

Prądnik. Prace Muz. Szafera	24	7–24	2014
-----------------------------	----	------	------

JAKUB WOJKOWSKI, AGATA KOZŁOWSKA

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Ekologii, Klimatologii i Ochrony Powietrza,
al. Mickiewicza 24/28, 30–059 Kraków
e-mail: rmwojkow@cyf-kr.edu.pl

OCENA ENERGII UŻYTECZNEJ WIATRU NA OBSZARZE OJCOWSKIEGO PARKU NARODOWEGO

Wind energy evaluation in the Ojców National Park

Abstract. The paper presents the results of investigations of anemological conditions and wind energy in Ojców National Park. The analysis of spatial differentiation of the anemological conditions was made using the digital elevation model, CORINE, GIS, and regression analysis. For this purpose maps of spatial distribution of surface roughness length, average annual wind speed and wind power at the heights of 10, 20 and 30 m above ground level were developed. The investigations showed that in the analyzed area dominate very weak ($0.5\text{--}2.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) and weak ($2.0\text{--}4.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) winds. The annual sums of wind power average between 44 and 185 $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$.

Key words: anemological conditions, wind speed, wind energy, renewable energy, the Ojców National Park

WSTĘP

Widmo kryzysu energetycznego na świecie powodowanego bardzo szybkim wyczerpywaniem się konwencjonalnych źródeł energii oraz konieczność ograniczania emisji z procesów spalania paliw kopalnych wymusiło poszukiwanie alternatywnych źródeł energii. W poszukiwaniach tych najwięcej uwagi poświęca się na wykorzystanie zasobów odnawialnych źródeł energii (OZE). Źródła te w praktyce stanowią nieograniczony zasób energii i są jednym z istotnych elementów zrównoważonego rozwoju.

Poszukiwanie alternatywnych źródeł energii w obliczu fizycznego wyczerpywania się konwencjonalnych zasobów wpisane jest w strategię wszystkich krajów Unii Europejskiej. Wsparcie dla rozwoju energetyki odnawialnej wyrażone zostało w wielu dokumentach politycznych, prawnych i programach wykonawczych. Podstawowym aktem prawnym zawierającym wytyczne odnośnie rozwoju energetyki odnawialnej jest *Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy 2001/77/WE oraz 2003/30/WE* (Dz. U. UE L 09.140.16). We wstępie do niniejszego aktu zawarte zostało stwierdzenie, iż „w świetle stanowiska zajętego przez Parlament Europejski, Radę i Komisję właściwe jest wyznaczenie obowiązkowych celów krajowych, zgodnie z którymi

we Wspólnocie w 2020 r. ze źródeł odnawialnych pochodzić będzie 20% energii i 10% w sektorze transportu”. Również w Polsce od dawna dostrzega się potrzebę zwiększenia wykorzystania OZE. Jednak w praktyce udział OZE w zużyciu energii ogółem nadal jest w Polsce niewielki w porównaniu z innymi krajami Unii Europejskiej.

Z analizy dokumentów planistycznych i strategicznych poszczególnych województw na lata 2014–2020 wynika, że wszystkie regiony Polski postrzegają energetykę odnawialną jako ważny element rozwoju regionu do 2020 r. W uchwalonej we wrześniu 2011 r. „Strategii rozwoju województwa małopolskiego 2011–2020”, energetykę odnawialną uwzględniono w jednym z priorytetowych celów regionu, tj. poprawie jakości powietrza poprzez wzrost poziomu wykorzystania OZE.

Niniejsza praca poświęcona została ocenie zasobów energii użytecznej wiatru na obszarze Ojcowskiego Parku Narodowego (OPN) oraz w jego bezpośrednim sąsiedztwie. Na analizowanym obszarze możliwość budowy dużych elektrowni wiatrowych jest wykluczona. Regulują to przepisy *Ustawy o ochronie przyrody z dnia 16 kwietnia 2004 r.* (Dz.U. 2004 nr 92 poz. 880), która w art.15 pkt.1 jednoznacznie rozstrzyga, iż na terenie każdego parku narodowego obowiązuje całkowity zakaz budowy lub rozbudowy obiektów budowlanych i urządzeń technicznych, z wyjątkiem obiektów i urządzeń służących celom parku narodowego (Radecki 2007). Przepisy te jednak dotyczą większych przemysłowych elektrowni wiatrowych. Instalacja małych przydomowych wiatraków wytwarzających energię elektryczną na potrzeby indywidualnego gospodarstwa byłaby na tym terenie jak najbardziej możliwa.

Ocena potencjału energii odnawialnej jest bardzo ważnym i potrzebnym zadaniem. Wiarygodne dane o potencjale energetycznym danego miejsca są podstawową informacją podczas planowania i podejmowania decyzji o lokalizacji inwestycji z zakresu energetyki odnawialnej. Wiedza na temat potencjału energii wiatru możliwego do wykorzystania jest bardzo istotną i cenną informacją w procesie sporządzania oceny opłacalności ekonomicznej i podejmowaniu decyzji o budowie elektrowni wiatrowej.

Głównym celem niniejszej pracy była ocena potencjału energii użytecznej wiatru pod kątem instalacji elektrowni wiatrowej o niewielkiej mocy (od kilku do max kilkunastu kW). W celach szczegółowych starano się określić jaki jest przestrzenny rozkład prędkości wiatru, przestrzenne zróżnicowanie szorstkości podłoża oraz rozkład energii użytecznej wiatru w profilu wysokościowym.

MATERIAŁY I METODY

W pracy wykorzystano wyniki obserwacji prędkości i kierunku wiatru na stacji meteorologicznej w Ojcowie z okresu 1990–2013. Stacja ta położona jest na środku dna głęboko wciętej Doliny Prądnika na wysokości 322 m n.p.m. (19°49'44"E, 50°12'35"N). Reprezentuje ona warunki wiatrowe Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej jakie kształtują się w dnach dolin. W miejscu lokalizacji stacji dolina przebiega z kierunku północnego na południe i charakteryzuje się płaskim dnem oraz stromymi zboczami o ekspozycji wschodniej i zachodniej. Szerokość dna doliny w tym miejscu wynosi około 150 m, a głębokość dochodzi do 100 m. Obserwacje i pomiary w Ojcowie wykonywane były przy użyciu wiatromierza Wilda zainstalowanego 10 m nad powierzchnią gruntu w trzech standardowych dla stacji klimatologicznych terminach – o godzinie 6.00, 12.00 i 18.00 czasu uniwersalnego UTC (tj. 7.00, 13.00 i 19.00 czasu zimowego oraz 8.00, 14.00 i 20.00 czasu letniego).

Uzyskanie wiarygodnej informacji o potencjale energetycznym analizowanego obszaru wyłącznie na podstawie danych pochodzących ze stacji meteorologicznej w Ojcowie byłoby obciążone dużym błędem z uwagi na położenie stacji na dnie doliny. W związku z powyższym postawiony cel pracy starano się osiągnąć w oparciu o numeryczne modelowanie i analizę fragmentarycznych danych z innych pobliskich miejscowości położonych na wierzchołach Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej w Białym Kościele (400 m n.p.m., 19°50'00"E, 50°10'00"N) i Garlicy Murowanej (270 m n.p.m., 19°55'51"E, 50°08'30"N).

W niniejszej pracy bardzo pomocne okazały się Geograficzne Systemy Informacyjne (GIS), które umożliwiły wykonanie modelowania i uzyskanie informacji o przestrzennym zróżnicowaniu potencjalnej wielkości energii wiatru. Do wymodelowania rozkładu przestrzennego prędkości wiatru posłużono się numerycznym modelem terenu (NMT) o rozdzielczości przestrzennej 20 m. NMT został opracowany na podstawie fotogrametrycznego pomiaru zdjęć lotniczych w skali 1: 26 000, wykonanych w ramach projektu PHARE (WODGiK).

