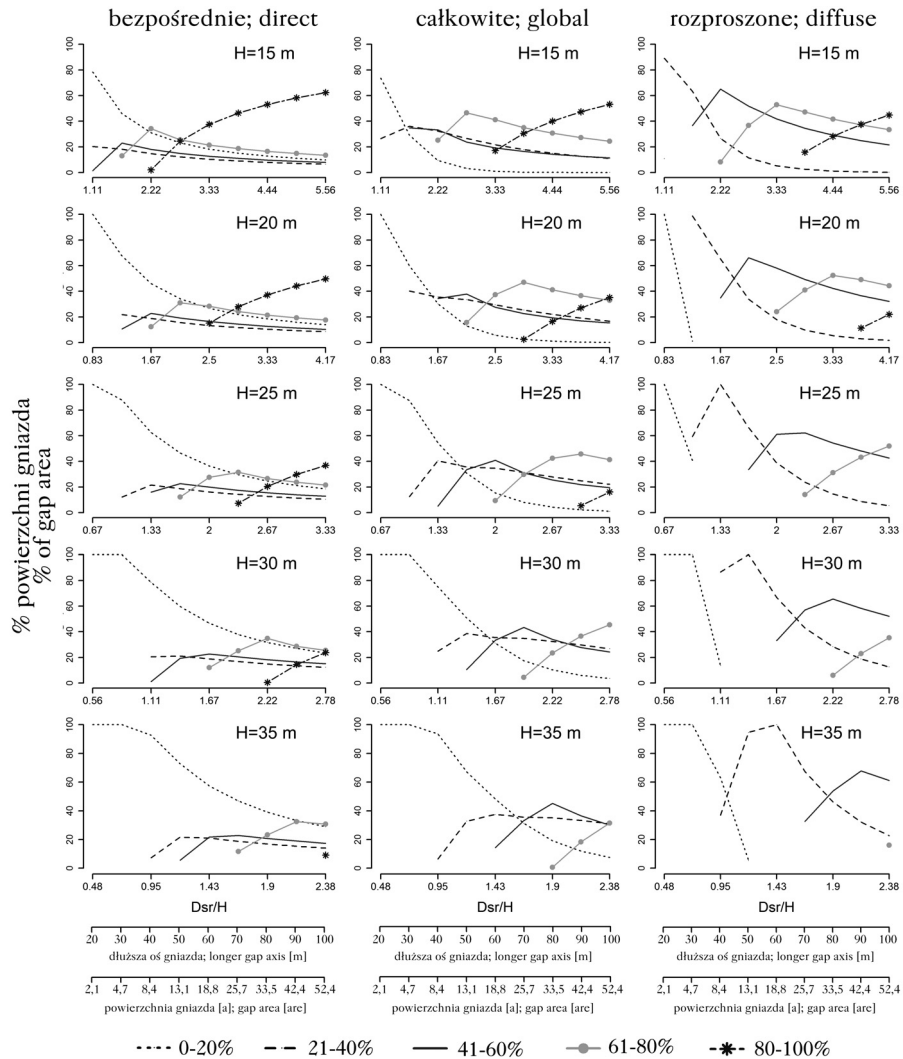
Przeprowadzono dwie serie analiz. W pierwszej modelowano wpływ wysokości otaczającego drzewostanu (od 15 do 35 m) i wielkości gniazda (o stałym kształcie i orientacji) na warunki radiacyjne w nim panujące. W drugiej analizie badano, jaki wpływ na ilość promieniowania docierającego do dna lasu mają pochylenie i wystawa terenu oraz orientacja (N-S, E-W) dłuższej osi eliptycznego gniazda, którego dłuższa oś ma długość 60 m, a krótsza 40 m. W tej analizie przyjęto, że otaczający drzewostan ma 25 m wysokości.

Model wyliczał energię poszczególnych rodzajów promieniowania we wskazanym okresie czasu wyrażoną w  $J/m^2$ . Obliczenia wykonano dla sezonu wegetacyjnego z okolic Rogowa (początek 2 kwietnia i koniec 2 listopada [Chojnacka-Ożga 1999]), przyjmując jako jego początek 1 kwietnia, a jako koniec 31 października. Podczas prezentowania wyników zastosowano konwencję, że są one podawane w wartościach względnych w odniesieniu do powierzchni otwartej. Obliczano, jaki procent energii promieniowania docierającej w analizowanym okresie na powierzchnię otwartą stanowi energia promieniowania docierająca do wybranego fragmentu gniazda.

