

Agnieszka Woźniak¹

WPŁYW LOKALNYCH WARUNKÓW WIATROWYM NA WSKAŹNIKI EKONOMICZNE OCENY EFEKTYWNOŚCI INWESTYCJI W ENERGETYCE WIATROWEJ

Streszczenie: Lokalne zasoby energii kinetycznej wiatru charakteryzuje lokalna średnioroczna prędkość wiatru. Średnioroczna prędkość wiatru dla poszczególnych rejonów kraju jest bardzo zróżnicowana. Istnieją rejon w których wynosi ona ok.2 m/s i rejon w których wynosi ok. 8 m/s. Moc strumienia wiatru napływającego na turbinę wiatrową jest proporcjonalna do trzeciej potęgi prędkości wiatru i drugiej potęgi średnicy koła łopatkowego turbiny. Średnice kół łopatkowych turbin wiatrowych są bardzo zróżnicowane. Mieszczą się w granicach od ok.0,5 m do około 100 m. Opłacalność inwestycji w elektrownię wiatrową jest, co oczywiste, silnie uzależnione od lokalnych zasobów energii wiatru, a warunki wiatrowe w miejscu wybranym pod lokalizację elektrowni stanowią istotny czynnik na decyzje inwestora. Celem poniższego artykułu jest oszacowanie wyniku finansowego inwestycji w energetykę wiatrową poprzez poznanie zasobów lokalnych wiatru.

Słowa kluczowe: energia wiatru, turbina wiatrowa, wskaźniki efektywności ekonomicznej

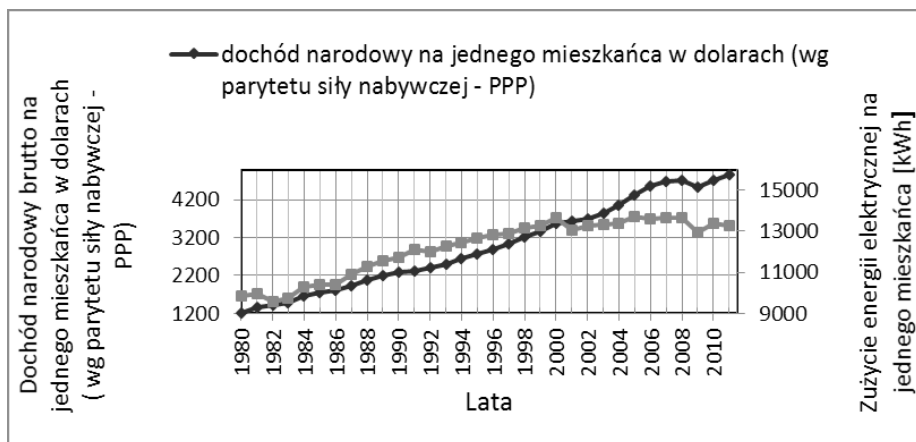
Wprowadzenie

Produkcja i wykorzystanie energii jest ważnym i trudnym problemem nie tylko technicznym i ekologicznym, ale również politycznym i społecznym. Stopień

¹ dr Agnieszka Woźniak, Instytut Politechniczny, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa im. Stanisława Pigionia w Krośnie

wykorzystania energii elektrycznej w danym kraju przekłada się w prosty sposób na wielkość produktu krajowego brutto, czyli na poziom życia mieszkańców tego kraju. Na rys.1, na przykładzie Stanów Zjednoczonych, państwa, które produkuje 25% wytwarzanej na świecie energii elektrycznej, pokazano zależność pomiędzy dochodem krajowym brutto, a wykorzystaniem energii elektrycznej. Jak widać z rysunku występuje tu ścisła proporcja. Tą samą tendencję zauważamy na przykładzie innego kraju świata, a mianowicie Wielkiej Brytanii (rys.2). Dane dotyczące DNB są przeliczane wg siły nabywczej (PPP) w poszczególnych krajach, gdyż tylko ten wskaźnik odzwierciedla poziom zamożności społeczeństwa.

Rysunek 1. Zestawienie zmian dochodu narodowego brutto na jednego mieszkańca (DNB) i zużycia energii elektrycznej na jednego mieszkańca w Stanach Zjednoczonych na przestrzeni blisko 30 lat.

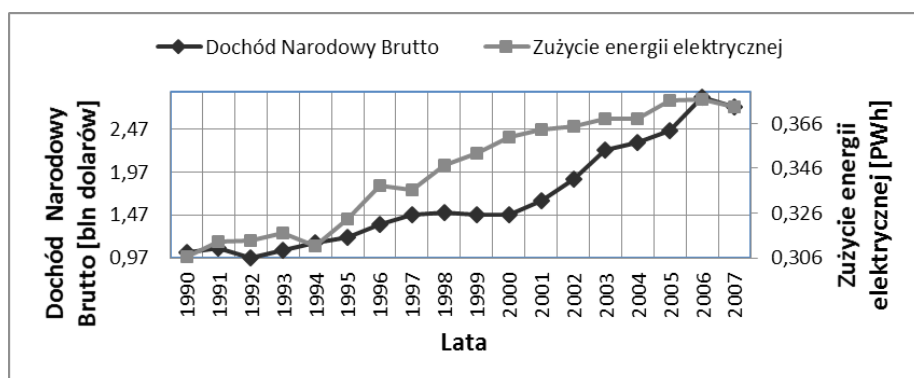


Źródło: Opracowanie własne [za: <http://data.worldbank.org>].

Z kolei wartość średnia ilości energii elektrycznej wykorzystywanej przez jednego mieszkańca w danym kraju przekłada się na średni czas życia obywatela tego kraju. Wielkość wykorzystywanej energii elektrycznej na jednego mieszkańca w krajach wysoko rozwiniętych jest nawet kilkaset razy większa niż w krajach rozwijających się².

² A. Strupczewski, *Analiza korzyści zagrożeń związanych z różnymi źródłami energii elektrycznej*, Polskie Towarzystwo Nukleoniczne, Warszawa 2000

Rysunek 2. Zestawienie zmian dochodu narodowego brutto (DNB) i zużycia energii elektrycznej w Wielkiej Brytanii na przestrzeni blisko 20 lat

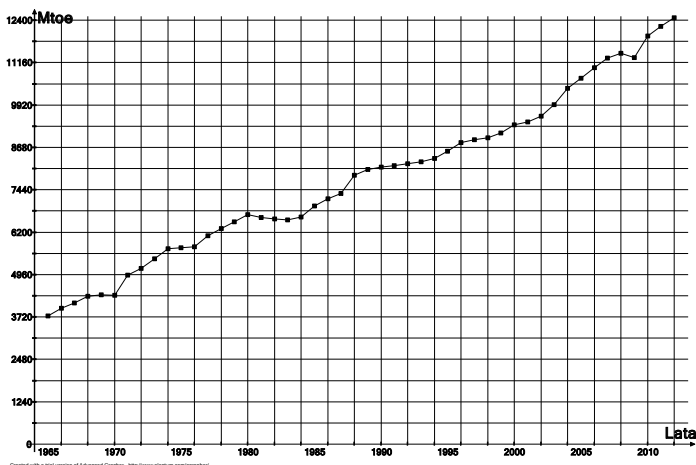


Źródło: Opracowanie własne [za: <http://data.worldbank.org>].

Blisko 70% produkowanej na świecie energii elektrycznej wytwarzana jest w dziesięciu państwach świata. Dane szacunkowe mówią, że w skali ogólnoświatowej około 80% produkowanej energii elektrycznej wykorzystywana jest przez około 20% mieszkańców ziemi. Taka dysproporcja jest nie do utrzymania. Jeżeli z tymi faktami zestawimy informację o permanentnym, gwałtownym przyroście ilości mieszkańców kuli ziemskiej musimy dojść do wniosku, że produkcja elektryczna w skali świata musi gwałtownie wzrosnąć. Światowe zużycie energii elektrycznej i ciepła będzie wzrastać (wg danych US DOE) do roku 2020 o ponad 60% w porównaniu do stanu obecnego.

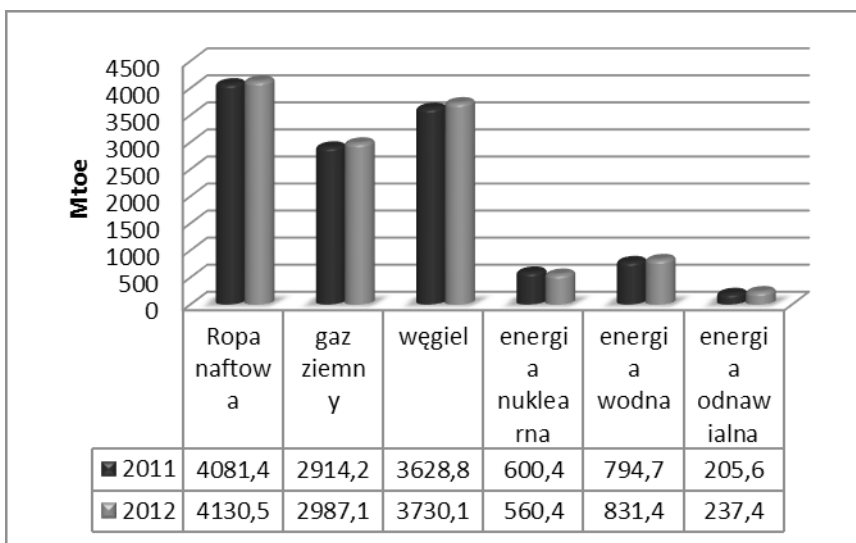
Na rys.3 i rys.4 przedstawiono konsumpcję energii pierwotnej na przestrzeni kilkudziesięciu lat (rys.3) oraz z podziałem na surowce, gdzie porównano konsumpcję surowców energetycznych w skali światowej dwóch ostatnich lat (rys.4). Konsumpcja energii podana jest w Mtoe, co oznacza milion ton oleju ekwiwalentnego. Oba wykresy wskazują tendencje wzrostowe zużycia energii pierwotnej na świecie.

Rysunek 3. Konsumpcja energii pierwotnej na świecie w latach 1965 –2012 podana w Mtoe = milion ton oleju ekwiwalentnego.



Źródło: Opracowanie własne [za: The World Wind Energy Association, Annual Report 2012, WWEA Head Office, Germany, May 2013]

Rysunek 4. Konsumpcja energii pierwotnej z podziałem na surowce w latach 2011 i 2012 podana w Mtoe = milion ton oleju ekwiwalentnego



Źródło: Opracowanie własne [za: The World Wind Energy Association, Annual Report 2012, WWEA Head Office, Germany, May 2013]

Ze względu na dostępność i możliwość wykorzystania surowce energetyczne dzielimy na zasoby (całkowita ilość surowca w skorupie ziemskiej) i rezerwy (część zasobów udokumentowanych, nadających się do wydobycia przy odpowiednich warunkach technicznych i ekonomicznych).

Z raportów dokonywanych przez Światową Radę Energetyczną wynika, że pomimo wzrostu tempa wydobycia, wielkość zasobów surowców kopalnych rośnie. Na ten wzrost zasobów ma ogromny wpływ postęp techniczny umożliwiający poszukiwanie nowych źródeł nawet w trudno dostępnych miejscach świata. Niestety, wiąże się to ze wzrostem kosztów wydobycia paliw.

Drugim problemem jest nierównomierne rozmieszczenie zasobów na kuli ziemskiej. Około 60% rezerw ropy naftowej posiadają: kraje Bliskiego Wschodu: Arabia Saudyjska (264,6 mld baryłek), Iran (137,6 mld baryłek), Irak (115,0 mld baryłek), Kuwejt (101,5 mld baryłek) i Zjednoczone Emiraty Arabskie (97,8 mld baryłek). Znaczące rezerwy tej ropy posiadają: Wenezuela, Federacja Rosyjska, Meksyk, Kazachstan, Libia, USA i Kanada.

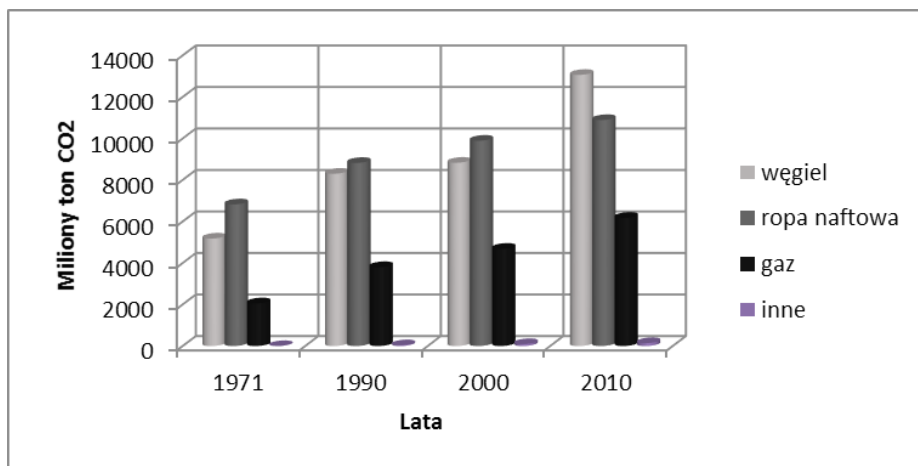
Największe rezerwy gazu ziemnego znajdują się w Federacji Rosyjskiej. Stanowią one ok. 1/4 światowych rezerw tego paliwa. Na Bliskim Wschodzie główne rezerwy posiadają Iran 15,8% i Katar 13,5%.

Największe rezerwy węgla kamiennego posiadają: USA, Federacja Rosyjska, Chiny, Indie, Afryka Płd., Australia, Ukraina, Kazachstan i Polska. Największe rezerwy węgla brunatnego posiadają: Australia, USA, Chiny, Serbia i Niemcy.

W skali ogólnosiwiatowej 65% energii elektrycznej wytwarzana jest w oparciu o procesy spalania paliw kopalnianych. Około 17% energii elektrycznej wytwarzana jest w oparciu o bezemisyjne reakcje jądrowe wykorzystujące również kopalny surowiec energetyczny, którym jest uran 235. Pozostałe 17% energii elektrycznej wytwarzana jest w oparciu o energię spadku wód powierzchniowych.

Wśród wykorzystywanych w energetyce, w oparciu o procesy spalania surowców kopalnych, pierwsze miejsce zajmuje węgiel, który jest źródłem około 40% produkowanej na świecie energii elektrycznej. Obok paliwa stałego – węgla, znaczącą rolę, jako kopalne surowce energetyczne odgrywają jeszcze paliwa ciekłe, głównie olej opałowy oraz paliwa gazowe, głównie gaz ziemny. W oparciu o znajomość wartości opałowej, równania stechiometrycznego, sprawność konwersji paliwa w energię elektryczną, potrzeby własne zakładów energetycznych, sprawność przesyłu i dystrybucji energii, możemy określić wskaźniki zużycia paliwa i emisji CO₂ dla poszczególnych paliw.

Rysunek 5. Porównawcze zestawienie emisji CO₂ w latach 1971,1990,2000 i 2010. z podziałem na surowce



Źródło: Opracowanie własne [za: http://data.worldbank.org/polish?cid=GPDpl_WDI]

Dwutlenek węgla, do bardzo szkodliwych produktów związanych ze spalaniem paliw kopalnianych, dołączony został stosunkowo niedawno. Problem możliwości poważnego wpływu emisji CO₂ na środowisko został silnie wyekspozowany dopiero na światowej konferencji w Rio de Janeiro (1992), a następnie na analogicznych konferencjach w Harare, Madrycie, Kioto, Brighton, Bonn, Johannesburgu i ostatnio w Kopenhadze. Wcześniej, wśród produktów emitowanych w procesie spalania oddziałujących szkodliwie na przyrodę i inne obiekty fizyczne, wymieniano tlenki siarki, tlenki azotu i pyły.

Istnieje wiele opracowań zawierających próby oceny szkód związanych z emisją tych zanieczyszczeń [70]. Istnieje również wiele technologii ograniczających ich emisję. Wiele spośród tych technologii zostało wdrożonych podnosząc koszt produkcji energii elektrycznej.

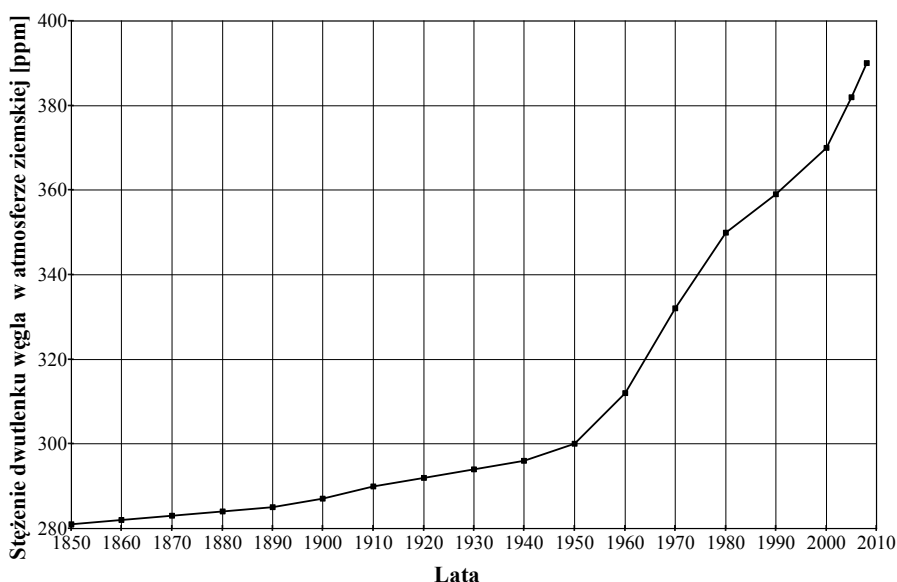
Szkodliwość emitowania do atmosfery tlenków siarki, tlenków azotu czy pyłów nie budzi żadnych wątpliwości, natomiast szkodliwe oddziaływanie dwutlenku węgla, albo lepiej stopień szkodliwości jego emisji, ciągle jest dyskusyjny.

Nie mając pewności co do roli CO₂ w kształtowaniu zmian klimatycznych na Ziemi, ale mając uzasadnioną hipotezę, że może to być rola znacząca, widząc również tendencję wzrostową emisji CO₂ (rys.6), nie chcąc wystawić Ziemi

na niebezpieczną próbę, znaczna część państw świata, w tym Unia Europejska, uznały za konieczne radykalne ograniczenia emisji CO₂ do atmosfery.

Wobec takich ustaleń ograniczenia emisji CO₂ stało się w tej chwili jednym z głównych problemów technologii energetycznych i temu problemowi poświęcona jest bardzo duża ilość najnowszych prac naukowych^{3,4}. Z prac tych wynika, że wychwytywanie dwutlenku węgla ze spalin pociąga za sobą obniżenie sprawności produkcji energii elektrycznej rzędu 6-10% oraz obniżenie mocy użytecznej zakładów energetycznych przekraczające nawet 10%. Ta sytuacja pociąga za sobą wiele problemów.

Rysunek 6. Wzrost stężenia CO₂ w atmosferze na przestrzeni ostatnich dziesięcioleci



Created with a trial version of Advanced Grapher - <http://www.alentum.com/advancedgrapher/>

Źródło: Opracowanie własne [za: http://data.worldbank.org/polish?cid=GPDpI_WDI]

Dzisiejszy świat stoi przed problemem zmniejszenia tempa zużywania paliw kopalnych i koniecznością produkcji czystej energii ze źródeł odnawialnych;

³ J. Kotowicz, K. Janusz, *Sposoby redukcji emisji CO₂ z procesów energetycznych*, „Rynek Energii” nr 1/2007.

⁴ J. Kucowski, D. Laudyn, M. Przekwas, *Energetyka, a ochrona środowiska*, WNT, Warszawa 1997.

głównych jej zasobów upatrując w wykorzystaniu szeroko pojętej biomasy, wodoru, ogniw paliwowych, itp. Szacunkowe dane wskazują, że tempo zużycia zasobów węgla, ropy i gazu ziemnego można znacząco zmniejszyć poprzez efektywne wykorzystanie energii paliw odnawialnych – paliw, których utylizacja energetyczna jest czysta, jednak przy założeniu, że wybrana zostanie poprawna opcja przetwarzania zawartej w nich energii.

Istnieje wiele technologii energetycznych opartych o odnawialne źródła energii. Technologie te są powszechnie znane. Podstawowym mankamentem energetyki źródeł odnawialnych jest duże rozproszenie surowców energetycznych, a co za tym idzie ograniczona pod względem osiąganych mocy urządzeń produkujących energię elektryczną.

Wiatr jako lokalny surowiec energetyczny

Spośród technologii energetycznych wykorzystujących odnawialne źródła energii na szczególną uwagę zasługuje energetyka wiatrowa. Decyduje o tym: powszechna dostępność surowca energetycznego jakim jest wiatr, unikanie jakichkolwiek emisji zanieczyszczeń do atmosfery towarzyszących produkcji energii, znikomy wpływ na ekosystemy, możliwość pracy elektrowni w systemie elektroenergetycznym jak i pracy autonomicznej, szybka realizacja inwestycji, możliwości doboru mocy elektrowni do potrzeb i możliwości finansowych inwestora, obniżanie kosztów produkcji elektrowni w miarę wzrostu ilości produkowanych obiektów, możliwości wykorzystywania terenów zajętych przez elektrownie dla celów rolniczych lub innych.

Energetyka wiatrowa w Polsce do niedawna kojarzona była z pojedynczymi turbinami wiatrowymi, rozsianymi po kraju, kupowanymi w zachodniej Europie. Od kilku lat zaobserwowano jednak w kraju rozwój tego rodzaju energetyki. Początki tego rozwoju sięgają lat 90-tych, kiedy to w 1991 roku uruchomiono pierwszą profesjonalną turbinę wiatrową o mocy 150 kW w Lisowie (gmina Gniewno, woj. pomorskie). Wkrótce po niej powstała elektrownia o mocy 95 kW w oczyszczalni śmieci w Swarzewie. W 1993 roku firma Nowomag uruchomiła pierwszą wyprodukowaną w Polsce elektrownię EW100-22-20Nowomag w Rytrze. W ciągu następnych lat powstawały pojedyncze elektrownie. Pierwsza farma wiatrowa w Polsce powstała w 1999 roku w Cisowie koło Darłówka, w skład której wchodziło 5 turbin wiatrowych firmy SeeWind o łącznej mocy 660 kW.

Największe polskie elektrownie i farmy wiatrowe zlokalizowane są głównie w województwach pomorskim, zachodniopomorskim, wielkopolskim oraz warmińsko-mazurskim, a więc tam, gdzie występują najlepsze warunki wiatrowe w Polsce.

Obecnie największą farmą wiatrową w Polsce jest farma Margoninie w województwie wielkopolskim, która składa się z 60 turbin wiatrowych o łącznej mocy 120MW. Energia elektryczna produkowana przez tę farmę wiatrową pozwala zaspokoić potrzeby około 90 tysięcy gospodarstw domowych. Jedną z najnowszych inwestycji jest farma na Podkarpaciu w miejscowości Rymanów (rys.8). Wybudowana została przez portugalską firmę Martifer, a właścicielem firmy jest Ikea Retail Sp. z o.o. Farma wiatrowa, uruchomiona 24 czerwca 2013 roku składa się z 13 wiatraków o mocy 2 MW każdy, które mogą produkować 61 GWh energii elektrycznej rocznie. Firma Ikea ma już trzy farmy wiatrowe w Polsce i to wszystkie zlokalizowane w województwie podkarpackim, pozostałe dwie farmy znajdują się w okolicach Łęk Dukielskich i w Bukowsku.

Inwestor, mający podjąć decyzji o budowie elektrowni wiatrowej, potrzebuje szeregu danych, aby ocenić opłacalność takiej inwestycji i ryzyko z tym związane. Do rozważenia ma wiele czynników związanych z budową i uruchomieniem elektrowni oraz jej eksploatacją. Należy brać również czynniki związane z regulacjami prawnymi i podatkowymi, rynkiem finansowym, pracą systemu elektroenergetycznego itp. Szereg tych uwarunkowań strawią, że decyzja o posadowieniu elektrowni jest decyzją złożoną więc potrzebne są w miarę dokładne szacunki o wyniku finansowym elektrowni. Badania ekonomiczne wykorzystują różnorodne metody analizy^{5,6,7,8,9}. Wyniki tych analiz nie zawsze prowadzą do

⁵ W. Ciecchanowicz, *Energetyka, środowisko i ekonomia*. Warszawa, Wyd. Instytutu Badań Systemowych PAN 1997.

⁶ S. Gumuła, A. Woźniak, *Jak określić stopień wykorzystania mocy elektrowni wiatrowej?* Czysta Energia 1/2008.

⁷ I. Soliński, *Energetyczne i ekonomiczne aspekty wykorzystania energii wiatrowej*. Kraków, Wyd. IGSMiE PAN 1999.

⁸ S. Gumuła, A. Woźniak, *Wpływ charakterystyki mocy elektrowni wiatrowej na wskaźniki energetyczne i ekonomiczne produkcji energii*, materiały konferencyjne IVej Konferencji pt., *Ekonomiczne aspekty energii ze źródeł odnawialnych w perspektywie 2020 Roku* 2008.

⁹ S. Gumuła, A. Woźniak, *Wpływ charakterystyki elektrowni wiatrowej na wykorzystanie mocy nominalnej i wskaźniki ekonomiczne produkcji energii*, materiały konferencyjne Konferencji Naukowej "Czysta Energia – Czyste Środowisko 2008" Warszawa 2008.

takich samych wniosków. W przypadku planowania ważnych, pochłaniających duży kapitał inwestycji, należy stosować równocześnie kilka metod analizy. Im większą ilość wskaźników ekonomicznych wykorzysta się do analiz i im więcej parametrów mających wpływ na dane przedsięwzięcie się uwzględni tym większe prawdopodobieństwo zasadności prognoz z efektami rzeczywistymi.

Rysunek 7. Farma wiatrowa Rymanów



Źródło: własne, fot. A. Woźniak

Średnioroczna prędkość wiatru

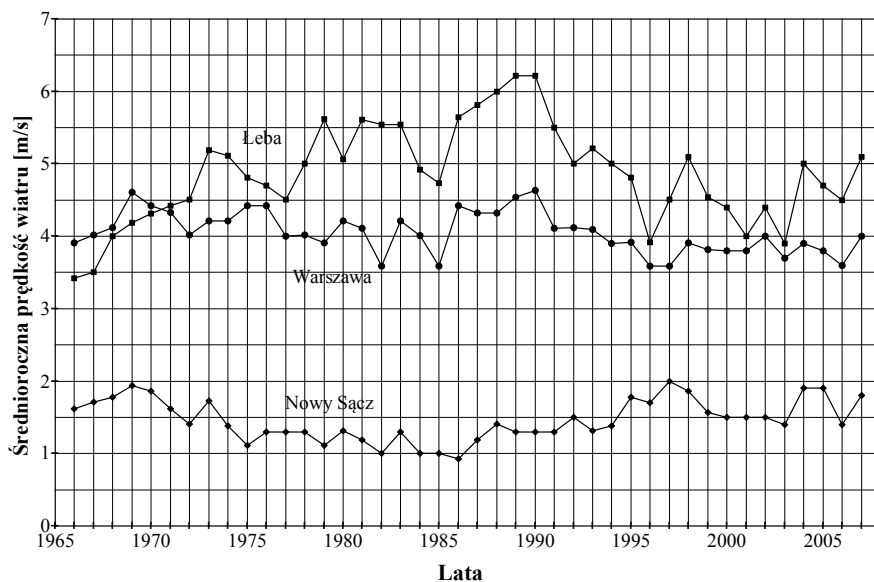
Prędkość wiatru jest wielkością zmieniającą się w sposób stochastyczny i można ją charakteryzować (opisywać) jedynie w sposób statystyczny. Podstawowym parametrem charakteryzującym wielkość zmieniającą się w sposób losowy jest jej wartość średnia w czasie.

Analiza danych obserwacyjnych powinna być przeprowadzona na odpowiednio długich nieprzerwanych seriach pomiarowych. Absolutnym minimum jest seria rocznych pomiarów, jednak nawet, w tym przypadku wyniki obserwacji

mogą nie być reprezentatywne. W klimacie przejściowym, jaki występuje w Polsce zmiany te mogą być znaczące. Zasoby teoretyczne wiatru mogą zmieniać się o kilkadziesiąt procent w porównaniu między kolejnymi latami. Przyjmuje się, że minimalny czas pomiarów wiatru to okres 1 roku ale wyniki wieloletnie analizę warunków ekstremalnych i dokładną ocenę ryzyka. Dlatego analizowane wyniki powinny być oparte wieloletnimi obserwacjami.

Rys.8 przedstawia zmienność średniorocznej prędkości wiatru w trzech punktach pomiarowych w Polsce: w Łebie (Polska północna), w Warszawie (Polska środkowa) i w Nowym Sączu (Polska południowa). Przykładowo pomiary w Łebie w roku 1966 mogłyby wskazywać, że region ten jest nieatrakcyjny pod względem energetyki wiatrowej, ale wieloletnie pomiary umożliwiają stwierdzenie dobrych warunków wiatrowych dla tej lokalizacji.

Rysunek 8. Wieloletnia zmienność średniorocznych prędkości wiatru w latach 1996 do 2007

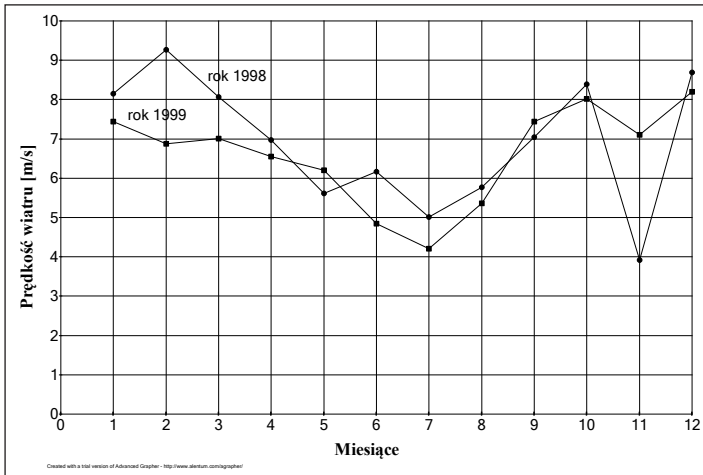


Źródło: Opracowanie własne [za: IMGW Warszawa]

O zmienności wiatru świadczą również pomiary wiatru i ich prezentacja w różnych skalach czasowych. Na poniższych wykresach przedstawiono wykres wiatru w różnych skalach w dwóch lokalizacjach. Dane, jakimi dysponowano to,

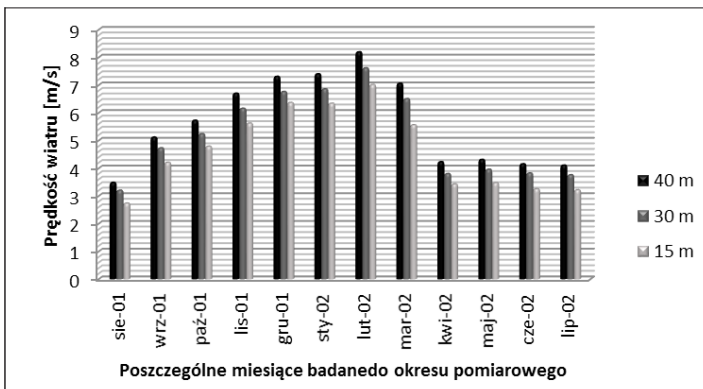
jak już wcześniej wspomniano, pomiary prędkości wykonane na wysokości 40m nad powierzchnia gruntu w roku 1998 oraz 1999 w miejscowości Wola Rafałowska (rys. 9) oraz dane wykonane od 17.07 2001r. do 21.07.2002r w miejscowości Rymanów nad trzech różnych wysokościach tj. 15m, 30m oraz 40m (rys.10).

Rysunek 9. Rozkład średniomiesięcznych prędkości wiatru w 1998 i 1999 roku w Woli Rafałowskiej



Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych pomiarowych

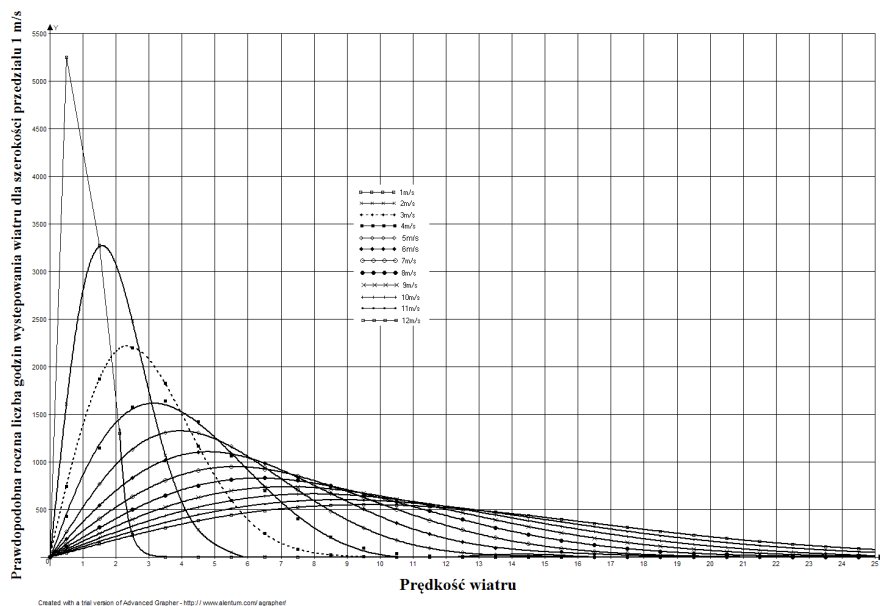
Rysunek 10. Średniomiesięczne prędkości wiatru w ciągu 12 miesięcy pomiarów w miejscowości Rymanów



Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych pomiarowych.

Ponieważ jednak prędkość wiatru jest wielkością zmieniającą się w sposób stochastyczny i można ją charakteryzować (opisywać) w sposób statystyczny w oparciu o potwierdzoną wieloletnimi pomiarami prędkością średnioroczną, prognozę warunków wiatrowych w danej lokalizacji statystycznie opisać można rozkładem Weibulla^{10, 11, 12}. Lokalne zasoby energii wiatru można określić więc na podstawie znajomości średniorocznej prędkości wiatru oraz rozkładu Weibulla (rys.11). Rozkład Weibulla w postaci graficznej przedstawia zależność spodziewanej liczby godzin wiatru z określoną prędkością.. Inaczej to formułując zbiór charakterystyk stanowiących rozkład Weibulla pozwala określić ile godzin, przy danej średniorocznej prędkości wiatru, będzie wiał wiatr, z interesującą nas prędkością.

Rysunek 11. Rozkład Weibulla dla 12 średniorocznych prędkości wiatru



Created with a trial version of Advanced Grapher - <http://www.alexium.com/agrapher>

¹⁰ T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, John Wiley, 2001.

¹¹ J. F. Manwell, J. G. McGrowan, A.L. Rogers, *Wind Energy Explained, Theory Design and Application*, John Wiley & Son Ltd, 2002.

¹² S. Gumuła, A. Woźniak, *Jak określić stopień wykorzystania mocy elektrowni wiatrowej? Czysta energia* 1/2008.

Rozkłady prędkości wiatru w funkcji wysokości nad powierzchnią gruntu

Podstawową zaletą wiatru jest jego ogólna dostępność. Niekorzystną cechą wiatru jako źródła energii jest duże i nierównomierne rozproszenie oraz zmienność w czasie, a także mała gęstość energii. Energia wiatru może być wykorzystana w elektrowni wiatrowej w zakresie prędkości od ok. 2,5÷4 [m/s] do ok. 20-25 [m/s], poniżej dolnego zakresu wykorzystanie jest możliwe, ale nie ma uzasadnienia ekonomicznego, natomiast powyżej górnej granicy ze względów bezpieczeństwa konstrukcji wyłącza się elektrownie wiatrową z pracy.

Tarcie pomiędzy powierzchnią terenu a poruszającym się powietrzem wytwarza przestrzenny profil prędkości wiatru, w którym średnioroczne prędkości wiatru rosną wraz z wysokością. Jest on silnie związany z rodzajem terenu i na terenach gładkich z małymi przeszkodami mamy małe wariacje prędkości wiatru wraz z wysokością, natomiast na terenach miejskich wariacje te są większe.

Rozkład prędkości można zapisać za pomocą potęgowej funkcji w postaci,¹³:

$$v(h) = v_m \left(\frac{h}{10} \right)^\alpha \quad (1)$$

v_m – prędkość wiatru na wysokości $h=10m$ [m/s]

h – wysokość nad powierzchnią terenu [m]

α – współczynnik zależny od rodzaju terenu.

Zależność ta przedstawiana jest również w postaci funkcji logarytmicznej^{14, 15}:

$$\frac{v(h)}{v(10)} = \frac{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{10}{z_0}\right)} \quad (2)$$

z_0 – parametr szorstkości, zależny od rodzaju terenu

¹³ E. Hau, *Wind Turbines* 2nd Edition, /Springer 2006.

¹⁴ M.P. Anwar, *Laser positioning measurement system for Wind Tunnel Studies of structures*, National University of Singapore, 2005, (praca doktorska) pozyskana z <http://scholarbank.nus.edu.sg/>.

¹⁵ Bianchi, FD, de Battista, H, Mantz, RJ., *Wind turbine control systems: principles, modeling and gain scheduling design*, London: Springer-Verlag, 2007.

$v(10)$ – średnioroczna prędkość wiatru mierzona zazwyczaj na wysokości 10m nad poziomem gruntu.

Tabela 1. Charakterystyka szorstkości terenu, klasyfikacja

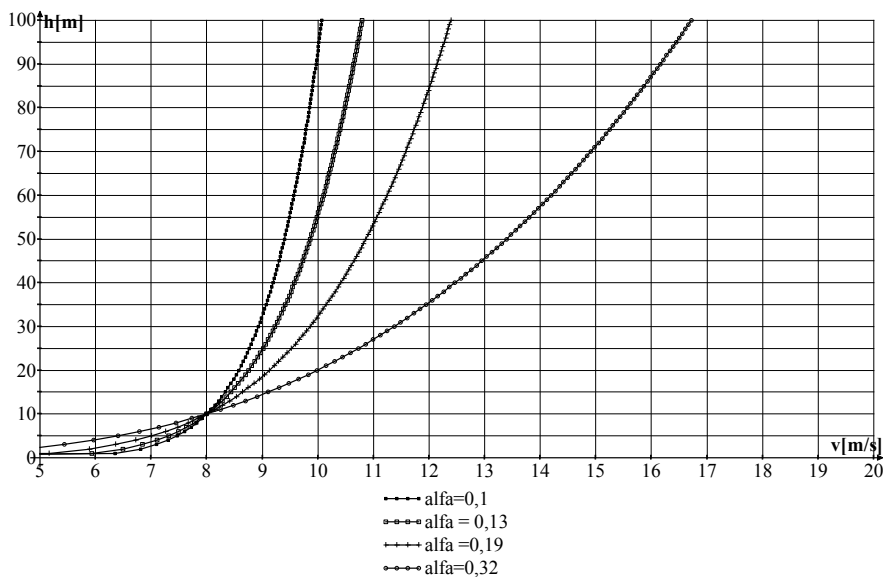
Klasa szorstkości	Wysokość wiatru gradientowego [m]	Opis terenu
0	300	Teren płaski otwarty, na którym wysokość nierówności jest mniejsza od 0.5 m
1	330	Teren płaski otwarty lub nieznacznie pofalowany. Pojedyncze zabudowania lub drzewa
2	360	Teren płaski lub pofalowany z otwartymi przestrzeniami. Grupy drzew lub niska zabudowa.
3	400	Tereny zalesione, przedmieścia większych miast oraz małe miasta, tereny przemysłowe luźno zabudowane
4	440	Teren z licznymi przeszkodami zlokalizowanymi w niedużej odległości tj. skupiska drzew, budynków w odległości min. 300 [m] od miejsca obserwacji.
5	500	Teren z licznymi dużymi przeszkodami położonych blisko siebie, obszary leśne, centra dużych miast

Tabela 2. Współczynniki szorstkości terenu oraz α dla czasów uśredniania 1 h, 10 min, 2 min oraz 2 s.

Klasa szorstkości terenu	0	1	2	3	4	5
Współczynnik szorstkości z_0	0,005	0,007	0,010	0,015	0,025	0,050
α dla czasu uśredniania 1 h	0,150	0,165	0,190	0,220	0,270	0,350
α dla czasu uśredniania 10 min	0,130	0,140	0,155	0,170	0,200	0,245
α dla czasu uśredniania 2 min	0,115	0,120	0,125	0,135	0,150	0,175
α dla czasu uśredniania 2 s	0,075	0,075	0,080	0,080	0,085	0,085

Zgodnie z potęgową zależnością (1) przedstawiono na rys.10 wykres prędkości wiatru w zależności od wysokości h przy różnych współczynnikach chropowatości α . Do obliczeń przyjęto prędkość średnioroczną 8 m/s mierzoną na wysokości 10m.

Rysunek 12. Rozkład prędkości wiatru w funkcji wysokości h [m] dla różnych współczynników chropowatości terenu



Created with a trial version of Advanced Grapher - <http://www.alemum.com/grapher/>

Źródło: Opracowanie własne.

Poprawna analiza wpływu zmiany wysokości na zasoby energii wiatru jest bardzo ważna, gdyż jak wiemy prędkość wiatru rośnie wraz z wysokością, a szybkość tego wzrostu zależy od współczynnika szorstkości terenu bądź też współczynnika α . Precyzyjne oszacowanie tego współczynnika jest istotną sprawą, gdyż szacujemy go na podstawie danych pomiarowych z niższych wysokości i zazwyczaj przenosimy go ze wzoru (1) na wyższe.

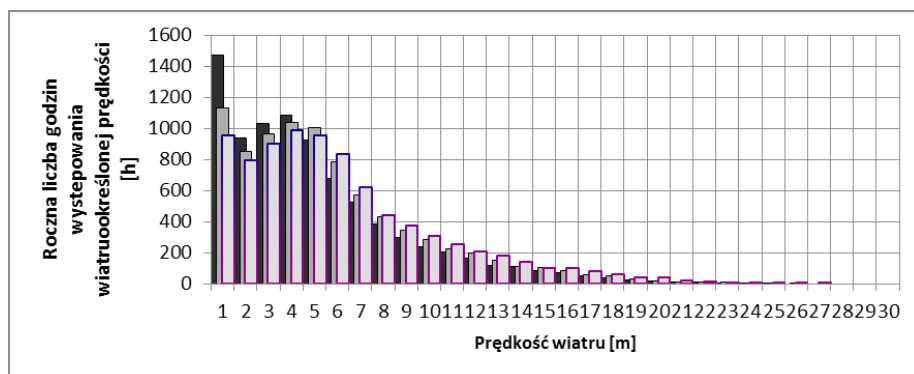
Korzystając z tab.1 i tab.2 przyjmujemy dla lokalizacji Rymanów klasę szorstkości nr 2, czyli współczynnik potęgowy $\alpha=0,2$. Na podstawie tych informacji wyznaczono średnie prędkości wiatru na wyższych wysokościach korzystając z danych z wysokości niższych i porównano je z rzeczywistymi średnimi prędkościami obliczonymi z danych pomiarowych. Dane zestawiono w tab.3.

Tabela 3. Średnia prędkość wiatru na różnych wysokościach dla lokalizacji Rymanów, obliczona dla przyjętej klasy szorstkości.

Wysokość [m]	Prędkość średnia rzeczywista [m/s]	Prędkość wyznaczona z wysokości 15m [m/s]	Prędkość wyznaczona z wysokości 30m [m/s]
15	4,733549	–	–
30	5,232919	5,43742	–
40	6,91781	5,759445	4,94033
100	–	6,91781	6,285387

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych pomiarowych.

Na rys.12 przedstawiono histogramy prędkości wiatru mierzonej na różnych wysokościach. Widoczne jest to, że wraz ze wzrostem wysokości pomiaru i jednocześnie wzrostem prędkości wiatru, histogram przesuwa się w kierunku wyższych wartości prędkości oraz wzrasta gęstość mocy wiatru. Warto zwrócić uwagę, że przy zmianie wysokości pomiaru z 15 metrów na 40 moc wiatru wzrosła o blisko 50%.

Rysunek 13. Histogram prędkości wiatru mierzony na trzech wysokościach dla lokalizacji Rymanów

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych pomiarowych.

Wskaźniki ekonomiczne stosowane do analiz efektywności inwestycji

Przedstawione w pracy analizy wykonane zostały w oparciu o najbardziej upowszechnione wskaźniki ekonomiczne. Te właśnie wskaźniki zebrane są do oceny efektywności inwestycji przemysłowych przez Organizację Narodów Zjednoczo-

nych dla Rozwoju Przemysłowego – UNIDO (United Nations Industrial Development Organization). Należą do nich:

- CF (Cash Flow) – przepływ pieniądza. Przedstawienie sytuacji ekonomicznej w formie bilansu strumieni pieniędzy wpływających i wypływających od inwestora.
- NCF (Net Cash Flow) – przepływ pieniądza netto. W tym przypadku bilanse wykonywane są dla strumieni pieniędzy netto.
- PV (Present Value) – wartość obecna. Wartość, dzisiejsza danej kwoty.
- FV (Future Value) – wartość przyszła. Wartość, jaką po określonym czasie będą miały posiadane dzisiaj kwoty pieniędzy. Określona jest stopą dyskontową przyjmowaną na podstawie prognoz. Pomiędzy wielkościami PV oraz FP zachodzi zależność:

$$PV = FV(1 + r)^{-t}$$

gdzie:

r – przyjęta stopa dyskonta

t – liczba lat, dla których pieniądza z terażniejszej na przyszłą

- PBT (Pay Back Time) – czas zwrotu nakładów. Określa czas, po którym wydatki inwestycyjne zostaną zrównoważone przez wpływy z dokonanej inwestycji. Jest określany w dwóch wersjach:
 1. SPBT (Simply Pay Back Time) – prosty czas zwrotu nakładów; określany bez uwzględnienia stopy dyskontowej;
 2. DBPT (Discount by Pay Back Time) – zdyskontowany czas zwrotu nakładów; określany z uwzględnieniem stopy dyskontowej.
- NPV (Net Present Value) – wartość bieżąca netto. Określa wartość kapitału stanowiącego różnicę pomiędzy wpływami a wypływami kapitału, określoną oddzielnie dla każdego roku, w całym przyjętym okresie funkcjonowania inwestycji, liczoną z uwzględnieniem stopy dyskontowej (stałej stopy dyskontowej dla całego okresu obliczeniowego). Wskaźnik NPV oblicza się według następującej formuły:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{NCF_t}{(1 + r)^t}$$

gdzie:

n – liczba lat, dla których wykonujemy obliczenia

t – kolejny rok trwania przedsięwzięcia z rozpatrywanego przedziału od 0 do n ; jako zerowy przyjmuje się rok uruchomienia produkcji

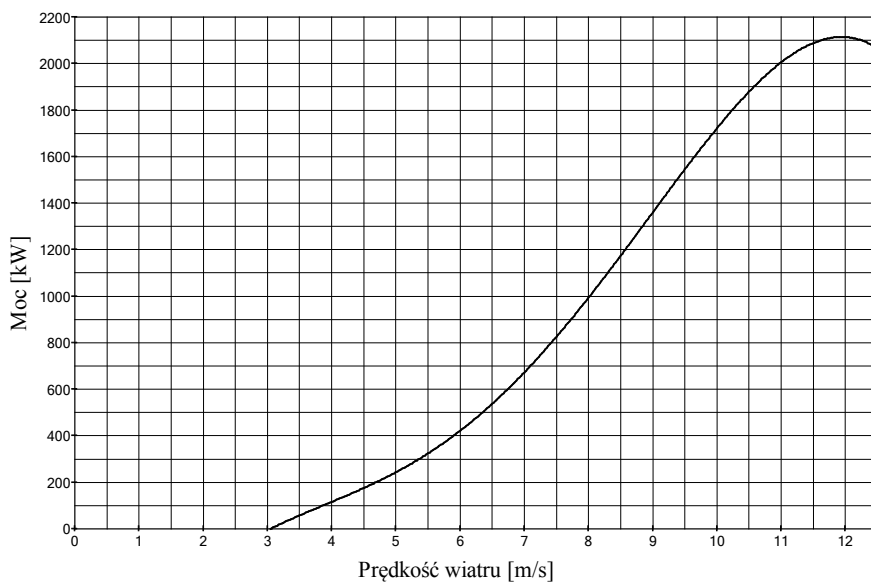
- IRR (Internal Rate of Return) – wewnętrzna stopa zwrotu. Jest to taka wielkość stopy dyskontowej – r , przy której następuje zrównanie zdyskontowanych wpływów ze zdyskontowanymi wydatkami ($NPV = 0$).

Określenie efektywności ekonomicznej inwestycji w energetyce wiatrowej

Chcąc oszacować roczną ilość energii wyprodukowaną przez konkretną elektrownię musimy znać jej podstawowe parametry. Do analizy wybieramy elektrownię trójłopatową REpower MM92.

Zależność pomiędzy mocą generatora a prędkością wiatru dla tej elektrowni, którą podaje producent przedstawia rys.13.

Rysunek 14. Krzywa mocy elektrowni REpower 92



Created with a trial version of Advanced Grapher - <http://www.alartum.com/grapher/>

Źródło: Opracowanie własne [za: <http://www.risoe.dk>].

Analiza przeprowadzona zostanie z wykorzystaniem wskaźników DPBT oraz NCF ekonomicznej inwestycji. Równocześnie uwzględniony zostanie szeroki zakres zmian niektórych parametrów, które w istotny sposób mogą wpływać na wartość tych wskaźników.

Parametrami uwzględnianymi podczas analiz będą:

- średnia prędkość wiatru w miejscu realizacji inwestycji, (lokalne zasoby energii wiatru)
- moc nominalna elektrowni
- koszt elektrowni i koszt 1kW zainstalowanej mocy
- ceny energii
- wartość stopy dyskontowej.

Obecnie przyjmuje się, że koszt inwestycji w każdy 1MW mocy kosztuje około 8 milionów złotych i taka wartość została przyjęta.

Ocena efektywności w oparciu o wskaźniki NCF oraz DPBT

Analizę wpływu lokalizacji (warunków wiatrowych) na efektywność inwestycji przedstawiono dla dwóch wymienionych miejscowości: Rymanów oraz wola Rafałowska. Przyjęto stały wzrost ceny o 5% w skali roku oraz stopę dyskontową $r = 0,05$.

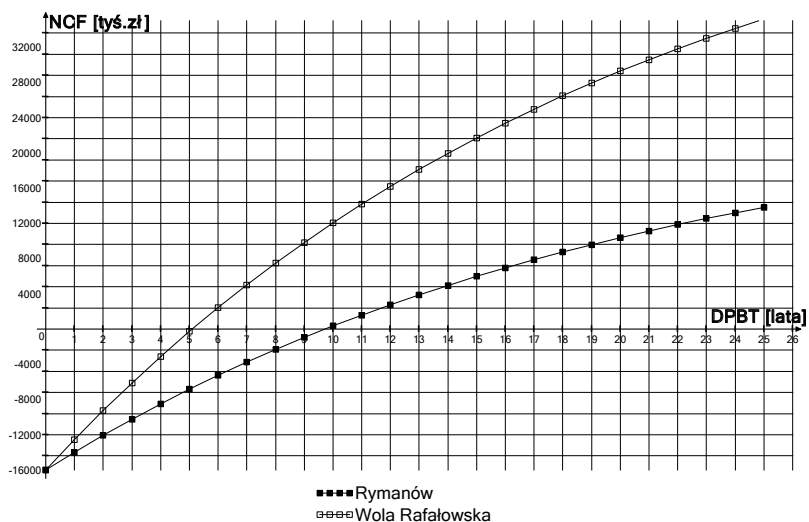
W celu przeanalizowania wpływu stopy dyskontowej – r , przyjęto dla niej wartości: 0,05;0,08;0,1. Analiza dotyczyła już tylko miejscowości Rymanów.

W celu przeprowadzenia analizy wpływu wysokości pomiarów na dobre oszacowanie warunków wiatrowych a co za tym idzie, na zwrot inwestycji, również wykorzystano pomiary w miejscowości Rymanów.

Znając wartość średnia prędkości wiatru, na podstawie rozkładów Weibulla określono przez ile godzin w ciągu roku będzie wiał wiatr z daną prędkością. Mając określone prędkości wiatru oraz charakterystyki elektrowni określające zależność mocy osiąganą przez elektrownię od prędkości wiatru, możemy wyliczyć ile dana elektrownia wyprodukuje energii elektrycznej a następnie wykorzystując wskaźniki NCF oraz DPBT oszacować zwrot inwestycji.

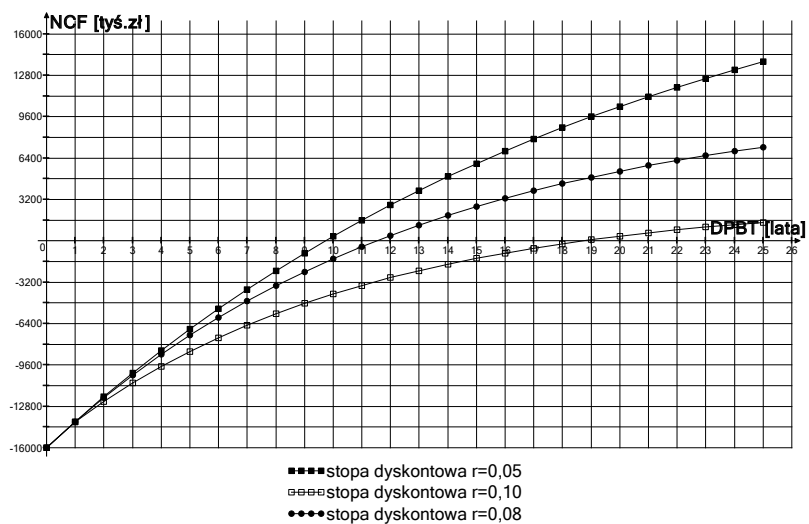
Korzystając z rys.14 widzimy, że posadowienie tej samej elektrowni wiatrowej w dwóch różnych miejscowościach o odmiennych warunkach wiatrowych może mieć ogromny wpływ na oszacowanie efektywności ekonomicznej inwestycji.

Rysunek 15. Wpływ lokalizacji na wartości wskaźnika NCF oraz DBPT

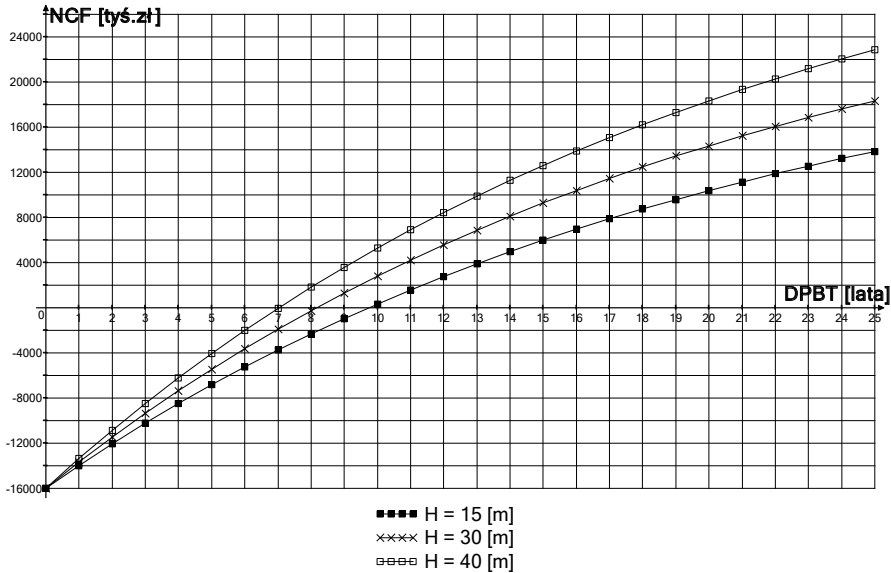


Źródło: Opracowanie własne.

Rysunek 16. Wpływ stopy dyskontowej na wartości wskaźnika NCF oraz DBPT



Źródło: Opracowanie własne.

Rysunek 17. Wpływ wysokości pomiarów wiatru na wartości wskaźnika NCF oraz DPBT

Źródło: Opracowanie własne.

Równie zauważalny wpływ na czas zwrotu inwestycji na wysokość na której dokonywane są pomiary wiatru poprzedzające inwestycję (rys.15). Odpowiednie oszacowanie współczynnika szorstkości terenu daje bardziej wiarygodne wyniki. Najbardziej właściwe były pomiary na wysokości zbliżonej wysokości osi wirnika elektrowni wiatrowej, która ma być posadowiona w danej lokalizacji.

Natomiast wpływ zmian stopy dyskontowej na zmiany wskaźników NCF oraz DPBT pod przedstawia rys.15.

Podsumowanie

Podstawowym warunkiem do decyzji o budowie na danym terenie elektrowni wiatrowej jest informacja o lokalnych zasobach energii wiatru. Z energetycznego punktu widzenia lokalne zasoby wiatru dobrze charakteryzuje średnioroczna prędkość wiatru. Średnioroczna prędkość wiatru nie jest dla danego miejsca na ziemi, dla wszystkich lat jednakowa. Występują duże różnice pomiędzy średniorocznymi prędkościami dla poszczególnych lat. Jeszcze większe różnice pomiędzy średniorocznymi prędkościami wiatru występują pomiędzy miejscowo-

ściami. Warunki panujące w naszym regionie są odmienne od tych panujących w Polsce zachodniej, północnej a zwłaszcza w innych częściach Europy. Produkowane tam elektrownie ze względów konstrukcyjnych nie są niedostosowane do naszych warunków wiatrowych. Średnioroczne prędkości wiatru na obszarze, na którym ma powstać elektrownia wiatrowa wraz z założoną wielkością produkcji energii elektrycznej stanowią podstawowe parametry do odpowiedniego doboru elektrowni. Znajomość właściwości wiatru i jego charakterystyk ma podstawowe znaczenie do oceny zasobów energetycznych danego regionu, celowości inwestowania w budowę elektrowni wiatrowej, dobór najkorzystniejszego rozwiązania konstrukcyjnego elektrowni.

Literatura

1. Anwar M.P., Laser positioning measurement system for Wind Tunnel Studies of structures, National University of Singapore, 2005, (praca doktorska) pozyskana z <http://scholarbank.nus.edu.sg>.
2. Bianchi, FD, de Battista, H, Mantz, RJ., Wind turbine control systems: principles, modelling and gain scheduling design, London: Springer-Verlag, 2007.
3. Burton T. Sharpe D., Jenkins N., Bossanyi E., Wind Energy Handbook, John Wiley, 2001
4. Ciechanowicz W.: Energetyka, środowisko i ekonomia. Warszawa, Wyd. Instytutu Badań Systemowych PAN 1997.
5. Gumuła S., Woźniak A., Jak określić stopień wykorzystania mocy elektrowni wiatrowej? Czysta energia”1/2008.
6. Gumuła S., Woźniak A., Wpływ charakterystyki elektrowni wiatrowej na wykorzystanie mocy nominalnej i wskaźniki ekonomiczne produkcji energii materiały konferencyjne Konferencji Naukowej "Czysta Energia – Czyste Środowisko 2008" Warszawa 2008.
7. Gumuła S., Woźniak A., Wpływ charakterystyki mocy elektrowni wiatrowej na wskaźniki energetyczne i ekonomiczne produkcji energii materiały konferencyjne IVej Konferencji pt., Ekonomiczne Aspekty Energii Ze Źródeł Odnawialnych W Perspektywie 2020 Roku” 2008
8. Gumuła S., Woźniak A.: Jak określić stopień wykorzystania mocy elektrowni wiatrowej? Czysta Energia 1/2008.
9. Hau E., Wind Turbines 2nd Edition, /Springer 2006.

10. Kotowicz J., Janusz K.: Sposoby redukcji emisji CO₂ z procesów energetycznych. Rynek Energii nr 1/2007.
11. Kucowski J., Laudyn D., Przekwas M.: Energetyka, a ochrona środowiska. Warszawa, WNT 1997.
12. Manwell J.F., McGrowan J.G., Rogers A.L., Wind Energy Explained, Theory Design and Application, John Wiley & Son Ltd, 2002.
13. Soliński I. : Energetyczne i ekonomiczne aspekty wykorzystania energii wiatrowej. Kraków, Wyd. IGSMiE PAN 1999.
14. Strupczewski A.: Analiza korzyści zagrożeń związanych z różnymi źródłami energii elektrycznej, Wyd.: Polskie Towarzystwo Nukleoniczne, Warszawa 2000.

THE INFLUENCE OF LOCAL WIND CONDITIONS ON ECONOMIC INDICATORS ASSESS THE EFFECTIVENESS OF INVESTMENT IN WIND ENERGY

Summary: Local resources of the kinetic energy of wind characterized the local average wind speed . The average annual wind speed for different areas of the country is very diverse. There are areas in which it is approximately 2 m / s and the areas in which is approx. 8 m / s. Power wind stream flowing on the wind turbine is proportional to the cube of the wind speed and the second power of the diameter of the paddle wheel of the turbine . The diameters of the paddle wheels of wind turbines are very diverse. Within the limits of ok.0,5 m to about 100 m. The profitability of investments in the wind power plant is , of course, highly dependent on local wind resource and wind conditions at the site chosen for the location of the power plant is an important factor in the decisions of the investor. The purpose of this article is to estimate the financial result of investment in wind energy by knowing the local wind resource .

Key words: wind energy, wind turbine, economic efficiency indicators

Translated by Agnieszka Woźniak