

Politechnika Koszalińska w Koszalinie
Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji



Mgr Katarzyna Wolniewicz

Rozprawa doktorska

Energetyczne i akustyczne uwarunkowania lokalizacji farm wiatrowych

Energy and Acoustic Conditions for the Location of Wind Farms

Promotor:

dr hab. inż. Mirosław Wesołowski, prof. PK

Katedra Mechaniki Budowli

Promotor pomocniczy:

dr inż. Adam Zagubień

Katedra Mechaniki Budowli

KOSZALIN 2022

Pragnę złożyć serdeczne podziękowania mojemu Promotorowi

*Panu dr hab. inż. Mirosławowi Wesółowskiemu, prof. PK
za duże zaangażowanie, wielką życzliwość, poświęcony czas,
wsparcie i pomoc naukową podczas pisania niniejszej pracy.*

Pragnę również podziękować mojemu Promotorowi pomocniczemu

Panu dr inż. Adamowi Zagubień

za ogromne zaangażowanie, wsparcie merytoryczne oraz nieocenioną pomoc przy realizacji badań.

Dziękuję

Panu prof. dr hab. inż. Robertowi Sidelko, dziekanowi WILŚiG

za cenne uwagi dotyczące mojego doktoratu.

Chciałabym podziękować Rodzinie, Najbliższym i Przyjaciółom

za wyrozumiałość i wsparcie podczas realizacji tej pracy.

Streszczenie

Podjęta w rozprawie doktorskiej tematyka wynika ze zwiększonego popytu na energię elektryczną, szczególnie pochodzącą ze źródeł odnawialnych. Zadaniem inżynierii lądowej jest kształtowanie powierzchni Ziemi pod potrzeby egzystencji człowieka. Przekształcając obszar ziemi pod elektrownię wiatrową musimy mieć na uwadze charakter zagospodarowania przestrzeni, który determinowany jest przez dopuszczalne poziomy hałasu w środowisku. Wciąż rosnące potrzeby energetyczne mogą zostać w dużej mierze zaspokojone poprzez wytypowanie i przekształcenie terenu pod przyszłą elektrownię wiatrową. Energetyka wiatrowa na lądzie stanowi dynamicznie rozwijający się sektor energetyki odnawialnej i ma wszelkie predyspozycje do tego, by stać się odpowiedzią zarówno na kryzys klimatyczny, jak i gospodarczy. Rozwój energetyki wiatrowej poza ograniczeniami ustawowymi determinowany jest odpowiednimi warunkami wietrznymi oraz dostępnością terenu przeznaczanego pod elektrownię. Zakres pracy doktorskiej obejmuje analizy wietrzności oraz hałasu pochodzącego od turbin wiatrowych (WT) determinujących lokalizację farmy wiatrowej (WF). Wybór terenu lokalizacji elektrowni ograniczony jest głównie warunkami wietrznymi oraz zabudową chronioną akustycznie (jednorodziną, wielorodzinną i zagrodową). Odległość WT od danej zabudowy uzależniona jest z jednej strony od emisji źródła, a z drugiej od dopuszczalnego poziomu hałasu na terenie chronionym akustycznie.

Podstawowe narzędzia, które determinują lokalizację przyszłych farm wiatrowych to: zapisy miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego, mapy topograficzne, identyfikacja szorstkości terenu i stałych barier, założenia dotyczące warunków wietrznych, dobór wysokości i mocy turbin wiatrowych. Wizja lokalna w miejscu lokalizacji przyszłej farmy wiatrowej dostarcza informacji o stanie rzeczywistym (zapisy fotograficzne, dane z GPS, a także pełny i szczegółowy opis wszystkich barier występujących w danej lokalizacji). Przeszkody, które mogą wpływać na potencjał energetyczny wiatru, to zazwyczaj budynki przemysłowe, budynki mieszkalne, lasy, pojedyncze drzewa, kominy, inne turbiny wiatrowe, wieże obserwacyjne, wieże komunikacyjne, wzgórza, góry, hałdy, mosty itp. Poprawnie przeprowadzona kampania pomiarowa warunków wietrzności musi uwzględniać powyższe uwarunkowania. Brane są pod uwagę warunki lokalizacyjne oraz wymogi ochrony środowiska przy zachowaniu szeroko pojętej optymalizacji pozyskiwanej energii elektrycznej. Decyzje podjęte na tym etapie determinują dalszy przebieg realizacji przedsięwzięcia. Odpowiednio wykonana koncepcja techniczna pozwala na minimalizację ryzyka inwestycyjnego oraz optymalizację kosztów na etapie projektowym, budowlanym i eksploatacyjnym.