Do analizy zróżnicowania przestrzennego długości szorstkości podłoża wykorzystano dane pochodzące z projektu Coordination of Information on the Environment (CORINE). Projekt CORINE jest to system informacji nadzorowany przez Europejską Agencję Środowiskową (EEA), którego zadaniem jest koordynacja prac w zakresie zbierania i udostępniania informacji o środowisku w Europie. System ten zawiera bazę danych składającą się z kilkunastu warstw tematycznych, zawierających między innymi dane o pokryciu terenu i sposobach użytkowania ziemi – CORINE Land Cover 2006 (CLC2006) o rozdzielczości przestrzennej 100 m/piksel. Dane CLC2006 powstały w wyniku klasyfikacji nadzorowanej zdjęć satelitarnych zarejestrowanych przez satelity LANDSAT, SPOT i IRS. Spośród wszystkich 44 klas pokrycia i użytkowania terenu wyróżnionych w CLC2006, w Polsce występuje 31 klas, a na analizowanym obszarze OPN 6 klas (zabudowa, las liściasty, las iglasty, pola uprawne, łąki i wody).

Badaniami objęto obszar OPN wraz z jego bezpośrednim sąsiedztwem o rozciągłości południkowej pomiędzy 50°09'06"N i 50°15'27"N oraz rozciągłości równoleżnikowej pomiędzy 19°44'45"E i 19°53'26"E. Wszystkie obliczenia oraz wizualizację wyników analizy wykonano przy pomocy oprogramowania SAGA GIS v. 2.1 oraz ArcGIS v. 10.0. Dane przestrzenne zapisane zostały w Państwowym Układzie Współrzędnych Geodezyjnych Płaskich 1992.

WARUNKI ANEMOLOGICZNE

Główną przyczyną kształtowania się warunków anemologicznych na badanym obszarze są czynniki cyrkulacyjne powodujące dużą zmienność typów pogody. Wiąże się to z bardzo częstym i aktywnym przepływem powietrza z zachodu i stosunkowo szybkim przemieszczaniem się kolejnych układów barycznych, którym towarzyszy duża zmienność i nieregularność stanów atmosfery.

Analizując kalendarz typów cyrkulacji atmosfery dla Polski południowej opracowany przez Niedźwiedzia (2013) można stwierdzić, że pogodę na badanym obszarze, w tym również warunki anemologiczne, przez średnio 45% dni roku kształtuje cyrkulacja zachodnia (NW, W, SW) a w 28% południowo-wschodnia (SE) i północno-wschodnia (NE) co mocno wpływa na dominujące kierunki wiatru. Układy wyżowe występują w 52% dni natomiast fronty atmosferyczne, charakteryzujące się wzrostem prędkości wiatru, przemieszczają się w 31% dni roku.

Według Atlasu klimatu Polski (Lorenc 2005) obszar badań na wysokości 10 m n.p.g. w terenie otwartym o klasie szorstkości 0–1 charakteryzuje się średnią roczną prędkością wiatru na poziomie $3,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Wartość ta wydaje się być nieco zawyżona o czym świadczą prace innych autorów (Brzeźniak 1974; Klein 1974; Jaros 2003; Partyka, Caputa 2009; Kozłowska 2014) jak również wyniki obserwacji prędkości wiatru na stacji meteorologicznej w Lepiance Czajowskiej (Caputa 2014) i Garlicy Murowanej (Wojkowski 2014).

Ważnym wskaźnikiem warunków anemologicznych jest procentowy udział cisz atmosferycznych w roku. Według Lorenc (2005) udział występowania cisz na analizowanym obszarze wyniósł 20%. Jako dominujący kierunek wiatru dla tego obszaru Lorenc (2005) podaje kierunek południowo-zachodni z 20% częstością występowania.

Również podawane przez Lorenc (2005) wartości rocznej sumy energii użytecznej wiatru w porównaniu do badań innych autorów, wydają się być stosunkowo wysokie. Wynika to prawdopodobnie z zawyżonych wartości prędkości wiatru o czym wspomniano powyżej. Według Lorenc (2005) na wysokości 10 m n.p.m. w terenie otwartym i klasie szorstkości 0–1 roczna suma energii wiatru wynosi od 250 do $500 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$. Tak duże wartości mogą również wynikać z małej skali mapy (regionalnej), która uogólnia warunki anemologiczne i zacierza różnice kształtowane przez lokalne warunki.

Według opracowanej przez Lorenc (2001) mapy stref energetycznych wiatru w Polsce, potencjał energetyczny wiatru na analizowanym obszarze klasyfikuje go do strefy IV niekorzystnej. Strefa ta charakteryzuje się roczną sumą energii wiatru na wysokości 10 m n.p.g. w przedziale od 250 do $500 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$, a na wysokości 30 m n.p.g. w przedziale od 500 do $750 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$.

Analiza wyników pomiarów prędkości wiatru na stacji meteorologicznej w Ojcowie za okres 1990–2013 wykazała, że średnia roczna prędkość wiatru jest stosunkowo mała i wynosi $0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (tab. 1). Najmniejszymi prędkościami wiatru, poniżej średniej rocznej wartości, charakteryzowały się miesiące letnio-jesienne z minimum we wrześniu $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Najwyższe prędkości wiatru obserwowano od stycznia do maja, z maksimum w marcu i kwietniu, które wyniosło $0,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Tabela 1. Średnie miesięczne prędkości wiatru ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) w Ojcowie w okresie 1991–2013

Table 1. Mean monthly values of wind speeds in Ojców in the period 1991–2013

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok / Year
0,7	0,8	0,9	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5	0,4	0,6	0,6	0,7

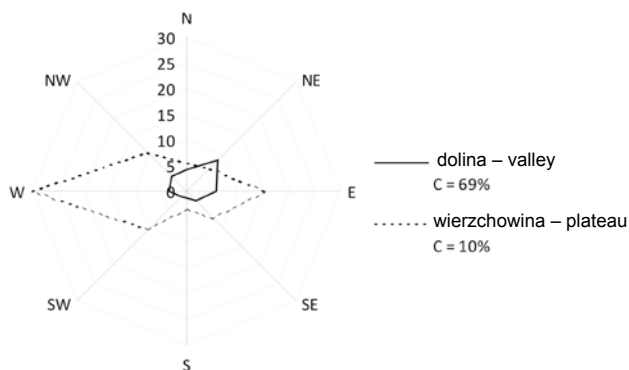
Obserwowane małe prędkość wiatru wynikają z położenia Ojcowia na dnie głęboko wciętej Doliny Prądnika (kanion krasowy), które charakteryzuje się bardzo dużym udziałem cisz wynoszącym 69% wszystkich obserwacji (1991–2013). Dodatkowym czynnikiem przyczyniającym się do powstawania cisz wietrznych w Ojcowie jest południkowy przebieg Doliny Prądnika, który w warunkach przeważającego napływu powietrza z sektora zachodniego znacznie ogranicza jego prędkość przepływu.

Wyniki pomiarów prędkości wiatru na pobliskich stacjach meteorologicznych w Garlicy Murowanej i Lepiance Czajowskiej wykazują, że na wierzchołkach średnie roczne prędkości wiatru są wyższe o około $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ niż w dnach dolin, a udział cisz jest znacznie mniejszy i zwykle nie przekracza 25% (Klein 1974; Caputa 2014; Wojkowski 2014).

Rzeźba terenu modyfikuje w istotny sposób nie tylko prędkość wiatru ale również jego kierunek. Rozkład kierunków wiatrów w dolinie i na wierzchołkach przedstawiono na rycinie 1. Przebieg Doliny Prądnika sprawia, że kierunki wiatrów na dnie doliny znacz-

Ryc. 1. Częstość kierunków wiatru i cisz w % na dnie doliny w Ojcowie (1991–2013) oraz na wierzcholinie w Białym Kościele (1954–1967)

Fig. 1 Frequency of wind direction and calms in % at the valley bottom in Ojców (1991–2013) and at the plateau in Białym Kościele (1954–1967)



nie odbiegają od cyrkulacji powietrza w wolnej atmosferze i wiatry dostosowują się do jej przebiegu. W Ojcowie w analizowanym wieloleciu 1991–2013 największą częstością występowania charakteryzowały się wiatry północno-wschodnie (9%). Rzadziej obserwowano wiatry z kierunku północnego (4%) i północno-zachodniego (4%) oraz wschodniego (6%). Stosunkowo najmniejszą częstością charakteryzowały się wiatry południowe (1%) i południowo-zachodnie (1%). Prowadzone w latach 1954–1967 obserwacje wiatru w Białym Kościele wykazały, że w rozkładzie kierunków wiatru na wierzcholinie największy udział mają wiatry zachodnie (30%) i wschodnie (15%). Najrzadziej natomiast pojawiają się wiatry południowe (4%) oraz północne (6%).

WYNIKI

Wiatr należy do tych elementów meteorologicznych, które charakteryzują się bardzo dużą zmiennością zarówno w czasie jak i przestrzeni ponieważ zależy od czynników cyrkulacyjnych i geomorfologicznych. Rozkład przestrzenny prędkości wiatru na danym obszarze można uzyskać na podstawie interpolacji danych pochodzących z bezpośrednich pomiarów na stacjach meteorologicznych. W przypadku braku na danym obszarze niezbędnej liczby stacji do wykonania przestrzennej interpolacji można posłużyć się ekstrapolacją zależności korelacyjnych uzyskanych na podstawie analizy przestrzennej regresji.

Szorstkość podłoża

Lokalne warunki anemologiczne zależne są między innymi od struktury pokrycia i użytkowania danego obszaru. Strukturę tą można scharakteryzować za pomocą wielkości fizycznej zwanej długością szorstkości podłoża z_0 . Długość szorstkości oznacza maksymalną wysokość nad poziomem gruntu, na której teoretycznie strumień powietrza jest całkowicie wyhamowany przez podłoże, a więc prędkość wiatru przyjmuje wartość równą $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Długość szorstkości podłoża przedstawia zatem aerodynamiczny opór jaki napotyka wiatr przepływający nad danym obszarem powodując spadek jego prędkości. Wpływa ona również na pionowy profil prędkości wiatru. Im większa będzie szorstkość danego obszaru, tym większy obserwowany będzie przyrost prędkości wiatru wraz z wysokością.

Dla analizowanego obszaru długość szorstkości podłoża wyznaczono na podstawie bazy danych CORINE. W tym celu wyróżnionym w CORINE kategoriom pokrycia i użytkowania przypisane zostały długości szorstkości zgodnie z *Rozporządzeniem Ministra*

Środowiska z dnia 26 stycznia 2010 r. w sprawie wartości odniesienia dla niektórych substancji w powietrzu (Dz.U. 2010 nr 16 poz. 87). W wyniku reklasyfikacji mapy pokrycia i użytkowania CORINE otrzymano rozkład przestrzennego zróżnicowania długości szorstkości na analizowanym obszarze (ryc. 2).

Prędkość wiatru

Badania klimatyczne wykazują, że w skali lokalnej średnia roczna prędkość wiatru zależy między innymi od takich czynników jak wysokość bezwzględna, ekspozycja i forma terenu. Dla analizowanego obszaru związku pomiędzy czynnikami geomorfologicznymi a średnią roczną prędkością wiatru przedstawił w swoich pracach Hess (1965, 1969; Hess i in. 1987).

Do wyznaczenia rozkładu przestrzennego prędkości wiatru posłużono się numerycznym modelowaniem, które wykonano za pomocą GIS. Wykorzystano w tym celu dane przestrzenne opisujące rzeźbę terenu (NMT) oraz przedstawione przez Hessa (1965, 1969; Hess i in. 1987) związku pomiędzy czynnikami geomorfologicznymi, a średnią roczną prędkością wiatru na wysokości 10 m n.p.g. Wynik modelowania poddano walidacji w oparciu o dane pomiarowe ze stacji meteorologicznej w Ojcowie i Garlicy Murowanej. Przestrzenny rozkład średniej rocznej prędkości wiatru na wysokości 10 m n.p.g uwzględniający modyfikujący wpływ szorstkości podłoża przedstawiono na rycinie 3.

Prędkość wiatru w profilu wysokościowym

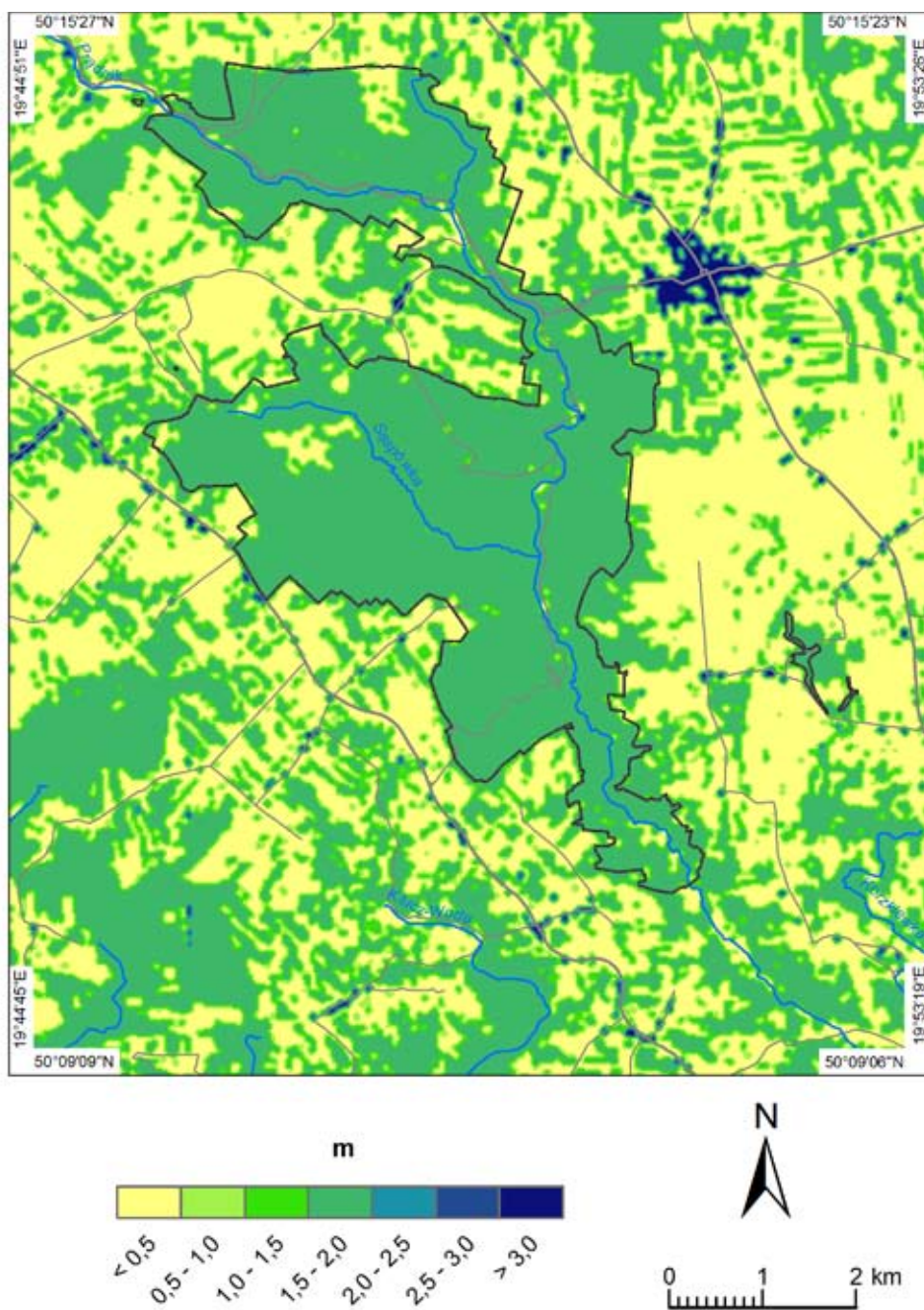
Prędkość wiatru wzrasta wraz z wysokością nad powierzchnią gruntu. Wzrost ten jest uzależniony od szorstkości podłoża i stanu równowagi atmosfery. Przy powierzchni ziemi prędkość wiatru jest niemal równa zero, co jest spowodowane siłami tarcia wynikającymi z szorstkości podłoża. Zależność prędkości wiatru od wysokości nad powierzchnią gruntu najczęściej opisywana jest za pomocą empirycznej formuły potęgowej lub logarytmicznej. W niniejszej pracy wykorzystana została formuła logarytmiczna (Soliński i in. 2010), którą przedstawia poniższe równanie (1):

$$V_h = V_0 \left(\frac{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_0}{z_0}\right)} \right) \quad (1)$$

gdzie:

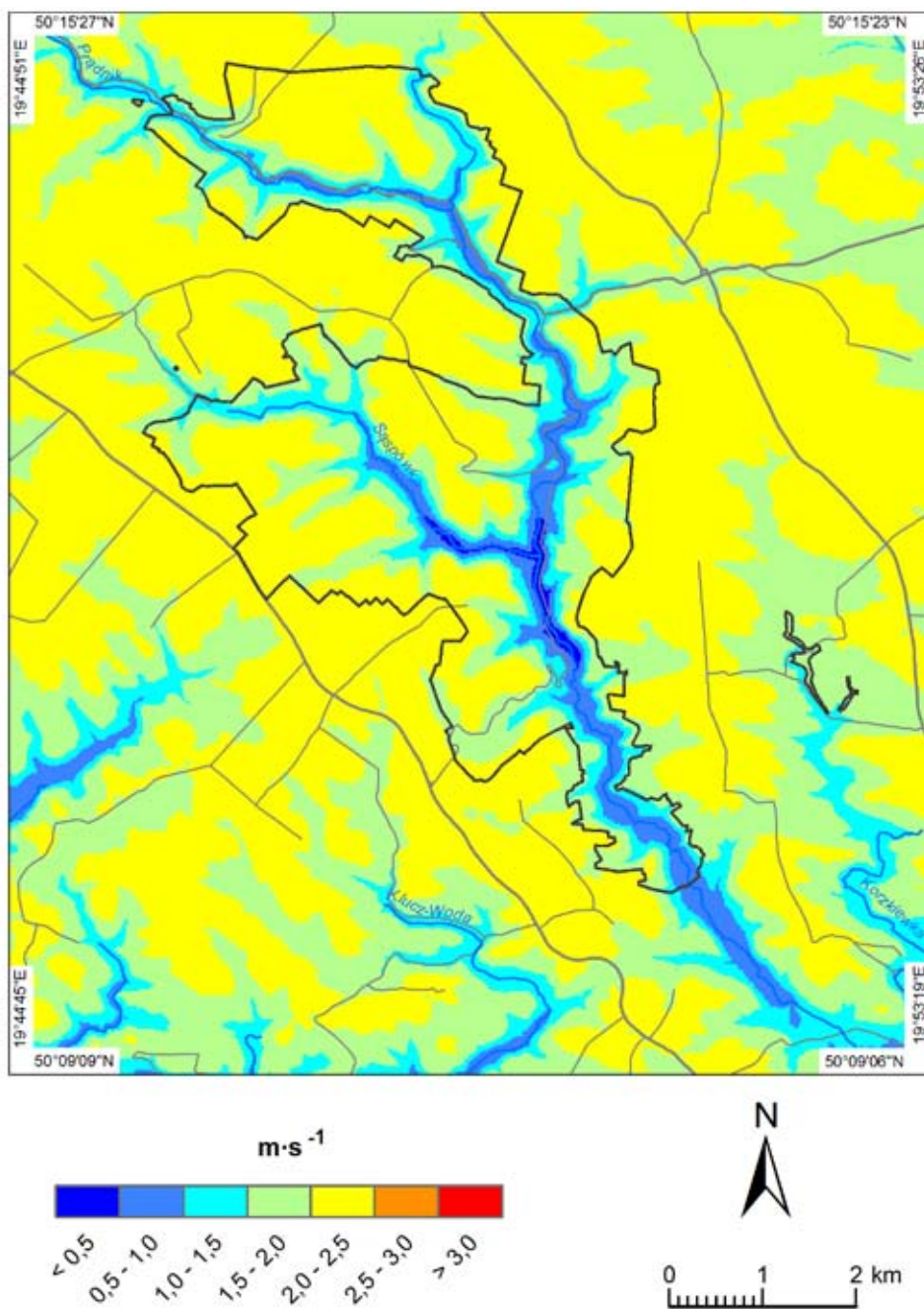
- V_h V_h – prędkość wiatru obliczana na wysokości h h [m·s⁻¹],
- V_0 V_0 – prędkość wiatru zmierzona na wysokości h_0 h_0 [m·s⁻¹],
- h h – wysokość na której obliczana jest prędkość wiatru V_h V_h [m],
- h_0 h_0 – wysokość pomiaru prędkości wiatru V_0 V_0 [m],
- z_0 z_0 – długość szorstkości podłoża [m].

Zgodnie z równaniem (1) wymodelowano przestrzenne rozkłady średniej rocznej prędkości wiatru na wysokości 20 i 30 m n.p.g (ryc. 4 i 5). W obliczeniach ograniczono się maksymalnie do wysokości 30 m n.p.g. ponieważ ocenę zasobów przeprowadzono pod kątem małej energetyki wiatrowej.



Ryc. 2. Długość szorstkości podłoża (m)

Fig. 2. Surface roughness length (m)



Ryc. 3. Średnia roczna prędkość wiatru ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) na wysokości 10 m n.p.g.

Fig. 3. Mean annual wind speeds ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) at height of 10 m above ground level

Energia użyteczna wiatru

O wielkości zasobów energetycznych wiatru decyduje prędkość przepływającego powietrza, gęstość powietrza oraz powierzchnia przez którą przepływa strumień powietrza. Wielkość energii użytecznej wiatru w kWh na powierzchnię 1 m^2 , możliwą potencjalnie do uzyskania w ciągu roku można obliczyć zgodnie z poniższym równaniem (2) (Soliński i in. 2010):

$$E_u = 4,38 \cdot \rho \cdot V^3 \quad (2)$$

gdzie:

E_u – roczna suma energii użytecznej wiatru [$\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$],

ρ – gęstość powietrza [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], $\rho = 1,25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,

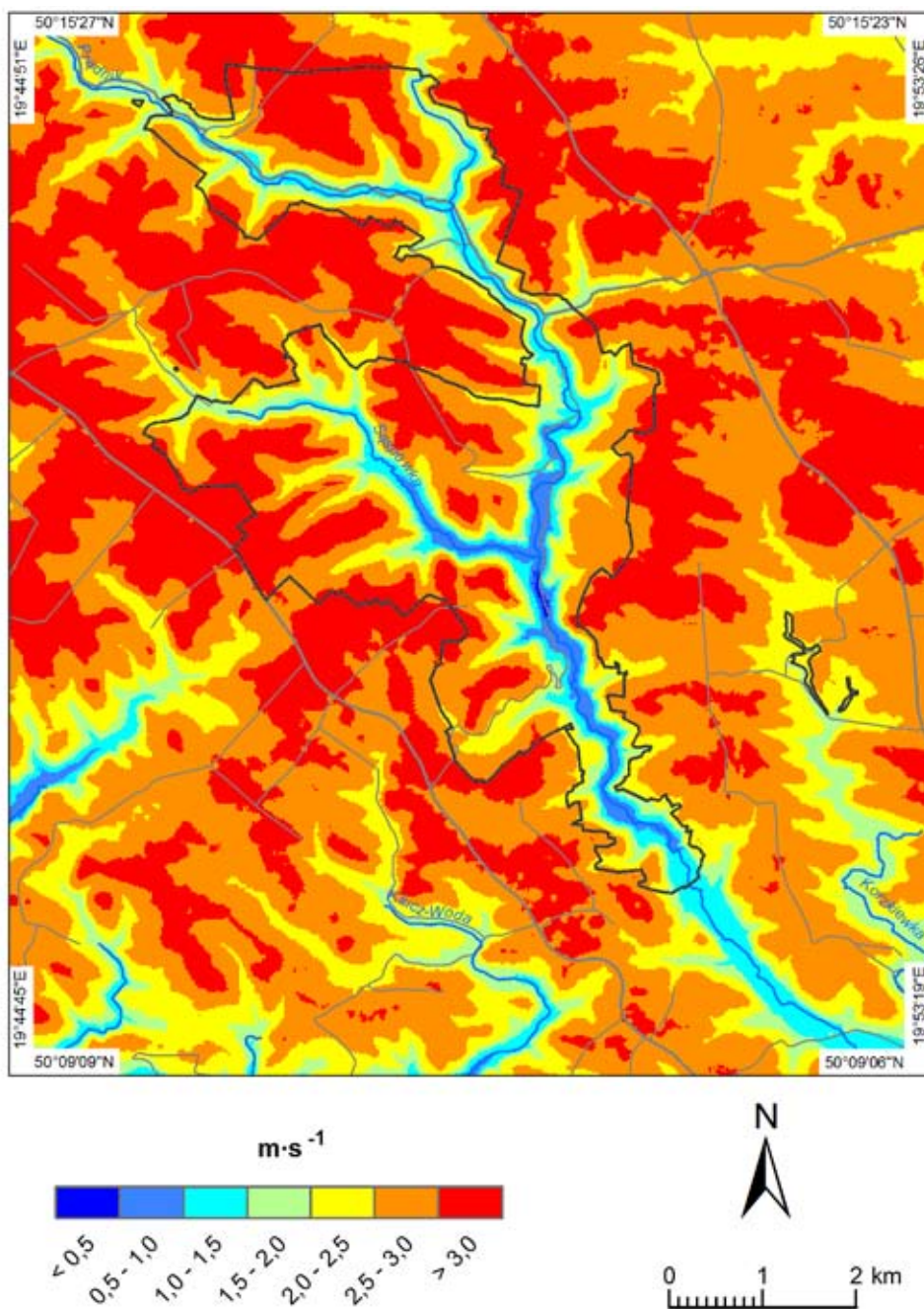
V – średnia roczna prędkość wiatru [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

Wymodelowane zgodnie z równaniem (2) przestrzenne rozkłady rocznej sumy energii użytecznej wiatru na wysokości 10, 20 i 30 m n.p.g. przedstawiają ryciny 6, 7 i 8.

Jak wynika z przeprowadzonych obliczeń rozkład prędkości wiatru, a tym samym również energii wiatru, charakteryzuje się na analizowanym obszarze stosunkowo dużym zróżnicowaniem przestrzennym. Średnia roczna suma energii użytecznej wiatru na wysokości 10 m n.p.g. (ryc. 6) wynosi zaledwie $44 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ i zmienia się w zakresie $0\text{--}84 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$. Na wysokości 20 m n.p.g. (ryc. 7) wynosi już ona $114 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ przy zakresie zmienności $0,5\text{--}218 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$, a na 30 m n.p.g. (ryc. 8) $185 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ przy zmienności $1\text{--}355 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$. Oszacowana energia jest kilkakrotnie niższa od wartości podawanych przez Lorenc (2005) dla tego obszaru ($250\text{--}500 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$).

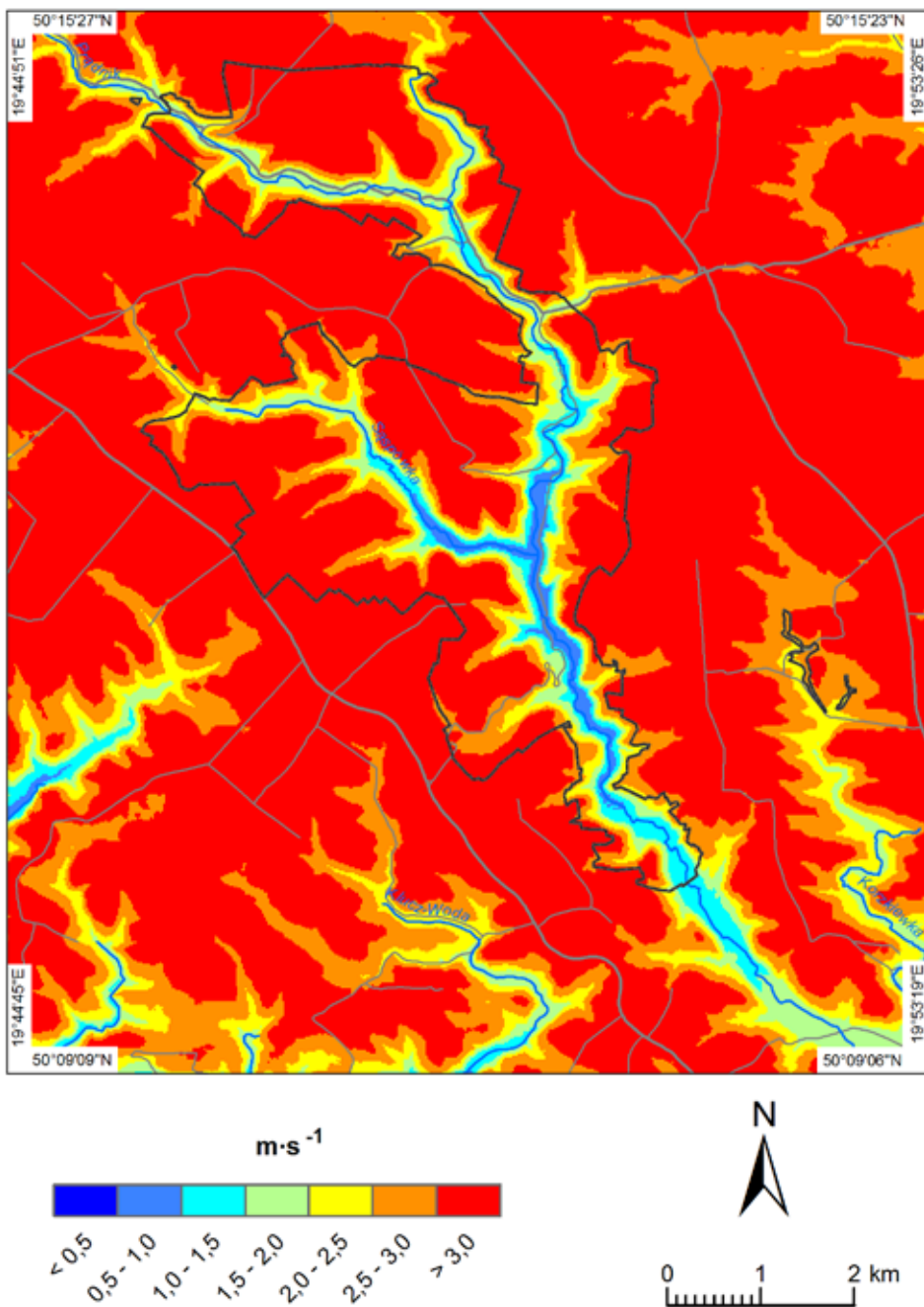
Najsłabsze wiatry występują w głęboko wciętych dolinach (ryc. 9). Na wysokości 10 m n.p.g. nie przekraczają one prędkości $0,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (ryc. 3). Nawet na wysokości 30 m n.p.g. prędkości wiatrów w dolinach są niskie osiągając średnią wartość $1,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (ryc. 5). Roczna suma energii użytecznej wiatru w dolinach na wysokości 10 m n.p.g. kształtuje się średnio na poziomie kilku $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ (ryc. 6), a na 30 m n.p.g. osiąga maksymalnie $50 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ (ryc. 8). Bardzo niski potencjał energetyczny wiatru dyskwalifikuje obszar dolin pod instalację małych elektrowni wiatrowych gdyż byłoby to ekonomicznie nieopłacalne.

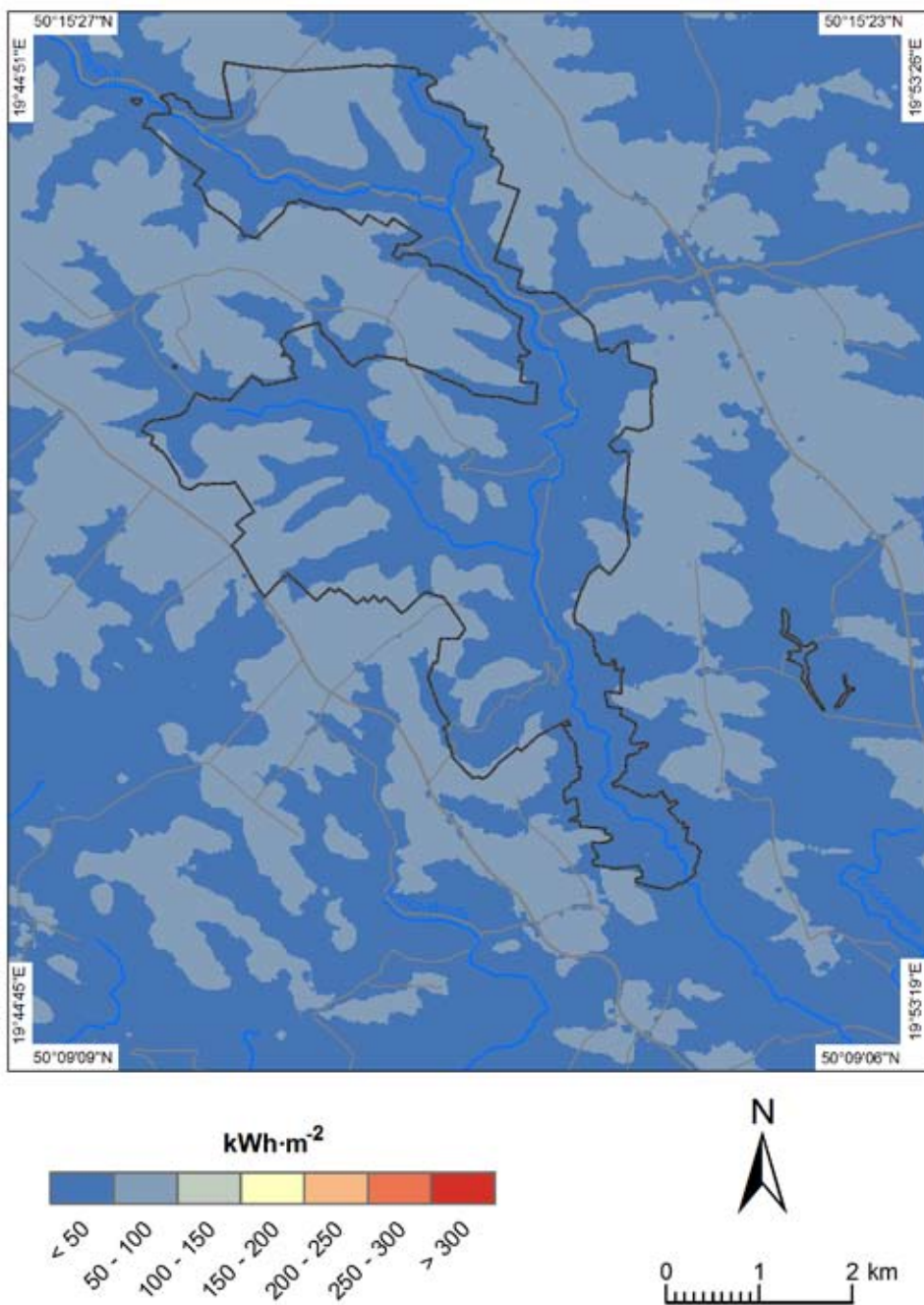
Najwyższe wartości prędkości wiatru kształtują się na wierzchołkach w zachodniej oraz północno-zachodniej części analizowanego obszaru (ryc. 10). Prędkość wiatru na wysokości 10 m n.p.g. wynosi tu średnio $2,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (ryc. 3), a na 30 m n.p.g. osiąga średnio wartość $3,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (ryc. 5). Wyższe niż w dolinach prędkości wiatru powodują kształtowanie się na wierzchołkach większego potencjału energetycznego wiatru. Roczna suma energii użytecznej wiatru na wierzchołkach w terenie otwartym o szorstkości podłoża $<0,5 \text{ m}$ na wysokości 10 m n.p.g. kształtuje się średnio na poziomie $75 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ (ryc. 6). Na wysokości 20 m n.p.g. wynosi już ona $204 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ (ryc. 7), a na 30 m n.p.g. osiąga średnio $320 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ (ryc. 8).



Ryc. 4. Średnia roczna prędkość wiatru ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) na wysokości 20 m n.p.g.

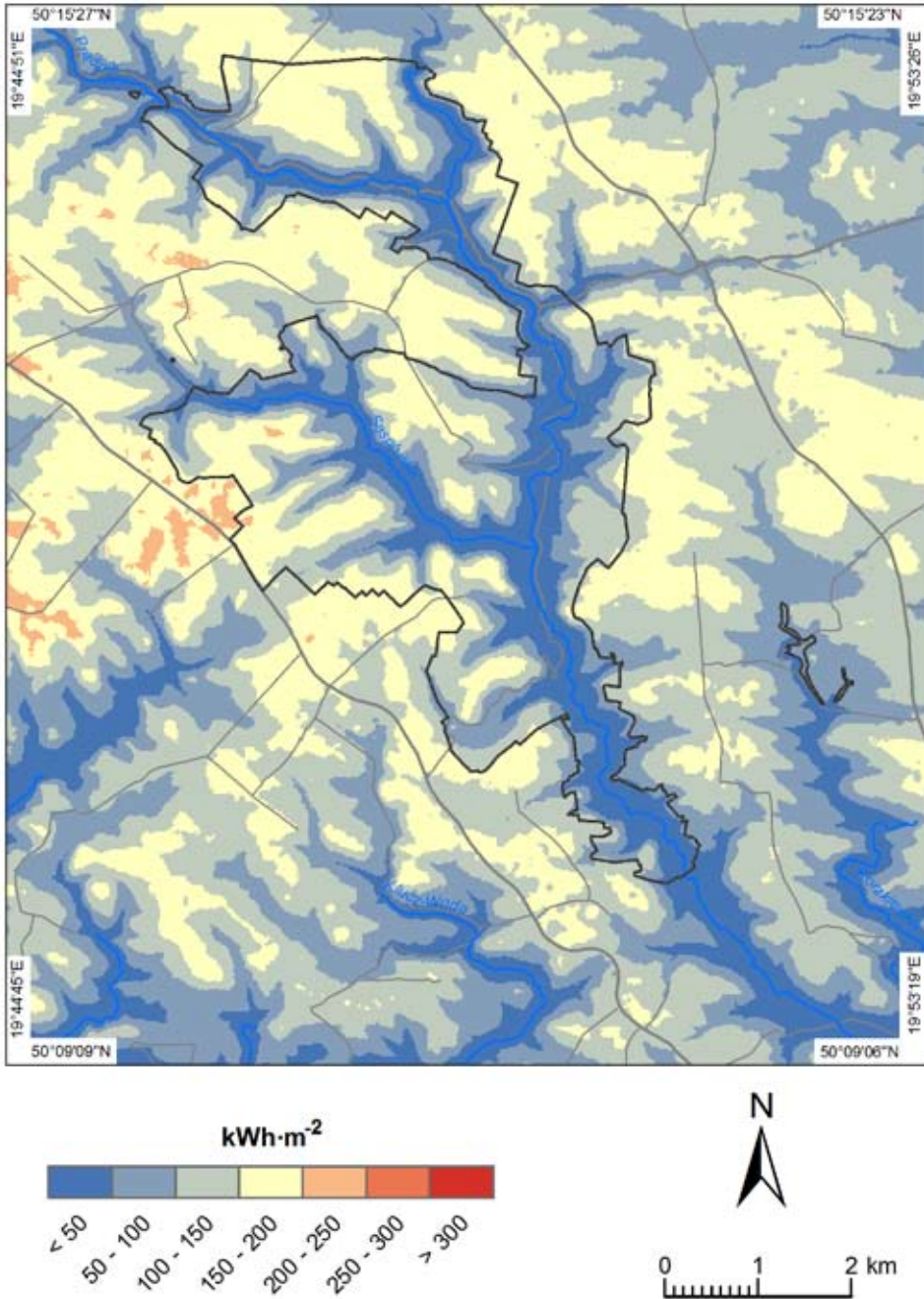
Fig. 4. Mean annual wind speeds ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) at height of 20 m above ground level

Ryc. 5. Średnia roczna prędkość wiatru ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) na wysokości 30 m n.p.g.Fig. 5. Mean annual wind speeds ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) at height of 30 m above ground level



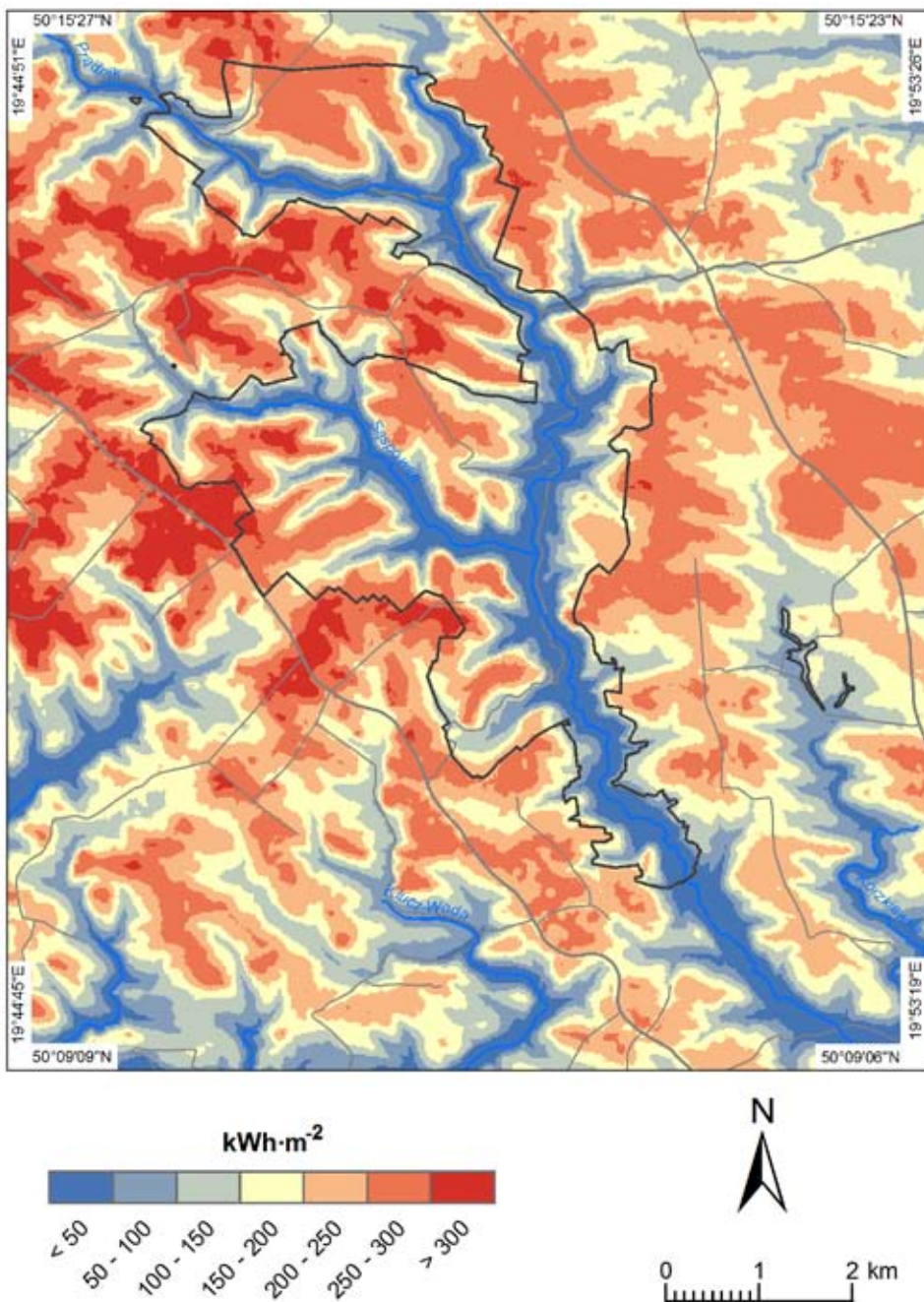
Ryc. 6. Roczna suma energii użytecznej wiatru ($\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$) na wysokości 10 m n.p.g.

Fig. 6. Annual sum of wind power ($\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$) at height of 10 m above ground level



Ryc. 7. Roczna suma energii użytecznej wiatru (kWh·m⁻²) na wysokości 20 m n.p.g.

Fig. 7. Annual sum of wind power (kWh·m⁻²) at height of 20 m above ground level



Ryc. 8. Roczna suma energii użytecznej wiatru ($\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$) na wysokości 30 m n.p.g.

Fig. 8. Annual sum of wind power ($\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$) at height of 30 m above ground level

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Rozpoznanie warunków anemologicznych i ocena potencjału energii wiatru jest niezwykle ważną informacją w procesie planowania inwestycji z zakresu energetyki wiatrowej. Informacja ta jest punktem wyjścia do sporządzenia oceny opłacalności ekonomicznej planowanej inwestycji.

Przedstawiona w niniejszej pracy ocena zasobów energii użytecznej wiatru i jej zróżnicowania w profilu wysokościowym, dokonana została na podstawie analizy dostępnych danych meteorologicznych oraz numerycznego modelowania. Ocenę zasobów przeprowadzono pod kątem małej energetyki wiatrowej, a więc instalacji elektrowni wiatrowej o niewielkiej mocy (od kilku do max kilkunastu kW). Instalacje te nie wymagają ubiegania się o stosowne pozwolenia, charakteryzują się prostą konstrukcją i są coraz bardziej przystępne cenowo dla indywidualnych gospodarstw.

Na podstawie przeprowadzonej analizy można przedstawić następujące wnioski:

1. Urozmaicona topografia analizowanego obszaru powoduje, że na stosunki anemologiczne oprócz warunków ogólnocyrkulacyjnych decydujący wpływ ma ukształtowanie terenu (ryc. 9, 10).
2. Stosunkowo duży stopień lesistości analizowanego obszaru jest czynnikiem niekorzystnym, który powoduje wzrost szorstkości podłoża i osłabienie prędkości wiatru, a tym samym zmniejszenie jej energii użytecznej.



Ryc. 9. Środkowy fragment analizowanego obszaru - dno Doliny Prądnika i Saspowskiej. Fot. R. Cieślík (2007)

Fig. 9. The central part of the study area - the bottom of the Saspowska and Prądnik Valley. Photo by R. Cieślík (2007)



Ryc. 10. Północno-zachodni fragment analizowanego obszaru – wierzchowiny otaczające dno Doliny Prądnika. Fot. R. Cieślík (2007)

Fig. 10. The north-west part of the study area - the plateau surrounding the Prądnik Valley. Photo by R. Cieślík (2007)

3. Modelowanie rozkładu prędkości wiatru wykazało jego stosunkowo duże zróżnicowanie przestrzenne. Najwyższe wartości prędkości stwierdzono na wierzchowinach w zachodniej oraz północno-zachodniej części analizowanego obszaru. Średnia roczna prędkość wiatru kształtuje się w tych miejscach przeciętnie na poziomie $2,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na wysokości 10 m n.p.g., $3,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na wysokości 20 m n.p.g. oraz $3,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na 30 m n.p.g.

4. W obserwowanych wiatrach na wysokości 10 m n.p.g. dominują wiatry bardzo słabe ($0,5\text{--}2,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 46% i słabe ($2,0\text{--}4,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 54%. Na wysokości 20 m n.p.g. wiatry bardzo słabe stanowią 11% a słabe 89%. Na wysokości 30 m n.p.g. udział wiatrów bardzo słabych wynosi 7%, a słabych 93%.

5. W skali całego analizowanego obszaru szacowana wartość rocznej sumy energii użytecznej wiatru na wysokości 10 m n.p.g. kształtuje się średnio na poziomie $44 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$. Na wysokości 20 m n.p.g. wynosi już ona $114 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$, a na 30 m n.p.g. $185 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$.

6. Roczna suma energii użytecznej wiatru na wierzchowinach w terenie otwartym o szorstkości podłoża $< 0,5$ kształtuje się średnio na poziomie $75 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ na wysokości 10 m n.p.g., $204 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ na wysokości 20 m n.p.g. oraz $320 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ na 30 m n.p.g. Z obliczonego profilu wysokościowego prędkości wiatru wynika, że w przypadku elektrowni małej mocy, żeby osiągnąć kryterium opłacalności inwestycji, turbinę generatora należałoby zainstalować na wysokości co najmniej 20 m n.p.g.

7. Wąskie dna dolin położonych na analizowanym obszarze charakteryzują się bardzo niewielkim potencjałem energetycznym i w większości przypadków instalacja małej elektrowni wiatrowej, nawet powyżej 30 m n.p.g. nie miałyby w obecnych warunkach ekonomicznego uzasadnienia.

Wyniki przedstawione w niniejszej pracy należy traktować jako wartości orientacyjne. Jak już wcześniej wspomniano, szacowane zasoby charakteryzują się bardzo dużą zmiennością czasową oraz przestrzenną z uwagi na naturę wiatru. Dopiero szczegółowe i długotrwałe (kilkuletnie) pomiary wiatru na co najmniej dwóch wysokościach n.p.g. w miejscu planowanej inwestycji pozwoliłyby dokładniej określić warunki anemologiczne i uzyskać najwiarygodniejszą informację o zasobach energii wiatru.

PIŚMIENNICTWO

Brzeźniak E. 1974. *Ogólna charakterystyka warunków klimatycznych w okolicy Ojcowskiego Parku Narodowego*, [w:] K. Zabierowski (red.), *Rozmieszczenie przestrzenne i struktura leśnych pasów ochronnych wokół Ojcowskiego Parku Narodowego*. Zakład Ochrony Przyrody PAN. Maszynopis. Biblioteka Ojcowskiego Parku Narodowego.

Caputa Z. 2014. *Dane meteorologiczne ze stacji w Lepiance Czajowskiej* – zbiór komputerowy, Uniwersytet Śląski, Katedra Klimatologii. Sosnowiec.

CLC2006. Coordination of Information on the Environment (CORINE) Land Cover 2006. Europejska Agencja Środowiskowa (EEA).

Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy 2001/77/WE oraz 2003/30/WE. Dz.U. UE L 09.140.16.

Hess M. 1965. *Piętra klimatyczne w Polskich Karpatach Zachodnich*. Zesz. Nauk. UJ, Prace Geograficzne, 11, 1–258.

Hess M. 1969. *Klimat podregionu miasta Krakowa*. „Folia Geographica, Seria Geogr.-Physica”, 3: 5–65

Hess M, Niedźwiedz T., Obrębska-Starkłowa B. 1987. *Metoda kartograficznego przedstawiania stosunków klimatycznych w górach dla potrzeb planowania przestrzennego*. Materiały Ogólnopolskiej Konferencji Kartograficznej PTG, XIII, Kraków, 5–6 IX, s. 29–40.

Jaros K. 2003. *Warunki klimatyczne i bioklimatyczne Ojcowskiego Parku Narodowego*. Praca magisterska. IGiGP UJ. Kraków.

Klein J. 1974. *Mezo- i mikroklimat Ojcowskiego Parku Narodowego*. „Studia Naturae, ser. A”, nr 8, s. 11–18, 37–50, 84–89.

Kozłowska A. 2014. *Warunki anemologiczne oraz ocena zasobów energii użytecznej wiatru obszaru Ojcowskiego Parku Narodowego*. Praca magisterska. Wydział Rolniczo-Ekonomiczny Uniwersytetu Rolniczego. Kraków.

Lorenc H. 2001. *Oferta ośrodka Meteorologii IMGW*. <http://imgw.pl/oferta/ośrodek-meteorologii.htm>.

Lorenc H. 2005. *Atlas klimatu Polski*. Wyd. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Warszawa, s.115.

Niedźwiedz T. 2013. *Kalendarz typów cyrkulacji atmosfery dla Polski południowej* – zbiór komputerowy, Uniwersytet Śląski, Katedra Klimatologii. Sosnowiec.

Partyka J., Caputa Z. 2009. *Charakterystyka klimatu lokalnego Ojcowskiego Parku Narodowego na podstawie danych archiwalnych oraz badań wykonanych w latach 2008–2009*. „Prądnik. Prace Muz. Szafera”, 19: 19–40.

Radecki W. 2007. *Ochrona prawna parków narodowych przed zagrożeniami zewnętrznymi (na kilku przykładach z Ojcowskiego Parku Narodowego)*. „Prądnik. Prace Muz. Szafera”, **17**: 21–32

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 26 stycznia 2010 r. w sprawie wartości odniesienia dla niektórych substancji w powietrzu. Dz.U. 2010 nr 16, poz. 87.

Soliński I., Ostrowski J., Soliński B. 2010. *Energia wiatru, komputerowy system monitoringu*. Wydawnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej. Kraków, s. 1–240.

Strategia rozwoju województwa małopolskiego 2011–2020. Urząd Marszałkowski Województwa Małopolskiego, Departament Polityki Regionalnej. Kraków.

Ustawa o ochronie przyrody z dnia 16 kwietnia 2004 r. Dz.U. 2004 nr 92, poz. 880.

WODGiK, *Numeryczny model terenu OPN o rozdzielczości przestrzennej 20 m*, Wojewódzki Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej w Krakowie.

Wojkowski J. 2014. *Dane meteorologiczne ze stacji w Garlicy Murowanej – zbiór komputerowy*. Katedra Ekologii, Klimatologii i Ochrony Powietrza Uniwersytetu Rolniczego. Kraków.

SUMMARY

The paper presents the results of investigations of anemological conditions and wind energy in the Ojców National Park. The main objective of this study was to evaluate the potential of wind energy for a wind turbine for low power (from a few to several kW).

The analysis of spatial differentiation of the anemological conditions was made using the digital elevation model, CORINE, GIS and regression analysis. For this purpose a map of spatial distribution surface roughness length, average annual wind speed and wind power at height of 10, 20 and 30 m above ground level were developed. The investigations showed that in analyzed area dominate very weak ($0.5\text{--}2.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) and weak ($2.0\text{--}4.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) winds. The annual sums of wind power is averages between 44 and 185 $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$.

The results presented in this paper should be regarded as approximate values. Only long-term (several years) wind observations on at least two different heights above the ground at the site of the planned investment would further define the anemological conditions and obtain reliable information on wind energy resources.