## Wyniki i dyskusja

Wyniki pierwszej serii analiz (ryc. 1) potwierdzają znaczenie wielkości charakterystycznej gniazda – stosunku średniej średnicy gniazda ( $D_{sr}$ ) do wysokości otaczającego drzewostanu ( $H$ ) – jako miary opisującej panujące w nim warunki. Miara ta najczęściej pojawia się podczas omawiania właściwości mikroklimatu gniazd, a zwłaszcza ich zdolności do zabezpieczania drzewek przed przymrozkami.

Dla analizowanej zmienności wymiarów gniazd i wysokości otaczającego drzewostanu zaobserwowano, że w trzech wariantach analizy gniazda miały taką samą wielkość charakterystyczną – o wartości 3,33 dla dłuższej osi równej 60, 80 i 100 metrów – gdy otaczający drzewostan miał



Ryc. 1.

Udział [%] powierzchni gniazd ze względną (100% = ilość promieniowania docierającego na powierzchnię otwartą) dostępnością promieniowania słonecznego na dnie eliptycznych gniazd o różnej wielkości, lecz stałych proporcjach osi (3:2), położonych na 51,82° N w drzewostanach o wysokości od 15 do 35 m

Share [%] of gap area receiving different levels of relative (100% = solar energy received by open space) solar radiation on elliptical artificial gaps of diverse size but fixed 3:2 proportions between axes located on 51.82° N and surrounded by tree stand of height between 15 and 35 m

Dsr – średnia średnica gniazda, H – wysokość otaczającego drzewostanu  
 Dsr – mean gap diameter, H – height of surrounding stand

odpowiednio 15, 20 lub 25 metrów wysokości. W omawianych wariantach gniazda miały powierzchnię odpowiednio 18,8, 33,5 oraz 52,4 ara (ryc. 1). Mimo tak dużych różnic w wymiarach gniazd modelowanie wykazało, że mają one taką samą zmienność dostępu promieniowania słonecznego na swoim dnie.

Podobieństwo to dotyczyło zarówno promieniowania bezpośredniego, rozproszonego, jak też łącznej podaży promieniowania. Omawiane gniazda są dla wszystkich rodzajów promienio-

wania (mimo różnic w rozmiarach) podobne pod względem procentowego udziału powierzchni dna gniazda z różnym poziomem dostępności promieniowania słonecznego. Również dla gniazd o innych wartościach wielkości charakterystycznej (1,11; 1,57; 2,22) obserwowano taką prawidłowość. Często w wytycznych dotyczących odnawiania różnych gatunków drzew na gniazdach pojawia się zalecana wielkość gniazda wyrażona w arach. Przedstawione wyniki wskazują, że gniazda różniące się blisko trzykrotnie swoją powierzchnią mogą mieć porównywalną zmienność dostępu promieniowania słonecznego przy odpowiedniej różnicy w wysokości otaczającego drzewostanu. Niezależnie od ich powierzchni, na modelowanych gniazdach o wielkości charakterystycznej poniżej 1,43 ponad 57% ich dna otrzymuje poniżej 20% słonecznego promieniowania bezpośredniego docierającego na otwartą powierzchnię. Dna gniazd o wielkości charakterystycznej poniżej 1,43 są słabiej zaopatrzone w promieniowanie bezpośrednie, ale za to podaż promieniowania bezpośredniego jest bardziej wyrównana. Dalszy wzrost wielkości charakterystycznej gniazda powoduje w pierwszym rzędzie zwiększenie zróżnicowania dostępu promieniowania bezpośredniego w obrębie dna gniazda. Gniazda o wielkości charakterystycznej do 2,22 na swoim dnie praktycznie nie mają fragmentów otrzymujących więcej niż 80% słonecznego promieniowania bezpośredniego, ale przy wielkości charakterystycznej 2,92 już 27% powierzchni ich dna ma tak duży dostęp promieniowania bezpośredniego. Dopiero przy wielkości charakterystycznej gniazda powyżej 5,56 ponad połowa powierzchni dna gniazda ma dostęp promieniowania porównywalny do powierzchni otwartej.

W sytuacji braku dostępu światła bezpośredniego potrzeby świetlne roślin mogą być zaspokojone jedynie dzięki światłu rozproszonemu. Przeprowadzona analiza wskazuje, że na małych gniazdach o wielkości charakterystycznej poniżej 0,95 około 63% ich dna otrzymuje mniej niż 20% promieniowania rozproszonego docierającego na powierzchnię otwartą. Wzrost wielkości charakterystycznej gniazda powoduje, że coraz większa część jego dna otrzymuje pomiędzy 20 a 40% promieniowania rozproszonego docierającego do powierzchni otwartej. Dla gniazd o wielkości charakterystycznej pomiędzy 1,19 a 1,43 praktycznie całe ich dno ma taką dostępność promieniowania rozproszonego. Dopiero przy wielkości charakterystycznej powyżej 1,9 zaczynają na dnie gniazd dominować fragmenty o większej dostępności promieniowania rozproszonego.