W procesie ustalania lokalizacji i doboru urządzeń farmy wiatrowej zauważa się brak koordynacji działań zespołów projektowych. Proces doboru turbin WF zaczyna się zwykle od ustalenia dostępności urządzeń na rynku. Inwestor wskazuje grupę urządzeń do dalszych analiz. Następnie zespoły specjalistów przystępują do projektowania. Ponieważ bardzo ważny jest aspekt ekonomiczny przedsięwzięcia, badana jest produktywność przyszłej elektrowni. Mając to na uwadze zespół energetyczny wybiera jeden typ urządzenia oraz konkretne punkty posadowienia turbin, następnie grupa akustyków przyjmuje WF do analiz. Ze względu na uwarunkowania środowiskowe i przestrzenne zespół akustyków często wprowadza zmiany lokalizacji turbin oraz korekty trybów pracy urządzenia. Korekta polega na ograniczeniu mocy akustycznej urządzenia kosztem produktywności, a tym samym wydłużeniu czasu zwrotu kosztów inwestycji. Problem ten dotyczy wszystkich realizowanych projektów. Praktycznie wygląda to tak, że zespół akustyków skupia się wyłącznie na analizach hałasu, a zespół energetyków analizuje tylko aspekt maksymalnej produktywności WF. W celu zniwelowania powyższego problemu, konieczne jest równoległe prowadzenie analiz akustycznych i energetycznych podczas projektowania umiejscowienia oraz doboru typu turbiny na farmie wiatrowej. Równoległe prowadzenie analiz pozwoli uniknąć błędu wytypowania turbiny, która w danej lokalizacji

nie byłaby optymalna ze względu na jej produktywność przy danych warunkach wietrznych, przestrzennych i środowiskowych. Do analiz należy wybrać kilka urządzeń (turbin) o podobnej mocy akustycznej. Odpowiedni dobór turbiny wiatrowej (przy równoczesnym uwzględnieniu analizy środowiskowej i energetycznej) pozwoli osiągnąć maksymalny wynik ekonomiczny inwestycji.

Przeprowadzone analizy wykazały, że dokonując wyboru typu turbiny wiatrowej w danej lokalizacji należy przede wszystkim sprawdzić krzywą mocy prądowej urządzenia. Krzywa mocy przedstawia zależność generowanej mocy od prędkości wiatru. Okazało się, że najmniej wydajne w badanych lokalizacjach były turbiny o mocy nominalnej 2.3 - 2.5 MW. Ze względu na rozkład godzinowy poszczególnych prędkości wiatru, najwydajniejsze energetycznie okazały się turbiny o mocy 2 MW. Pewnym zaskoczeniem jest najmniejsza produktywność turbiny W2E100/2.55, gdyż ma ona największy wirnik i największą moc nominalną z badanych.

Uzyskanie celu akustycznego (zachowanie poziomów dopuszczalnych hałasu) wymaga często redukcji mocy akustycznej kilku turbin wiatrowych na farmie, oznacza to zazwyczaj spadek ich produktywności. Proces ten wymaga zmiany oprogramowania sterującego pracą turbiny i zawsze odbywa się kosztem generowanej energii (zmianą krzywej mocy). Niektóre typy turbin wiatrowych poza zmianą krzywej mocy mogą mieć stosowane nakładki montowane na łopaty wirnika turbiny, które nie powodują ograniczenia jej produktywności, a o kilka decybeli zmniejszają moc akustyczną urządzenia. Stosowana jest również optymalizacja lokalizacji urządzeń na farmie wiatrowej. Wykazano, że stosując powyższe rozwiązania, możliwe jest przekształcenie terenu pod elektrownie wiatrową z ograniczeniem emisji akustycznej turbin bez straty wydajności energetycznej farmy wiatrowej.

Otrzymane rezultaty potwierdziły osiągnięcie założonych celów. Wykonane badania wpisują się w globalny trend mający na celu dobro przyszłych pokoleń. Poddając ocenie osiągnięte wnioski z przeprowadzonych badań należy stwierdzić, że przekształcenie terenu rolniczego w elektrownię wiatrową może być dokonane bez szkody dla środowiska przy jednoczesnej realizacji celów ekonomicznych.

Abstract

The dissertation focuses on the increasing electricity demand, especially electricity produced from renewable energy sources. The role of civil engineering is to shape the earth's surface for human needs. When land is modified for wind farms, the nature of the land use must be taken into account, which is determined by the permitted environmental noise levels. The ever increasing demand for energy can be primarily met by selecting and converting land for a future wind turbine. Onshore wind energy is a rapidly growing renewable energy sector and has all the potential to become the answer to both climate and economic crises. In addition to legal constraints, the development of wind power is influenced by suitable wind conditions and the availability of a site for the turbine. The dissertation will focus on wind power and wind turbine noise (WT) analyses to determine the location of wind farms (WF). The selection of a wind turbine site is mainly constrained by wind conditions and acoustically shielded buildings (detached houses, apartment buildings, and farm buildings). The distance of a WF from a given building site depends on the source emissions on the one hand and the noise level allowed in the acoustically shielded area on the other hand.

The essential tools for determining the location of future wind turbines are local spatial plan regulations, topographic maps, determination of terrain roughness and permanent obstacles, assumptions about wind conditions, and selection of wind turbine height and power. A site visit to the location of a future wind farm will provide information on the actual situation (photographic records, GPS data, and a complete and detailed description of all obstacles present on site). Wind power potential obstacles are usually industrial buildings, residential buildings, forests, isolated trees, chimneys, other wind turbines, observation towers, communication masts, hills, mountains, piles, bridges, etc. These conditions must be considered in an adequately implemented wind measurement campaign. Site conditions and environmental requirements are considered while maintaining a broad optimisation of the electricity generated. The decisions taken at this stage will determine the further course of the project. With a properly implemented technical concept, investment risks can be minimised, and costs optimized during the design, construction, and operation phases.

There is a lack of coordination between the project teams in the siting of wind turbines and the choice of equipment. The WF turbine selection process usually starts with surveying equipment available on the market. The developer identifies a group of equipment for further analysis. The specialist teams then move on to the design phase. As the economic aspect of the project is very important, the productivity of the future power plant is considered. With this in mind, the energy team selects one type of equipment and certain turbine base points, after which the acoustics team takes the WF for analysis. Due to environmental and spatial considerations, the acoustics team often changes the turbine locations and adjusts the unit's operating modes. The correction consists of reducing the acoustic efficiency of the unit at the expense of productivity, thus extending the payback period of the investment. This is a problem that affects all ongoing projects. In practice, it seems that the acoustics team focuses only on the noise analysis and the energy team only on the maximum productivity aspect of the WF. To overcome this problem, conducting acoustic and energy analyses simultaneously when planning the wind farm's location and selecting the type of turbine is necessary. Performing parallel analyses avoids choosing a turbine that would not be optimal for a given site in terms of its productivity under specific wind and spatial and environmental conditions. Several turbines with similar acoustic output should be selected for the analyses. An appropriate selection of wind turbines (considering ecological and energy analysis) will maximize the economic impact of the investment.

The analyses have shown that the first step in selecting a type of wind turbine for a given site is to check the power curve of the installation. The power curve describes the dependence of the power produced on the wind speed. It turns out that turbines with a rated capacity of 2.3-2.5 MW were the least

efficient at the sites studied. Concerning the hourly distribution of individual wind speeds, 2 MW turbines proved to be the most energy-efficient. Surprisingly, the W2E100/2.55 turbine had the lowest productivity, as it has the largest rotor and the highest rated power of all those studied.

Achieving the acoustic target (maintaining noise limit levels) often requires a reduction in the acoustic output of several wind turbines on the farm; this usually means a decrease in their productivity. This process requires a change in the turbine control software and always comes at the expense of the energy generated (a shift in the power curve). In addition to changing the power curve, some types of wind turbines can have overlays applied to the turbine rotor blades, which do not reduce the turbine's productivity but reduce the acoustic power of the unit by a few decibels. Optimization of the positioning of equipment on the wind farm is also applied. It has been shown that using the above solutions makes it possible to convert a wind farm site with reduced acoustic emissions from the turbines without losing its energy output.

The results obtained confirmed the achievement of the objectives set. The research performed is part of a global trend aimed at the welfare of future generations. In assessing the conclusions reached from the research carried out, it should be stated that converting an agricultural area into a wind power plant can be done without harming the environment while achieving economic objectives.

Wykaz skrótów i oznaczeń

A_f	– powierzchnia przepływu powietrza, m ²
A	– parametr skali Weibulla, m/s
E_{we_i}	– energia wiatru dla i-tego zakresu prędkości, Wh
E_{we}	– całkowita energia wiatru, Wh
Γ	– funkcja Gamma,
P_w	– moc wiatru, W
P_{we_i}	– jednostkowa moc wiatru uzyskana w i-tym zakresie prędkości, W/m ²
p	– zmiana ciśnienia atmosferycznego, kPa
R	– stała gazowa 287.03, J/(kg K)
T_Y	– okres jednego roku wyrażony w godzinach, 8760 h
α	– wykładnik potęgowy, parametr zależny od rodzaju terenu,
f_i	– częstotliwość prędkości wiatru mieszcząca się w i-tym zakresie,
t_i	– czas i-tego zakresu prędkości wiatru,
h	– wysokość, m
h_{ref}	– wysokość pomiaru wiatru, m
k	– współczynnik kształtu Weibulla,
ρ	– gęstość powietrza, m ³ /kg
v_{av}	– średni zakres prędkości wiatru, m/s
v_i	– i-ty zakres prędkości wiatru, m/s
v	– prędkość wiatru, m/s
v_l	– prędkość wiatru na wysokości h , m/s
v_{ref}	– średnia prędkość wiatru na wysokości h_{ref} , m/s
z_0	– parametr szorstkości terenu

Spis treści

DOROBEK NAUKOWY STANOWIĄCY ROZPRAWĘ DOKTORSKĄ	9
1. Wprowadzenie i przegląd literatury	11
2. Cel i zakres badań	15
3. Materiał i metody badań.....	17
3.1 Materiał badawczy	17
3.2 Metody badań	17
3.3 Przygotowanie i analiza danych.....	18
4. Wyniki badań.....	21
4.1 The impact of supporting tower on wind turbine noise emission (Z1)	21
4.2 The Assessment of Infrasound and Low Frequency Noise Impact on the Results of Learning in Primary School – Case Study (Z2).....	23
4.3 Energy and Acoustic Environmental Effective Approach for a Wind Farm Location (Z3)...	26
4.4 Analysis of the Wind Turbine Selection for the Given Wind Conditions (Z4)	29
5. Podsumowanie i wnioski	32
Spis literatury	34
KOPIE OPUBLIKOWANYCH ARTYKUŁÓW NAUKOWYCH STANOWIĄCE ROZPRAWĘ DOKTORSKĄ WRAZ Z OŚWIADCZENIAMI AUTORÓW	37

OPUBLIKOWANE I POWIĄZANE TEMATYCZNIE ARTYKUŁY NAUKOWE
STANOWIĄCE ROZPRAWĘ DOKTORSKĄ

Energetyczne i akustyczne uwarunkowania lokalizacji farm wiatrowych

Lp.	Tytuł publikacji	IF*	Punktacja MEiN**
Z1	Zagubień A., Wolniewicz K. : The impact of supporting tower on wind turbine noise emission, Applied Acoustics, Vol. 155(2019), p. 260-270, DOI: 10.1016/j.apacoust.2019.05.032	3.290	100
Z2	Wolniewicz K. , Zagubień A.: The Assessment of Infrasound and Low Frequency Noise Impact on the Results of Learning in Primary School – Case Study, Archives of Acoustics, Vol. 45(1), 2020, pp. 93 – 102, DOI: 10.24425/aoa.2020.132485	1,152	100
Z3	Wolniewicz K. , Zagubień A., Wesolowski M. (2021) Energy and Acoustic Environmental Effective Approach for a Wind Farm Location, Energies, Vol. 14(21), 7290. DOI: 10.3390/en14217290	3,333	140
Z4	Kuczyński W., Wolniewicz K. , Charun H. (2021). Analysis of the Wind Turbine Selection for the Given Wind Conditions, Energies, Vol. 14(22), 7740. DOI: 10.3390/en14227740	3,333	140
SUMA		11,108	480

* 5-year Impact Factor (IF) według bazy Journal Citation Reports (JCR)

**Liczba punktów według listy MEiN

Cały dorobek naukowy obejmuje dodatkowo następujące opublikowane artykuły naukowe:

1. Zagubień A., **Wolniewicz K.**: Energy Efficiency of Small Wind Turbines in an Urbanized Area—Case Studies. *Energies*, 15. (2022), 5287, 10.3390/en15145287.
2. **Wolniewicz K.**, Zagubień A.: Impact of measuring microphone location on the result of environmental noise assessment, *Applied Acoustics*, Vol. 172, (2021), 107662.
3. **Wolniewicz K.**, Kuczyński W.: Analiza doboru turbozespołu wiatrowego dla danych warunków wietrzności, *Innowacyjne metody i technologie w badaniach inżynierskich*, (2019), p. 85-98.
4. **Wolniewicz K.**, Kuczyński W., Zagubień A.: Evaluation of wind resources for horizontal and vertical wind turbine, *Contemporary Issues of Heat and Mass Transfer*, Vol. 2, (2019), p. 1017-1028.
5. **Wolniewicz K.**, Kuczyński W., Zagubień A.: Metod for wind turbine selection basing on in-field measurements, *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, Vol. 3(43), No. 1, (2019), p. 77-84.
6. Jakubowski M., Mech Ł., **Wolniewicz K.**: A methodology of wind turbines selection for the given wind conditions, *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, Vol. 1(41), No. 2, (2017), p. 171-178.
7. Zagubień A., **Wolniewicz K.**: Domowe źródła hałasu niskoczęstotliwościowego, *Rocznik Ochrona Środowiska*, Vol. 19 (2017), s. 682-693.
8. Zagubień A., **Wolniewicz K.**: Hałas niskoczęstotliwościowy w samochodach osobowych, *Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, 7-8/2017, s.139-142.
9. Zagubień A., **Wolniewicz K.**: Hałas infradźwiękowy w środkach komunikacji podmiejskiej, *Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, 7-8/2017, s.136-138.
10. Zagubień A., **Wolniewicz K.**: Every Exposure to Occupational/Non-Occupational Infrasound Noise In Our Life, *Archives of Acoustics*, Vol. 41(4), (2016), s.659-668.
11. **Wolniewicz K.**, Zagubień A.: Oddziaływanie akustyczne stacji benzynowej, *Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, 8/2016, s.46-49.
12. **Wolniewicz K.**, Zagubień A.: Porealizacyjna ocena hałasu od drogi o małym natężeniu ruchu, *Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, 8/2016, s.50-53.
13. **Wolniewicz K.**, Zagubień A.: Zasadność ekranowania w świetle obowiązujących poziomów dopuszczalnych hałasu, *Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, 8/2016, s.54-57.
14. **Wolniewicz K.**, Zagubień A. Verifying Traffic Noise Analysis Calculation Models, *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 24, No. 6 (2015), p.2767-2772.
15. **Wolniewicz K.**, Zagubień A. Optymalizacja czasu pomiaru hałasu komunikacyjnego drogowego z uwzględnieniem obowiązującej metodyki pomiarowej, *Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, Nr 6 (2015), s.255-258.

1. Wprowadzenie i przegląd literatury

Wzrost stopnia internacjonalizacji i globalizacji energetyki, jak również współzależności energetycznej poszczególnych krajów, wskazują na potrzebę zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego Polski na szczeblu regionalnym i lokalnym w kontekście poprawy międzynarodowego bezpieczeństwa energetycznego [1,2]. Ze względu na rezygnację wielu państw z surowców kopalnych, odnawialnych form przetwarzania energii będzie przybywać [3]. Jedną z form generowania energii odnawialnej jest wykorzystywanie zasobów wiatru przez lądowe elektrownie wiatrowe. Energetyka wiatrowa na lądzie stanowi dynamicznie rozwijający się sektor energetyki odnawialnej i ma wszelkie predyspozycje do tego, by stać się odpowiedzią zarówno na kryzys klimatyczny, jak i gospodarczy [4-6]. Farmy wiatrowe (WF) złożone z urządzeń o mocach nominalnych powyżej 1 MW użytkowane są już ponad 20 lat [7]. Nadchodzi czas, w którym stare urządzenia będą zastępowane nowszymi i wydajniejszymi. Zasób terenów o znacznej wietrzności będzie się zmniejszał ze względu na ekspansję pozyskiwania terenów niewykorzystanych jeszcze pod budowę parków wiatrowych. Nastąpi przybliżanie się elektrowni wiatrowych do zabudowy mieszkalnej. Spowoduje to, że ograniczenia środowiskowe w tym akustyczne budowy WF staną się bardzo istotnym kryterium lokalizacji turbin wiatrowych [8,9].

Podczas pracy turbin wiatrowych generowany jest hałas, który w negatywny sposób oddziałuje na środowisko. Rejestrowane wokół turbin wiatrowych (WT) dźwięki znajdują się w szerokim zakresie częstotliwości od 0.1 Hz do 16000 Hz. Zatem mamy do czynienia z infradźwiękami (0.1-20 Hz), hałasem niskoczęstotliwościowym (do 200 Hz) oraz z hałasem akustycznym (do 16000 Hz) [10-13]. Projektując farmę wiatrową składającą się z wielu WT, należy ją zlokalizować w takiej odległości od terenów chronionych akustycznie (miejsc zamieszkania), aby nie występowały poziomy dźwięku powodujące dyskomfort akustyczny. Wartości te określane są jako dopuszczalny poziom dźwięku w środowisku. Wszystkie kraje szacują własne dopuszczalne poziomy dźwięku, uwzględniając m.in. wytyczne WHO [14]. Wytyczne WHO wskazują, że nieuciążliwy poziom hałasu w otoczeniu dla większości ludzi wynosi około 40 dB. