

Monika Lisowska

Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych,
Zakład Klimatologii
e-mail: mlisowska@uw.edu.pl

**ZALEŻNOŚĆ ZMIAN PRĘDKOŚCI WIATRU WRAZ Z WYSOKOŚCIĄ
OD CYRKULACJI ATMOSFERYCZNEJ NA PRZYKŁADZIE ŻEŃSKA
(2008-2009)**

**The influence of atmospheric circulation on vertical wind speed changes in
Żeńsko (2008-2009)**

Słowa kluczowe: cyrkulacja atmosferyczna, Pomorze Zachodnie, profil pionowy wiatru
Key words: atmospheric circulation, North-West Poland, wind speed at various heights

WPROWADZENIE

Do połowy lat 1970. w Polsce niewielu badaczy zajmowało się badaniem tak istotnego elementu meteorologicznego, jakim jest wiatr. Dostępne opracowania były poświęcone przede wszystkim prędkości wiatru. Należą do nich m. in. prace: Piaseckiego (1952), Lewińskiej (1959), Parczewskiego (1969). Przełom w badaniach nastąpił wraz ze wzrostem zainteresowania możliwościami wykorzystania wiatru dla potrzeb technicznych. Wiązało się to z określeniem oddziaływania wiatru na konstrukcje techniczne oraz wyznaczeniem jego potencjału energetycznego. Do tego typ prac można zaliczyć opracowania: Żurańskiego (1978), Sobolewskiego i Żurańskiego (1981a, 1981b), Lorenc (1996). Wraz z rozwojem alternatywnych źródeł energii w nauce zagranicznej wyodrębnił się nowy kierunek badawczy – *Energy Meteorology*. Znajduje to swoje odbicie w literaturze – wiele prac poświęconych jest analizom wiatru na potrzeby budownictwa oraz badaniom zasobów energetycznych wiatru, m.in. Weisser (2003), Li, Li (2005), Tar (2008), Elamouri, Ben Amar (2008), Safari, Gasore (2010).

W dotychczasowych badaniach (m. in. Lorenc 1996; Trepińska 2004-2005; Pietrek i in. 2008) zmiany wiatru wraz z wysokością w warstwie granicznej atmosfery były określane za pomocą funkcji interpolacyjnych na podstawie wyników pomiarów ze standardowych stacji meteorologicznych. Równania opierają się na współczynniku szorstkości, który jest funkcją wysokości elementów podłoża, wyrażaną liczbowo (Kopcewicz 1959). Ze względu na trudności w prawidłowym

oszacowaniu parametru szorstkości badania profilu pionowego wiatru mogą być niedokładne i nie w pełni odzwierciedlać zmiany zachodzące w warstwie granicznej atmosfery.

Do wyznaczania teoretycznych prędkości wiatru na różnych wysokościach można wykorzystywać wzór potęgowy lub logarytmiczny. Jak zauważył Flaga (2008), pierwszy z nich był powszechniej stosowany w starszych badaniach, szczególnie w analizach inżynierskich. Drugi natomiast zyskał popularność w ostatnich latach, zwłaszcza w badaniach meteorologicznych. Oba opierają się na współczynniku szorstkości terenu, który jest zależny od sposobu zagospodarowania terenu: obszary otwarte, rolnicze, zadrzewione, zabudowane. Wraz z rozwojem badań pojawiło się kilka klasyfikacji szorstkości podłoża. Do najstarszych należy Davenporta (1960), zmodyfikowana przez Wieringa (1992). W Polsce często odwoływano się do klasyfikacji Żmudy (1986). Ostatnio głównie wykorzystuje się funkcję logarytmiczną i kategorie terenu zawarte w normie europejskiej EN 1991-1-4 (2005). Należy jednak podkreślić, że klasy szorstkości we wszystkich klasyfikacjach odnoszą się do terenów jednorodnych bez uwzględnienia cech lokalnych, takich jak występowanie wzgórz, dolin czy obecność zbiorników wodnych.

W polskiej literaturze brak jest badań profilu pionowego wiatru, opartych na danych empirycznych. W związku z tym przy wykorzystaniu danych z masztu wiatrowego w Żeńsku (województwo zachodniopomorskie), opisano przebieg roczny i dobowy prędkości wiatru na różnych wysokościach. Lokalizacja miejsca badań została wybrana ze względu urozmaicone ukształtowanie terenu oraz obecność jezior polodowcowych. Celem badań było również określenie wpływu cyrkulacji atmosferycznej na zmiany prędkości wiatru wraz z wysokością. Szczególną uwagę zwrócono na sytuacje baryczne i typy cyrkulacji, przy których występują najmniejsze i największe gradienty pionowe prędkości wiatru. Takie analizy mogą być wykorzystywane przy ocenie zasobów energetycznych wiatru. Na ich podstawie można wyznaczać okresy dużej i małej mocy wiatru, a tym samym produkcji energii elektrycznej.