Zmienność warunków świetlnych na dnie gniazda może mieć duże znaczenie dla rozwoju odnowień naturalnych i sztucznych, dlatego warto przed wycięciem gniazd określić wysokość otaczającego drzewostanu, a potem odpowiednio do potrzeb dostosować ich wymiary. Niektórzy autorzy dość precyzyjnie wskazują zalecaną dla wybranego gatunku wielkość gniazda [Malcolm i in. 2001]. Dla gatunków o mniejszych wymaganiach świetlnych w młodości wystarczające mogą być gniazda o wielkości charakterystycznej 1,2. Dostęp całkowitego promieniowania słonecznego do większości powierzchni ich dna nie przekracza 20% dostępności na powierzchni otwartej. Gniazda o wielkości charakterystycznej z zakresu od 1,2 do 2,14 mają lepszą dostępność promieniowania całkowitego, ale przy wielkości charakterystycznej powyżej tego zakresu zaczyna wyraźnie rosnąć udział powierzchni dna gniazda otrzymującej ponad 60% promieniowania całkowitego dostępnego na powierzchni otwartej. Tak duża dostępność promieniowania słonecznego może w północnej części gniazd niekorzystnie wpływać na niektóre gatunki drzew w sytuacji niedoboru wody w glebie, zwłaszcza w okresie przyjmowania się sadzonek lub kiełkowania nasion. Z tego powodu niektórzy autorzy badań sugerują, że w różnych częściach dużych gniazd optymalne warunki do rozwoju znajdują różne gatunki [Canham i in. 1990]. W praktyce gospodarczej na większych, bardziej wewnętrznie zróżnicowanych gniazdach (o wielkości zazwyczaj od 30 do 50 arów) można rozważyć stosowanie dwóch gatunków, sadząc bardziej cieniożońny w jego części południowej, a bardziej światłożądny w północnej.

Podczas prezentowania wyników drugiej serii analiz, poświęconej wpływowi konfiguracji terenu i orientacji gniazda na dostępność promieniowania słonecznego, przyjęto konwencję, że poziom promieniowania na dnie lasu jest podawany w procentach promieniowania docierającego na płaską otwartą powierzchnię na analizowanej szerokości geograficznej. Na rycinie 2 przedstawione są zmiany udziału powierzchniowego stref na dnie gniazda otrzymujących promieniowanie w zakresie 0-20, 21-40, 41-60, 61-80 i 81-100% promieniowania z otwartej powierzchni. Ten sposób prezentacji wyników podkreśla przestrzenną zmienność dostępu energii promieniowania słonecznego na dnie gniazda. Informacja na temat wpływu parametrów położenia gniazda na całkowitą ilość energii docierającej do jego dna została zamieszczona w tabeli.

Pochylenie i wystawa terenu oraz orientacja gniazda są ważnymi czynnikami modyfikującymi dostępność promieniowania słonecznego do jego dna. Wyniki drugiej analizy (ryc. 2) wskazują, że pochylenie i wystawa terenu zdecydowanie bardziej wpływają na dostępność promieniowania bezpośredniego niż rozproszonego do dna gniazda.

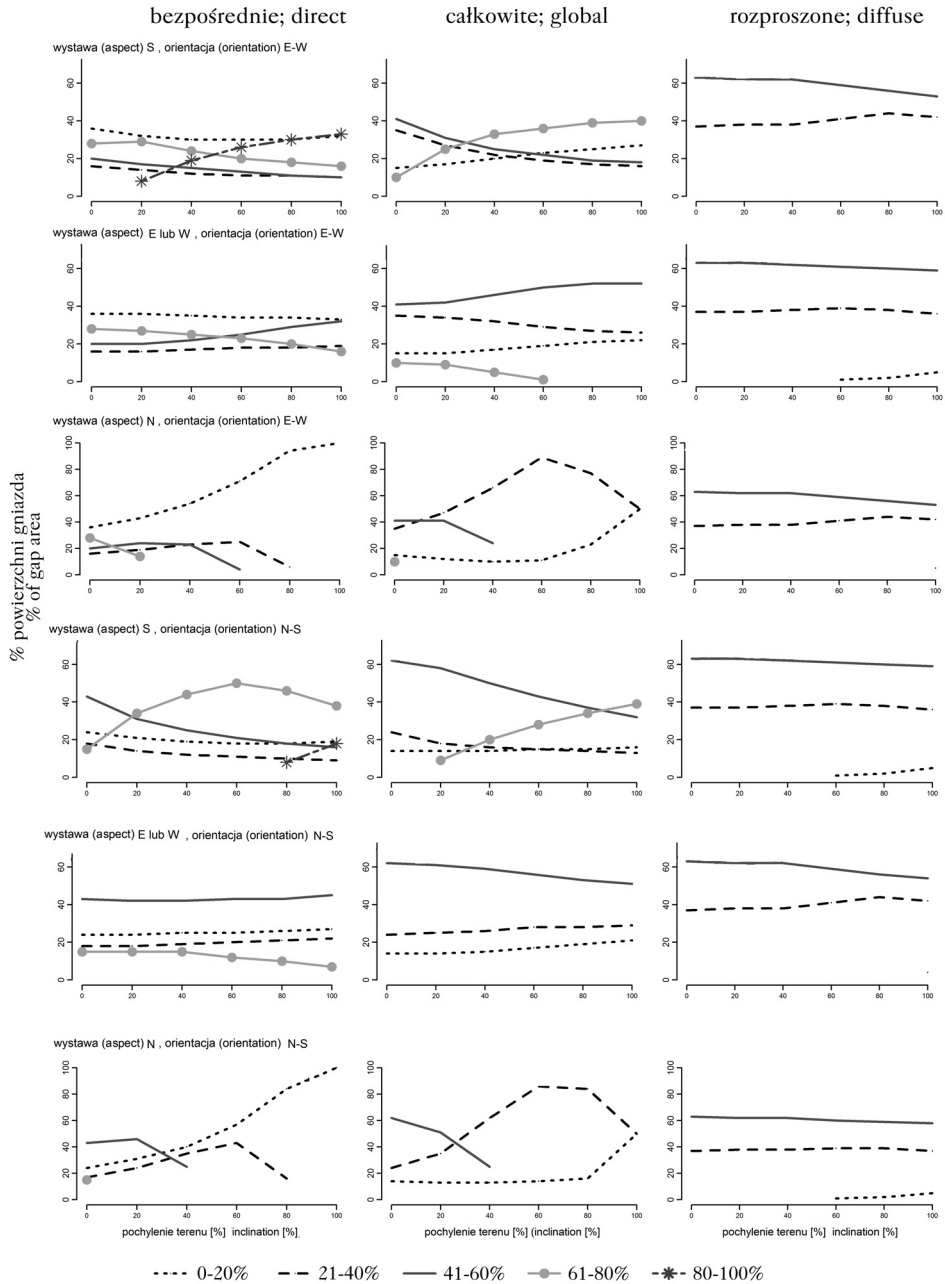
Wyniki modelowania wskazują, że na terenie płaskim orientacja gniazda nie ma wpływu na dostępność promieniowania rozproszonego, co jest zgodne z przyjętym podczas obliczeń modelem SOC (standard overcast sky) opisującym dostępność promieniowania rozproszonego docierającego z różnych sektorów nieba. Wspomniany model zakłada, że promieniowanie rozproszone dociera ze zróżnicowaną intensywnością – zależną od wysokości danego sektora nad horyzontem, ale niezależną od azymutu tego sektora. Zmiany orientacji gniazda na terenie płaskim wpływają tylko na azymut sektorów nieba widocznych na dnie gniazda, ale nie wpływają na ich wysokość kątową. Wzrost nachylenia terenu ogranicza widoczność wyżej położonych sektorów nieboskłonu

**Tabela.**

Względna (100% = teren płaski) energia promieniowania słonecznego docierającego do dna eliptycznych gniazd o wymiarach osi 60x40 m wyciętych w drzewostanie o wysokości 25 metrów na terenie o różnej wystawie i nachyleniu [%]

Relative solar radiation energy supplies (100% = flat terrain) for the bottom of elliptical artificial gaps with axes length 60 and 40 m, surrounded by tree stand of height 25 m on terrain with different aspect and slope [%]

Promieniowanie Radiation	Orientacja dłuższej osi Orientation of longer axis	Wystawa Aspect	Nachylenie Slope					
			0	20	40	60	80	100
Bezpośrednie Direct	E-W	S	100	112,99	116,48	113,23	105,87	96,98
		E-W	100	97,30	90,28	82,09	73,78	66,29
		N	100	78,58	52,92	29,32	11,54	3,00
	N-S	S	100	111,83	115,33	113,17	107,23	99,92
		E-W	100	97,88	91,60	83,13	73,90	65,33
		N	100	81,06	57,42	34,71	16,20	4,02
Całkowite Global	E-W	S	100	105,23	103,62	97,65	89,31	80,51
		E-W	100	97,64	91,06	82,96	74,39	66,54
		N	100	88,41	72,55	56,63	43,19	34,56
	N-S	S	100	104,92	103,61	98,51	91,13	83,38
		E-W	100	97,87	91,52	83,00	73,75	65,11
		N	100	89,43	74,49	59,07	45,37	35,18
Rozproszone Diffuse	E-W	S	100	97,86	91,40	82,85	73,57	64,85
		E-W	100	97,96	91,80	83,79	74,96	66,77
		N	100	97,75	91,21	82,59	73,27	64,56
	N-S	S	100	97,98	91,84	83,80	74,97	66,77
		E-W	100	97,87	91,44	82,87	73,59	64,89
		N	100	97,84	91,60	83,50	74,63	66,43



Ryc. 2.

Udział [%] powierzchni gniazd ze względną (100% = ilość promieniowania docierającego na powierzchnię otwartą) dostępnością promieniowania słonecznego na dnie eliptycznych gniazd o wymiarach 60×40 m, położonych na 51,82° N w drzewostanie o wysokości 25 m rosnącym na terenie o różnej pochyłości i wystawie

Share [%] of gap area receiving different levels of relative (100% = solar energy received by open space) solar radiation on elliptical artificial gaps with axes length 60 and 40 meters, surrounded by tree stand of height 25 meters and located on 51.82° N on terrain with different aspect and inclination

w niektórych partiach dna gniazda i w ten sposób może zmniejszyć dostęp do nich promieniowania rozproszonego. Dla przyjętej wielkości gniazd i wysokości otaczającego drzewostanu na terenie płaskim ponad 62% powierzchni dna gniazda otrzymuje pomiędzy 41 a 60% światła rozproszonego dostępnego na powierzchni otwartej w analizowanej lokalizacji. W miarę wzrostu pochylenia terenu z 0 do 100% obszar gniazda o takich warunkach świetlnych zmniejsza się do około 50-54%. Przy wroście pochylenia terenu widoczny jest niewielki wpływ orientacji i wystawy gniazda na dostępność promieniowania rozproszonego. Najłatwiej prześledzić ten wpływ, analizując wzrost udziału powierzchni dna gniazda otrzymującej mniej niż 20% promieniowania rozproszonego dostępnego na powierzchni otwartej w analizowanej lokalizacji. Przy orientacji dłuższej osi gniazda w kierunku N-S już przy pochyłości terenu równej 60% pewien odsetek powierzchni gniazd położonych na wystawie S i N ma tak bardzo ograniczony dostęp promieniowania rozproszonego. Na wystawie E lub W takie ograniczenia pojawiają się przy pochyłości 100% (45°) (zaznaczone kropką na odpowiednim panelu ryc. 2). Przy orientacji dłuższej osi gniazda w kierunku E-W opisywana zależność przedstawia się odwrotnie. Najbardziej ocienione fragmenty pojawiają się już przy pochyłości terenu 60%, ale na wystawie E lub W, natomiast tak silne ocienienie niektórych fragmentów dna gniazda na wystawie N lub S pojawia się dopiero przy nachyleniu 100%. Odsetek powierzchni dna gniazda otrzymujący mniej niż 20% promieniowania rozproszonego dostępnego na powierzchni otwartej w analizowanej lokalizacji w żadnym analizowanym wariancie nie przekracza 5%. Oznacza to, że praktyczny wpływ interakcji pochylenia, wystawy i orientacji gniazda na dostępność promieniowania rozproszonego jest niewielki.

Nie można tego powiedzieć o wpływie wspomnianych parametrów gniazda na dostępność promieniowania bezpośredniego. Nawet na terenie płaskim orientacja gniazda ma duży wpływ na zróżnicowanie dostępności promieniowania bezpośredniego na jego dnie. Dla analizowanej wielkości gniazda i wysokości otaczającego drzewostanu przy orientacji dłuższej osi gniazda zgodnie z kierunkiem E-W największa część dna gniazda (36%) otrzymuje poniżej 20% promieniowania, a 28% powierzchni dna gniazda otrzymuje 60-80% promieniowania dostępnego na powierzchni otwartej.

Przy orientacji dłuższej osi gniazda zgodnej z kierunkiem N-S największa część dna gniazda (44%) otrzymuje pomiędzy 40 a 60% promieniowania bezpośredniego dostępnego na powierzchni otwartej, a tylko 25% powierzchni dna gniazda otrzymuje poniżej 20% promieniowania bezpośredniego dostępnego na powierzchni otwartej. Znaczenie orientacji dłuższej osi luki dla funkcjonowania mniej i bardziej światłolubnych gatunków drzew potwierdzają niektóre wyniki badań w lasach naturalnych [Poulson, Platt 1989]. Wpływ orientacji gniazda na wzrost odnowień zależny jest od innych czynników, takich jak obecność chwastów, ilość opadów i w niektórych sytuacjach może on być nieistotny [Brang i in. 2005]. Przy orientacji dłuższej osi gniazda N-S na wystawie wschodniej lub zachodniej wzrost pochylenia terenu w małym stopniu wpływa na przestrzenną zmienność dostępu promieniowania bezpośredniego do dna gniazda. Jedynie przy bardzo dużych pochyłościach (60-100%) wyraźnie maleje udział powierzchniowy dna gniazda (z 14 do 6%) otrzymującego 61-80% światła bezpośredniego dostępnego na powierzchni otwartej. W przypadku orientacji dłuższej osi gniazda E-W ten spadek udziału powierzchni dna gniazda o podobnych warunkach dostępu promieniowania jest szybszy i zaczyna się już przy pochyleniu 20%, ale towarzyszy mu wyraźny wzrost udziału powierzchni dna gniazda otrzymującej pomiędzy 41 a 60% promieniowania bezpośredniego dostępnego na powierzchni otwartej.

Ze względu na konfigurację terenu powierzchnia dna gniazda z dużym dostępem promieniowania bezpośredniego na wystawie południowej jest większa niż na wystawie północnej. Tylko na wystawie południowej zastosowany model wskazywał występowanie fragmentów otrzymują-



ych promieniowanie bezpośrednie w ilości przekraczającej 80% ilości otrzymywanej przez płaską powierzchnię otwartą. Orientacja dłuższej osi gniazd może w znacznym stopniu wpływać na odsetek powierzchni tak silnie nasłonecznionej. Przy orientacji E-W najsilniej nasłonecznione rejony pojawiają się już przy pochyleniu 20% (zajmują 7% powierzchni dna gniazd), a ich udział stopniowo wzrasta wraz ze wzrostem pochylenia terenu aż do 32% przy nachyleniu zbocza równym 100% (45°). Przy orientacji dłuższej osi gniazda N-S rejony z tak silnym nasłonecznieniem pojawiają się przy pochyleniu zbocza równym 80%, a maksymalny udział powierzchniowy dna luki z taką insolacją wynosi 17% przy nachyleniu zbocza równym 100%. Do pewnego stopnia wpływ wzrostu pochylenia terenu na warunki radiacyjne na gnieździe można porównać do wpływu, jaki ma zmiana szerokości geograficznej, na której położone jest gniazdo. Wzrost pochylenia na wystawie północnej przypomina „przesunięcie” gniazda na większą szerokość geograficzną, skutkujące zmniejszeniem się dostępności promieniowania do dna gniazda. Wzrost pochylenia na wystawie południowej przypomina „przesunięcie” gniazda na mniejszą szerokość geograficzną (skutkuje wzrostem dostępności promieniowania), ale tylko dla mniejszych pochyłości terenu (tab.).

Również na wystawie północnej stosowanie gniazd o orientacji E-W może zwiększyć powierzchnię gniazda z większym dostępem (61-80% poziomą powierzchnię otwartą) promieniowania bezpośredniego do dna gniazda. Wyniki modelowania wskazują, że to zwiększenie może mieć ograniczone znaczenie, ponieważ dotyczyło małego odsetka powierzchni gniazda i tylko zbocz o nachyleniu mniejszym niż 20%.

Wpływ nachylenia terenu na przestrzenne zróżnicowanie dostępu całkowitego promieniowania słonecznego (podobnie jak w przypadku promieniowania bezpośredniego i rozproszonego) był najmniejszy na wystawie wschodniej lub zachodniej. W przypadku całkowitego promieniowania model wskazuje na mniejsze zróżnicowanie w jego dostępie w obrębie gniazda, podobnie jak to było obserwowane w przypadku promieniowania rozproszonego. Niemniej jednak (podobnie jak w przypadku światła bezpośredniego) zróżnicowanie jest większe na południowej wystawie.

Podczas modelowania przyjęto, że udział promieniowania rozproszonego w promieniowaniu całkowitym otrzymywanym przez powierzchnię otwartą wynosi 50%. W bilansie promieniowania docierającego do całości dna eliptycznego gniazda o osiach 40×60 m, otoczonego drzewostanem o wysokości 25 m i położonego na terenie płaskim udział promieniowania rozproszonego pozostaje na podobnym poziomie (51,26%). Wzrost nachylenia terenu i wystawa modyfikują tę proporcję. Przy nachyleniu terenu równym 100% udział światła rozproszonego w bilansie gniazda jest największy na wystawie północnej i wynosi około 95%, a orientacja gniazda zmienia ten udział nie więcej niż o 1 punkt procentowy. Na wystawie wschodniej i zachodniej, przy omawianym nachyleniu terenu, udział światła rozproszonego w bilansie promieniowania gniazda wynosi około 50%, a na wystawie południowej tylko 40%.

Zgodnie z tabelą wzrost nachylenia terenu oraz wystawa modyfikują nie tylko proporcje pomiędzy rodzajami promieniowania docierającymi do dna gniazda, ale również mają wpływ na sumaryczną ilość energii promieniowania słonecznego docierającej do dna gniazda (zsumowaną dla całej jego powierzchni). Spada ona systematycznie wraz ze wzrostem nachylenia terenu, a wystawa i orientacja gniazda mają bardzo ograniczony wpływ na ten spadek, powodując, że przy pochyleniu terenu 100% ilość promieniowania rozproszonego zawiera się w przedziale od 64,5 do 66,7% ilości, która docierałaby do dna gniazda na terenie płaskim.

Parametry konfiguracji terenu najsilniej wpływają na sumaryczną ilość energii promieniowania bezpośredniego docierającego do gniazda. Na wystawie południowej wraz ze wzrostem

nachylenia terenu przejściowo wzrasta sumaryczna ilość energii promieniowania bezpośredniego, nawet do 116,48% przy nachyleniu terenu równym 40%. Dalszy wzrost nachylenia terenu powoduje spadek ilości promieniowania bezpośredniego do poziomu porównywalnego z ilością energii docierającą do gniazda w terenie płaskim. Na pozostałych wystawach wraz ze wzrostem pochylenia systematycznie spada sumaryczna ilość energii promieniowania bezpośredniego docierającej do dna gniazda. Na wystawie E lub W spadek ten jest umiarkowany – około 66% promieniowania bezpośredniego dociera do dna lasu, ale na wystawie północnej jest on gwałtowny – do dna gniazda dociera zaledwie 3-4% ilości promieniowania bezpośredniego trafiającego tam w terenie płaskim. Spadek ten koresponduje z dużym udziałem promieniowania rozproszonego w bilansie gniazd na wystawie północnej opisywanym poprzednio. Z przedstawionych analiz wynika, że znaczne różnice w sumarycznej ilości energii całkowitego promieniowania słonecznego na poszczególnych wystawach wynikają głównie z różnic w dostępie promieniowania bezpośredniego. Ponieważ promieniowanie bezpośrednie niesie dużo energii cieplnej, omawiane różnice mogą mieć praktyczne znaczenie. Silna insolacja na wystawie południowej może nadmiernie przesuszać powierzchniowe warstwy gleby, utrudniając powstanie odnowień naturalnych na gniazdach, np. świerka [Brang i in. 2005], ale z drugiej strony większy dostęp światła sprzyja w górskich położeniach dobremu wzrostowi na gniazdach bardziej zaawansowanych odnowień tego gatunku [Diaci i in. 2005].

Zmiany orientacji dłuższej osi gniazda powodowały stosunkowo małe zmiany w bilansie energii docierającej do dna gniazd. Orientacja gniazda miała największy wpływ na sumaryczną ilość energii promieniowania bezpośredniego docierającego do gniazd na wystawie północnej przy nachyleniu terenu 60%, ponieważ powodowała różnice rzędu 5 punktów procentowych więcej dla orientacji N-S w porównaniu z orientacją E-W. W pozostałych przypadkach różnice te były mniejsze (rzędu 1-2%). Punktem odniesienia dla tabeli są gniazda na terenie płaskim i dlatego dla gniazd o orientacji N-S i E-W dla pochylenia 0% widnieje taka sama wartość 100%. Porównanie sumarycznej ilości energii docierającej do gniazd o badanych wymiarach na terenie płaskim wskazuje, że dno gniazd o orientacji N-S otrzymuje 102,7% energii otrzymywanej przez gniazda o orientacji E-W.

Opisywane różnice nie wydają się znaczące. Jednakże mimo podobnego poziomu sumarycznej ilości energii otrzymywanej przez gniazda o różnej orientacji poprzednio opisywane różnice w dystrybucji tej energii na powierzchni gniazda mogą sprawić, że warunki wzrostu drzew na tych gniazdach nie będą porównywalne. Ponadto należy zauważyć, że stosunkowo nieduże zmiany parametrów powierzchni otwartej lub wysokości drzewostanu mogą sprawić, że orientacja nabiera dużego znaczenia. Halverson i Smith [1974], analizując dane o zaleganiu pokrywy śnieżnej w okresie wczesnowiosennym na prostokątnym zrębie o szerokości 42 m i orientacji E-W wykonanym w drzewostanie o wysokości 30,5 m, zauważyli, że na wiosnę, gdy zasięg cienia rzucanego przez drzewa kurczy się, proporcjonalnie zmniejsza się grubość i obszar zalegania pokrywy śniegowej, a najszybciej odsłaniana jest północna część zrębu. Dane zebrane dla podobnego zrębu o orientacji N-S wskazują na równomierne i wolniejsze topnienie śniegu, co jest związane z większym ocienieniem tej powierzchni przez otaczający drzewostan.

## Podsumowanie

Przedstawione w postaci nomogramów wyniki modelowania mogą być przydatne w doskonaleniu stosowania rębni gniazdowej. Umożliwiają one przybliżone określenie warunków świetlnych w projektowanych gniazdach. Możliwe jest praktyczne zastosowanie zamieszczonych nomogramów, polegające na tym, że oceniając na ich podstawie wyniki stosowania gniazd w latach ubieg-

łych, można zaprojektować wykonanie gniazd o innym kształcie, zapewniającym w zależności od potrzeb większy bądź mniejszy dostęp promieniowania słonecznego. Zamieszczone nomogramy mogą być również wskazówką dotyczącą różnicowania wielkości gniazd w zależności od nachylenia i wystawy odnawianego terenu.

## Literatura

- Bogdańska B., Podogrocki J. 2000. Zmienność całkowitego promieniowania słonecznego na obszarze Polski w okresie 1961-1995. IMGW, Warszawa.
- Bolibok L., Andrzejczyk T. 2008. Analiza zagęszczenia samosiewów brzozy i sosny na gniazdach na podstawie modelu promieniowania słonecznego. Sylwan 152 (2): 10-19.
- Bolibok L., Brach M., Drozdowski S., Orzechowski M. 2013. Modelowanie warunków świetlnych na dnie lasu. Leśne Prace Badawcze 74: 335-344.
- Brang P. 1998. Early seedling establishment of *Picea abies* in small forest gaps in the Swiss Alps. Can. J. For. Res. 28: 626-639.
- Brang P., von Felten S., Wagner S. 2005. Morning, noon, or afternoon: does timing of direct radiation influence the growth of *Picea abies* seedlings in mountain forests? Annals of Forest Science 62: 697-705.
- Canham C. D., Denslow J. S., Platt W. J., Runkle J. R., Spies T. A., White P. S. 1990. Light regimes beneath closed canopies and tree-fall gaps in temperate and tropical forests. Canadian Journal of Forest Research 20: 620-631.
- Chojnacka-Ożga L. 1999. Długość termicznego okresu wegetacyjnego w lasach doświadczalnych SGGW w Rogowie w latach 1926-1998. W: Klimatyczne uwarunkowania życia lasu. Konferencja naukowa, Zakopane 21-22.05.1999. 127-134.
- Coates K. D. 1998. Tree species response to gap formation in partially-cut interior cedar-hemlock forests of north-western British Columbia. The University of British Columbia.
- Coates K. D., Burton P. J. 1997. A gap-based approach for development of silvicultural systems to address ecosystem management objectives. Forest Ecology and Management 99: 337-354.
- Diaci J., Pisek R., Boncina A. 2005. Regeneration in experimental gaps of subalpine *Picea abies* forest in the Slovenian Alps. European Journal of Forest Research 124: 29-36.
- Fu P., Rich P. M. 2002. A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. Computers and Electronics in Agriculture 37: 25-35.
- Graniczny S. 1952. Badania nad dolesianiem powierzchni pod drzewostanami lukowatymi i nadmiernie przerzedzonymi. PWRiL, Warszawa.
- Graniczny S. 1959. Prosta metoda określania warunków usłonecznienia jednego z podstawowych czynników ekologicznych w hodowli lasu. Sylwan 103 (4): 31-39.
- Halverson H. G., Smith J. L. 1974. Controlling solar light and heat in a forest by managing shadow sources. Raport USDA Forest Service.
- Magnuski K. 1975. Wzrost upraw jodłowych w warunkach rębni zupełnej, częściowej i gniazdowej. Sylwan 119 (10): 16-26.
- Malcolm D. C., Mason W. L., Clarke G. C. 2001. The transformation of conifer forests in Britain – regeneration, gap size and silvicultural systems. Forest Ecology and Management 151: 7-23.
- Poulson T. L., Platt W. J. 1989. Gap Light Regimes Influence Canopy Tree Diversity. Ecology 70: 553-555.
- Spittlehouse D. L. 2004. Forest, Edge, and Opening Microclimate at Sicamous Creek. University of British Columbia Press.
- Tomanek J. 1958. Badania przebiegu temperatury, parowania i opadu w rębni gniazdowej. Sylwan 102 (3): 13-31.
- Tomanek J. 1974. Badania nad mikroklimatem zrębu gniazdowego zupełnego. Sylwan 118 (11): 16-42.
- Woś A. 1996. Zarys klimatu Polski. Wydaw. Naukowe UAM, Poznań.