METODY BADAŃ I OBSZAR BADAWCZY

W badaniach wykorzystano dane z lat 2008 i 2009, pochodzące z masztu wiatrowego w Żeńsku. Prędkość wiatru była mierzona na dwóch wysokościach – 25 i 50 m nad poziomem gruntu. Wszystkie dane były uśredniane z krokiem czasowym 10-minutowym. Pomiary na maszcie wiatrowym były prowadzone w celu określenia zasobów energetycznych wiatru okolic Żeńska. Cyrkulacja atmosferyczna została opisana na podstawie *Liczbowej klasyfikacji typów cyrkulacji i typów pogody dla Polski* Lityńskiego (1969), zmodyfikowanej przez Pianko-Kluczyńską (2007).

Jak zauważył Kopcewicz (1959), do najważniejszych czynników wpływających na zmiany w profilu pionowym wiatru należą: ukształtowanie terenu, szorstkość podłoża, czas uśredniania wyników pomiarów oraz rodzaj cyrkulacji atmos-

ferycznej. W niniejszym opracowaniu podjęto próbę określenia wpływu cyrkulacji atmosferycznej na zmiany prędkości wiatru wraz z wysokością. Najpierw na podstawie danych 10-minutowych obliczono średnie godzinowe, dobowe i miesięczne prędkości wiatru na obu wysokościach. Następnie wykorzystując średnie dobowe, wyliczono różnice prędkości wiatru między dwoma poziomami i na tej podstawie obliczono gradienty prędkości wiatru ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)/10 m. Wyznaczono również największe (powyżej 0,9 percentyla) i najmniejsze (poniżej 0,1 percentyla) zmiany prędkości wiatru wraz z wysokością. Następnie obliczono prawdopodobieństwo warunkowe ich występowania w makrotypach i typach cyrkulacji atmosferycznej.

Na podstawie danych 10-minutowych opisano częstość występowania wiatru w przedziałach prędkości, które zostały wyznaczone ze względu na możliwości jego wykorzystania w energetyce wiatrowej. W przedziale $0\text{-}3,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ zawierają się prędkości wiatru nieużyteczne dla pozyskiwania energii. Od średniej prędkości równej $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ włączają się elektrownie wiatrowe, przy czym swoją maksymalną moc osiągają zwykle przy prędkości $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Przy przekroczeniu prędkości wiatru $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ siłownie są wyłączane ze względu na duże ryzyko uszkodzenia wirnika (Flaga 2008).

Żeńsko położone jest w województwie zachodniopomorskim, w powiecie Choszczno (ryc. 1). Zgodnie z podziałem fizycznogeograficznym Kondrackiego (1994) jest to obszar Pojezierza Choszczeńskiego. Charakteryzuje się rzeźbą polodowcową oraz występowaniem łuków wzgórz morenowych (maksymalna wysokość 100-120 m n.p.m.) i rynien polodowcowych. Jest to obszar reprezentujący typ krajobrazu pojeziernego.



Ryc. 1. Położenie Żeńska (opracowanie własne na podstawie www.maps.google.pl)

Fig. 1. Location of Żeńsko (own work based on www.maps.google.pl)

Maszt pomiarowy był zlokalizowany około 900 m na północo-zachód od Żeńska, w odległości niecałych 2 km od jeziora rynnowego Raduń, na wysokości 92 m n.p.m. Są to tereny płaskie wykorzystywane rolniczo. W najbliższej okolicy nie występują żadne zwarte kompleksy leśne.

WYNIKI

Prędkość wiatru

W latach 2008-2009 średnia prędkość wiatru w Żeńsku na wysokości 25 m nad poziomem gruntu wyniosła $5,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, a na wysokości 50 m $5,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

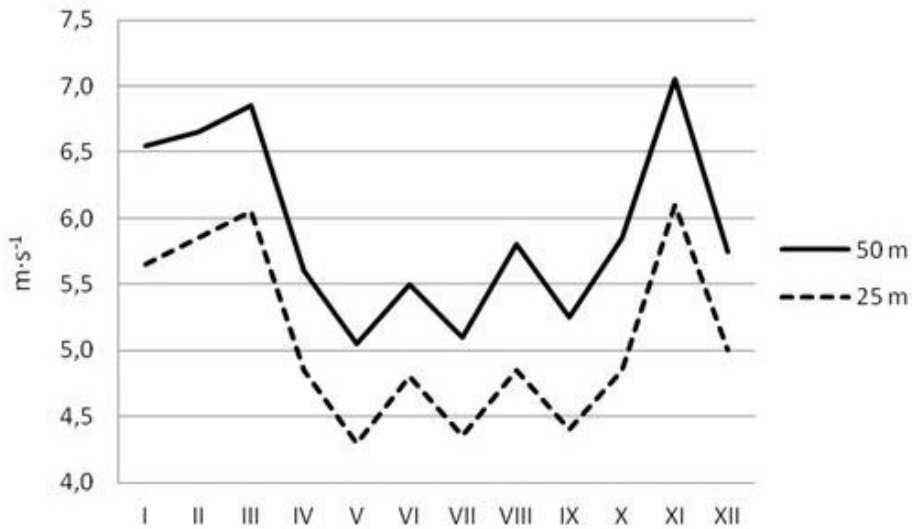
Tabela 1. Częstość (%) prędkości wiatru w przedziałach na wysokości 25 i 50 m nad poziomem gruntu (Żeńsko, 2008-2009)

Table 1. Frequency (%) of occurrence wind in wind speed classes at 25 and 50 m heights above ground level (Żeńsko, 2008-2009)

$v \text{ (m}\cdot\text{s}^{-1})$	III-V	VI-VIII	IX-XI	XII-II	I-XII
25 m					
0 - 3,9	29,3	25,5	26,9	29,8	27,9
4 - 11,9	69,6	74,5	73,1	69,6	71,7
12 - 24,9	1,1	0,0	0,0	0,6	0,4
≥ 25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
50 m					
0 - 3,9	15,8	12,0	15,9	18,8	15,6
4 - 11,9	83,2	88,0	83,5	80,1	83,7
12 - 24,9	1,1	0,0	0,5	1,1	0,7
≥ 25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

W Żeńsku na wysokości 25 m nad poziomem gruntu średnio przez około 72% całego okresu pomiarowego wiał wiatr, który mógł być wykorzystywany do generowania energii w siłowniach wiatrowych. Na wysokości 50 m częstość prędkości wiatru w przedziałach $4-11,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ i $12-24,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ była jeszcze większa i osiągnęła ponad 84,4%. Na obu wysokościach lepsze warunki do produkcji energii wiatrowej wystąpiły latem, a gorsze zimą. W Żeńsku nie zaobserwowano średnich dobowych prędkości wiatru powyżej $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, które mogłyby doprowadzić do uszkodzenia turbin wiatrowych. Ze względu na dużą częstość występowania użytecznych prędkości wiatru, jest to bardzo dobry region do rozwoju energetyki wiatrowej.

Na obu wysokościach pomiarowych większe prędkości wiatru wystąpiły w chłodnej połowie roku. Największa średnia miesięczna prędkość wiatru wystąpiła w listopadzie. Na poziomie 50 m nad poziomem gruntu wyniosła ona $7,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, a na poziomie 25 m $6,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Ciepła połowa roku charakteryzowała się wyraźnie mniejszymi prędkościami wiatru. Najmniej wietrznym miesiącem był maj. Średnia



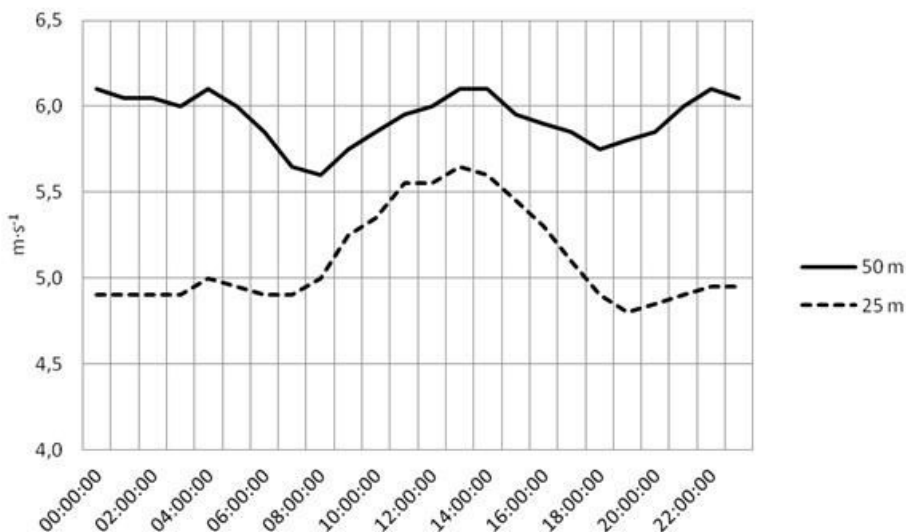
Ryc. 2. Przebieg roczny średniej prędkości wiatru na wysokości 25 i 50 m nad poziomem gruntu (Żeńsko, 2008-2009)

Fig. 2. Monthly average wind speeds at 25 and 50 m heights above ground level (Żeńsko, 2008-2009)

prędkość wiatru w tym miesiącu wyniosła $5,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na wysokości 50 m i $4,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na wysokości 25 m. Różnice zaobserwowane w rocznym przebiegu prędkości wiatru mogą być uwarunkowane cyrkulacją atmosferyczną i warunkami anemobarycznymi. Przez Pomorze Zachodnie w miesiącach zimowych przemieszczają się układy cyklonalne znad Oceanu Atlantyckiego w kierunku wschodniej części Europy. Natomiast w miesiącach letnich zaznacza się przewaga układów antycyklonalnych (Kwicień 1987).

Dobowy przebieg prędkości wiatru w Żeńsku był różny na obu wysokościach pomiarowych. Na poziomie 25 m miał on rozkład jednomodalny, z maksimum przypadającym na godziny popołudniowe. Najmniejsze prędkości wiatru w ciągu doby występowały w godzinach porannych (06.00-08.00) i wieczornych (18.00-20.00). Na wysokości 50 m nad poziomem gruntu przebieg dobowy prędkości wiatru zmienił swój charakter na dwumodalny. W ciągu doby zaznaczały się dwa maksima – jedno w godzinach popołudniowych, a drugie około północy. Podobnie jak na wysokości 25 m, najmniejsze prędkości wiatru występowały w godzinach porannych i wieczornych (ryc. 3).

Przebieg dobowy prędkości wiatru charakteryzuje się zmiennością sezonową. Największe wahania dobowe na obu wysokościach zaobserwowano latem, a najmniejsze zimą. Ponadto od grudnia do lutego zanikło występowanie wyraźnych maksimów i minimów w ciągu doby. W tym okresie nieznaczny spadek prędkości wiatru był charakterystyczny dla godzin popołudniowych na wysokości 50 m i dla



Ryc. 3. Przebieg dobowy prędkości wiatru na wysokości 25 i 50 m (Żeńsko, 2008-2009)

Fig. 3. Diurnal variation of wind speeds at 25 and 50 m heights (Żeńsko, 2008-2009)

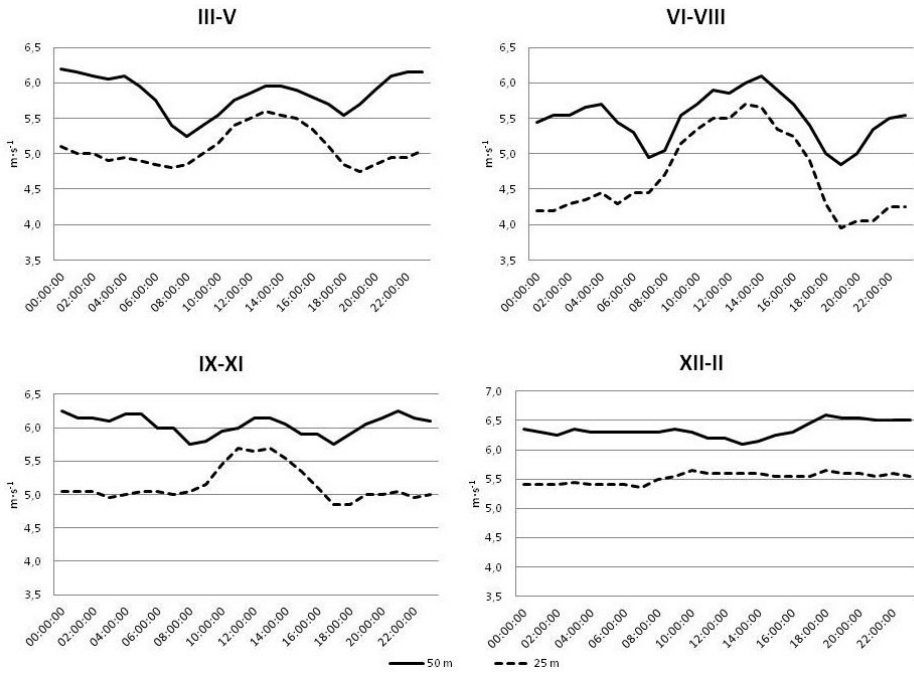
godzin porannych na wysokości 25 m. Zmienność sezonowa dobowego przebiegu prędkości wiatru jest uwarunkowana poziomym gradientem ciśnienia oraz stanem równowagi atmosfery (Kopcewicz 1959).

ZMIANY PRĘDKOŚCI WIATRU WRAZ Z WYSOKOŚCIĄ

W latach 2008-2009 średni roczny wzrost prędkości wiatru z wysokością w warstwie 25-50 m wynosił $0,34 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na 10 m. Najmniejsze gradienty wystąpiły wiosną i latem, a największe jesienią i zimą. Najmniejszy wzrost prędkości wiatru był obserwowany w czerwcu – $0,28 \text{ (m}\cdot\text{s}^{-1})/10\text{m}$, a największy w październiku – $0,4 \text{ (m}\cdot\text{s}^{-1})/10\text{m}$ (ryc. 5).

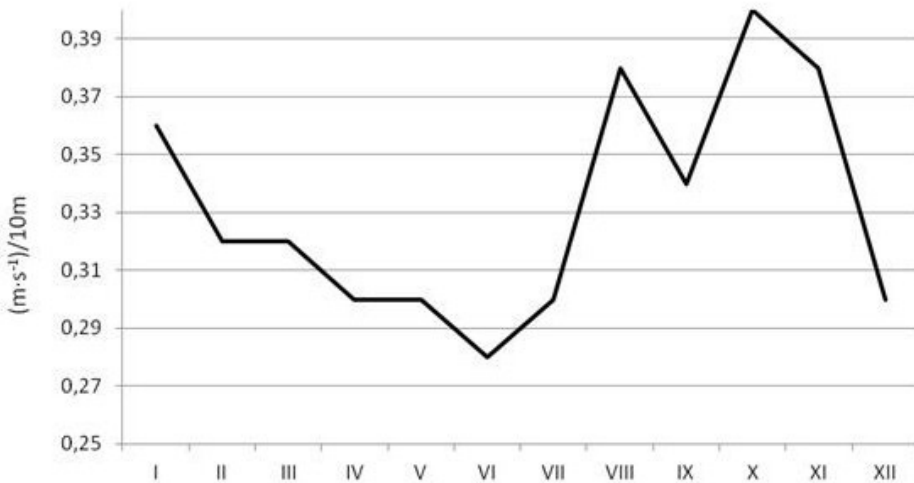
Takie zróżnicowanie pionowego gradientu prędkości wiatru w ciągu roku można tłumaczyć stratyfikacją termiczną atmosfery. W cieplej połowie roku w Polsce przeważa równowaga chwiejna, rozwijają się wtedy pionowe prądy pochodzenia termicznego lub termiczno-dynamicznego. Ciepłe, wolno poruszające się powietrze przy powierzchni Ziemi jest wynoszone do góry, co powoduje spadek prędkości poziomego ruchu powietrza w wyższych warstwach i tym samym zmniejszenie pionowego gradientu prędkości wiatru.

W chłodnej połowie roku dominuje równowaga stała i obojętna. W tym przypadku ruchy pionowe powietrza nie rozwijają się, a więc wpływ podłoża na wiatr nie jest przenoszony do wyższych warstw atmosfery. Na niewielkich wysokościach (kilkunastu metrów) występuje wiatr o małej prędkości, ale na wysokości kilkudziesięciu metrów nad poziomem gruntu obserwowany jest wiatr o dużych



Ryc. 4. Przebieg dobowy prędkości wiatru na wysokości 25 i 50 m w porach roku (Żeńsko, 2008-2009)

Fig. 4. Diurnal variation of wind speeds at 25 and 50 m heights in seasons (Żeńsko, 2008-2009)



Ryc. 5. Przebieg roczny pionowych gradientów prędkości wiatru (Żeńsko, 2008-2009)

Fig. 5. Monthly average wind speed gradients (Żeńsko, 2008-2009)

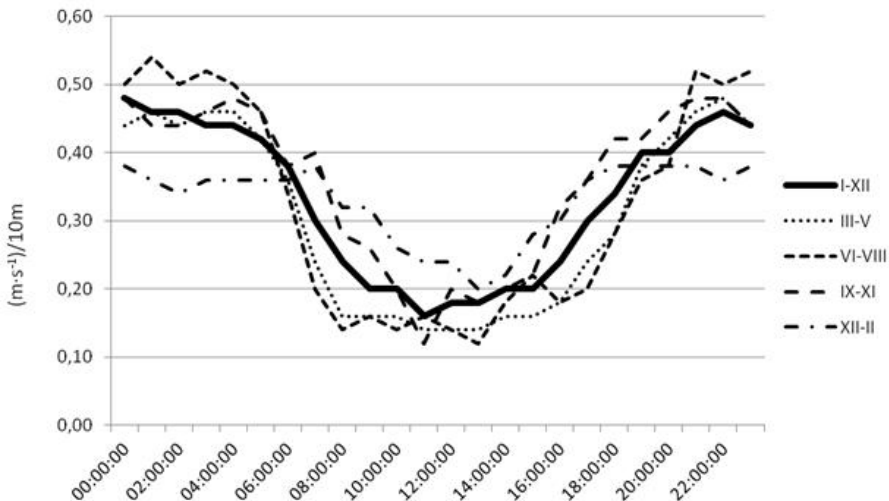
prędkościach (Kozuchowski 1998). W związku z tym występują duże pionowe gradienty prędkości wiatru. Wzrastają one wraz z mocniejszym zaznaczeniem się równowagi stałej powietrza.

Przebieg dobowy prędkości wiatru charakteryzują się maksimum około północy i minimum około południa. Największe wahania gradientu pionowego stwierdzono latem – od $0,5 \text{ (m}\cdot\text{s}^{-1})/10 \text{ m}$ o godzinie 01.00 do $0,12 \text{ (m}\cdot\text{s}^{-1})/10 \text{ m}$ o godzinie 13.00. Najmniejsze wahania wystąpiły zimą – od $0,38 \text{ (m}\cdot\text{s}^{-1})/10 \text{ m}$ o godzinie 23.00 do $0,2 \text{ (m}\cdot\text{s}^{-1})/10 \text{ m}$ o godzinie 13.00.

Zaobserwowana zmienność dobową pionowych gradientów prędkości wiatru jest przeciwieństwem zmienności dobowej prędkości wiatru na poziomie 25 m nad poziomem gruntu. Duże wahania wzrostu prędkości wiatru wraz z wysokością mogą być uwarunkowane tempem nagrzewania się podłoża w ciągu doby i zmianami zachodzącymi w bilansie cieplnym powierzchni czynnej.

WPLYW CYRKULACJI ATMOSFERYCZNEJ NA ZMIANY PRĘDKOŚCI WIATRU Z WYSOKOŚCIĄ

Na podstawie *Liczbowej klasyfikacji typów cyrkulacji i typów pogody dla Polski* Lityńskiego (1969), zmodyfikowanej przez Pianko-Kluczyńską (2007), stwierdzono, że w latach 2008-2009 najczęściej występowały układy antycyklonalne, przez prawie 38% dni w roku, natomiast najrzadziej bezgradientowe, przez 29% dni w roku (tab. 2). Trudno jest wyróżnić dominujące typy cyrkulacji; z największą częstością, ponad 5%, występowały typy: E_a , NE_a , S_c , SW_c i NW_c .



Ryc. 6. Przebieg dobowy pionowych gradientów prędkości wiatru (Żeńsko, 2008-2009)

Fig. 6. Diurnal variation of wind speeds gradients between 25 and 50 m heights (Żeńsko, 2008-2009)

Tabela 2. Częstość makrotypów i typów cyrkulacji (2008-2009)**Table 2.** Frequency of occurrence macrotypes and circulation types (2008-2009)

Makrotyp macrotype	Liczba przypadków number of cases	Częstość (%) frequency (%)
a	277	37,9
c	242	33,1
0	212	29,0

Typ type	Liczba przypadków number of cases	Częstość (%) frequency (%)
Nc	36	4,9
Na	27	3,7
No	14	1,9
NEc	18	2,5
NEa	41	5,6
NEo	13	1,8
Ec	19	2,6
Eo	48	6,6
Eo	34	4,7
SEc	17	2,3
SEa	21	2,9
SEo	15	2,1
Sc	37	5,1
Sa	30	4,1
So	20	2,7
SWc	37	5,1
SWa	22	3,0
SWo	36	4,9
Wc	19	2,6
Wa	24	3,3
Wo	26	3,6
NWc	37	5,1
NWa	29	4,0
NWo	32	4,4
Oc	22	3,0
Oa	35	4,8
Oo	22	3,0

Określono zależność występowania najmniejszych i największych zmian prędkości wiatru wraz wysokością od cyrkulacji atmosferycznej. Największe i najmniejsze zmiany zostały wyznaczone przy użyciu percentyli – 0,9 największych pionowych gradientów i 0,1 najmniejszych. W latach 2008-2009 0,9 percentyl wyniósł $0,52 \text{ (m}\cdot\text{s}^{-1})/10 \text{ m}$, a powyżej tej wartości wystąpiło 70 przypadków; 0,1 percentyl osiągnął wartość $0,16 \text{ (m}\cdot\text{s}^{-1})/10 \text{ m}$, a poniżej tej wartości zanotowano 71 przypadków.

W celu określenia wpływu cyrkulacji atmosferycznej na występowanie najmniejszych i największych pionowych gradientów prędkości wiatru obliczono częstość i prawdopodobieństwo warunkowe ich występowania w typach cyrkulacji i układach barycznych.

Tabela 3. Częstość i prawdopodobieństwo warunkowe występowania pionowych gradientów prędkości wiatru poniżej 0,1 percentyla (Żeńsko, 2008-2009)

Table 3. Conditional probability and frequency of occurrence wind speed gradients less than 0,1 percentile (Żeńsko, 2008-2009)

Makrotyp <i>macrotype</i>	Liczba przypadków <i>number of cases</i>	Częstość (%) <i>frequency (%)</i>	Prawdopodobieństwo warunkowe (%) <i>conditional probability (%)</i>
a	34	47,9	12,3
c	23	32,4	9,5
0	14	19,7	6,6

Typ <i>type</i>	Liczba przypadków <i>number of cases</i>	Częstość (%) <i>frequency (%)</i>	Prawdopodobieństwo warunkowe (%) <i>conditional probability (%)</i>
Na	2	2,8	7,4
NEc	3	4,2	16,7
NEa	5	7,0	12,2
Ec	6	8,5	31,6
Ea	12	16,9	25,0
Eo	5	7,0	14,7
SEc	5	7,0	29,4
SEa	3	4,2	14,3
SEo	4	5,6	26,7
Sc	6	8,5	16,2
Sa	3	4,2	10,0
SWa	1	1,4	4,5
SWo	1	1,4	2,8
Wo	2	2,8	7,7

NWa	2	2,8	6,9
Oc	3	4,2	13,6
Oa	7	9,9	20,0
Oo	1	1,4	4,5

Najmniejsze pionowe gradienty prędkości wiatru występowały najczęściej w układzie antycyklonalnym. Przy takiej sytuacji barycznej z ponad 12% prawdopodobieństwem można spodziewać się wystąpienia najmniejszych zmian prędkości wiatru wraz z wysokością (tab. 3). Najrzadziej zmiany prędkości wiatru poniżej $0,16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot 10 \text{ m}^{-1}$ występowały w układzie bezgradientowym. Prawdopodobieństwo warunkowe ich wystąpienia również było najmniejsze przy tym makrotypie, 6,6%.

Mimo niewielkiej częstości najmniejszych zmian w profilu pionowym wiatru, największe prawdopodobieństwo ich wystąpienia stwierdzono przy typie cyrkulacji Ec – 31,6%. Także duże, ponad 25%, prawdopodobieństwo wystąpienia gradientów poniżej 0,1 percentyla związane było z typami SEc, SEo i Ea. Nie zanotowano ich przy typach cyrkulacji Nc, No, NEo, So, SWc, Wc, Wa, NWC i NWO.

Tabela 4. Częstość i prawdopodobieństwo warunkowe występowania pionowych gradientów prędkości wiatru powyżej 0,9 percentyla (Żeńsko, 2008-2009)

Table 4. Conditional probability and frequency of occurrence wind speed gradients more than 0,9 percentile (Żeńsko, 2008-2009)

Makrotyp <i>macrotype</i>	Liczba przypadków <i>number of cases</i>	Częstość (%) <i>frequency (%)</i>	Prawdopodobieństwo warunkowe (%) <i>conditional probability (%)</i>
a	23	32,9	8,3
c	26	37,1	10,7
o	21	30,0	9,9

Typ <i>type</i>	Liczba przypadków <i>number of cases</i>	Częstość (%) <i>frequency (%)</i>	Prawdopodobieństwo warunkowe (%) <i>conditional probability (%)</i>
Na	1	1,4	2,8
NEc	1	1,4	3,7
NEa	1	1,4	5,6
NEo	1	1,4	7,7
Eo	1	1,4	2,9
SEc	3	4,3	17,6
SEa	1	1,4	4,8

SEo	1	1,4	6,7
Sc	2	2,9	5,4
Sa	8	11,4	26,7
SWc	11	15,7	29,7
SWa	7	10,0	31,8
SWo	12	17,1	33,3
Wc	2	2,9	10,5
Wa	2	2,9	8,3
Wo	2	2,9	7,7
NWc	2	2,9	5,4
NWa	2	2,9	6,9
NWo	2	2,9	6,3
Oc	4	5,7	18,2
Oa	2	2,9	5,7
Oo	2	2,9	9,1

Prawdopodobieństwo wystąpienia największych pionowych gradientów prędkości wiatru w przypadku wszystkich makrotypów cyrkulacji okazało się podobne. Najmniejsze (8,3%) wystąpiło przy układach antycyklonalnych, a największe przy cyklonalnych (10,7%) (tab. 4).

W typach cyrkulacji SWa i SWo z ponad 30% prawdopodobieństwem można się spodziewać wystąpienia największych pionowych gradientów prędkości wiatru. Równie duże, ponad 25%, prawdopodobieństwo warunkowe ich wystąpienia było przy typach Sa i SWc. Najmniejsze prawdopodobieństwo, poniżej 5%, wystąpienia zmian prędkości wiatru powyżej $0,52 \text{ (m}\cdot\text{s}^{-1})/10\text{m}$ było w typach: Na, Nc, Eo i SEa. Największe gradienty pionowe prędkości wiatru nie wystąpiły w typach No, NEa, Ec, Ea oraz So.

PODSUMOWANIE

W latach 2008-2009 średnia prędkość wiatru w Żeńsku na wysokości 25 m nad gruntem wyniosła $5,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, a na wysokości 50 m $5,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Na obu wysokościach największe prędkości wiatru wystąpiły w chłodnej połowie roku. Ciepła połowa roku charakteryzowała się wyraźnie mniejszymi prędkościami wiatru. Najbardziej wietrznym miesiącem był listopad, a najmniej maj. Rocznym przebieg prędkości wiatru jest uwarunkowany poziomym gradientem ciśnienia oraz stanem równowagi atmosfery.

Dobowy przebieg prędkości wiatru w Żeńsku był różny na obu wysokościach pomiarowych. Na poziomie 25 m nad poziomem gruntu przyjął on rozkład jednodobowy z maksimum w godzinach popołudniowych i minimum w nocnych, a na wysokości 50 m – dwudobowy, z maksimum w godzinach popołudniowych i nocnych i z minimum w godzinach porannych i wieczornych.

W warstwie 25-50 m nad poziomem gruntu średni roczny wzrost prędkości wiatru wyniósł $0,34 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na 10 m. Najmniejsze gradienty wystąpiły wiosną i latem, a największe jesienią i zimą. Najmniejszy przyrost prędkości wiatru wraz z wysokością był w czerwcu $-0,28 \text{ (m}\cdot\text{s}^{-1})/10 \text{ m}$, a największy w październiku $-0,4 \text{ (m}\cdot\text{s}^{-1})/10 \text{ m}$. Dobowe zmiany w profilu pionowym wiatru podlegają wahaniom w porach roku. Jest to spowodowane właściwościami podłoża i charakterem ruchów turbulencyjnych.

W Żeńsku zaobserwowano zależność zmian w profilu pionowym wiatru od cyrkulacji atmosferycznej. Największe, ponad 30%, prawdopodobieństwo wystąpienia najmniejszych gradientów pionowych prędkości wiatru było przy typie Ec. Największe, ponad 30%, prawdopodobieństwo wystąpienia największych zmian prędkości wiatru wraz z wysokością było w typach: SWa, SWo, SWc i Sa. Jednak można przypuszczać, że oprócz cyrkulacji atmosferycznej szczególnie duży wpływ na występowanie największych zmian prędkości wiatru wraz z wysokością mają warunki lokalne.

Poznanie zależności zmian prędkości wiatru wraz z wysokością od typu cyrkulacji może być wykorzystanie w energetyce wiatrowej. Zestawiając dane z profilu pionowego wiatru z danymi synoptycznymi można szacować zmiany prędkości wiatru na różnych poziomach w zależności od cyrkulacji atmosferycznej. Przekłada się to na ilość produkowanej energii elektrycznej. Można szacować sezonową i dobową zmienność jej produkcji, co ułatwia zarządzanie siecią energetyczną.

Literatura

- Davenport A.G., 1960, Rationale for Determining Design Wind Velocities, *Journal ASCE*, ST5, 86.
- EN 1991-1-4, 2005, Eurocode 1: Action on Structures. General Action, Part 1-4, Wind Action.
- Elamouri M., Ben Amar F., 2008, Wind energy potential in Tunisia, *Renewable Energy* 33, 758-768.
- Flaga A., 2008, *Inżynieria wiatrowa. Podstawy i zastosowania*, Arkady, Warszawa.
- Kondracki J., 1994, *Geografia Polski. Mezoregiony fizycznogeograficzne*, PWN, Warszawa.
- Kopcewicz T., 1959, *Fizyka atmosfery*, 3, PWN, Warszawa.
- Kozuchowski K., 1998, *Atmosfera klimat ekoklimat*, PWN, Warszawa.
- Kwiecień K., 1987, Warunki klimatyczne, [w:] B. Augustowski (red.), Bałtyk Południowy, Gdańskie Towarzystwo Naukowe, Ossolineum, Wrocław, 219-287.
- Lewińska J., 1959, Rozkład i częstość kierunków dolnych pędów powietrznych w polskich Tatrach, *Wiad. Met., Hydr., Gosp. Wod.* 6, 5, 44-69.
- Li M., Li X., 2005, Investigation of wind characteristics and assesment of wind energy potential for Waterloo region, Canada, *Energy Conversion and Management* 46, 3014-3033.
- Lityński J., 1969, Liczbowa klasyfikacja typów cyrkulacji i typów pogody dla Polski, *Prace PIHM* 97, 3-14.

- Lorenc H., 1996, Struktura i zasoby energetyczne wiatru w Polsce, *Materiały Badawcze Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Meteorologia* 25.
- Parczewski W., 1969, Pogoda a zanieczyszczenia przemysłowe atmosfery, Centr. Urząd Gosp. Wod. i Państw. Inst. Hydrol.-Met., Wyd. Komunik. i Łączności, Warszawa.
- Pianko-Kluczyńska K., 2007, Nowy kalendarz typów cyrkulacji wg J. Lityńskiego, *Wiad. Met., Hydr., Gosp. Wod.* 1, 4, 65-85.
- Piasecki D., 1952, Wiatry o maksymalnych prędkościach na obszarze Polski w latach 1928-1938, *Wiad. Met., Hydr., Gosp. Wod.* 3, 2a, 66-102.
- Pietrek S., Jasiński J., Kroszczyński K., 2008, Badanie pola wiatru dla obszarów morskich na podstawie danych teledetekcyjnych i modeli numerycznych, *Zeszyty Naukowe, Akademia Morska w Szczecinie*, 59-64.
- Safari B., Gasore J., 2010, A statistical investigation of wind characteristics and wind energy potential based on the Weibull and Rayleigh models in Rwanda, *Renewable Energy* 35, 2874-2880.
- Sobolewski A., Żurański J.A., 1981a, Metodyka określania zasobów energetycznych wiatru, *Biuletyn Informacyjny IBMER 1/204*, 60-69.
- Sobolewski A., Żurański J.A., 1981b, Zasoby energetyczne wiatru w Polsce, *Biuletyn Informacyjny IBMER 1/204*, 70-83.
- Tar K., 2008, Some statistical characteristics of monthly average wind speed at various heights, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12, 1717-1724.
- Trepińska J., 2004-2005, Profil pionowy prędkości wiatru przyziemnego, *Folia Geographica, Series Geographica-Physica*, 153-166.
- Weisser D., 2003, A wind energy analysis of Granada: an estimation using the Weibull density function, *Renewable Energy* 28, 1803-1812.
- Wieringa J., 1992, Updateing the Davenport Roughness Classification, *JWEIA* 41.
- Żmuda K., 1986, Probabilistyczne metody wymiarowania linii napowietrznych na obciążenia zewnętrzne, *Zesz. Nauk. Polit. Śląsk.* 101, Elektryka.
- Żurański J.A., 1978, Obciążenia wiatrem budowli i konstrukcji, Arkady, Warszawa. www.maps.google.pl (dostęp 10.03.2014).

Summary

The aim of the study was to determine the influence of atmospheric circulation on vertical wind speed changes in Żeńsko. Particular attention was paid on macrotypes and directions advection of air masses, at which there are the lowest and highest vertical gradients of wind speed in the boundary layer of the atmosphere. In the study are used data on the wind speed and direction from wind data collection tower in Żeńsko for over a 2-year period (2008-2009). Wind speed was measured at two heights 25 and 50 m above ground level. Selected for this analysis localization is lakeland landscape, typical for North-Western part of Poland. The atmospheric circulation is described by using calendar of circulation types after Lityński.

Characteristics such as annual, seasonal, monthly and diurnal wind speed variations have been examined. Wind speed data reveal that the windy months in Żeńsko are from November to March. In 2008-2009, the average wind speed in

Żeńsko at height of 25 m above the ground was $5,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and at a height of 50 m $5,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

The average annual wind speed increase was $0,34 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ for each 10 m. Smallest gradients occur in the spring and summer, and the largest in autumn and winter. Minimum wind speed increase is observed in June, $0,28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot 10 \text{ m}^{-1}$, and the maximum in October, $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot 10 \text{ m}^{-1}$. Stronger influence of atmospheric circulation was observed in occurrence of highest wind speed gradients. More than 50% probability of its occurrence is the circulation type Ec.

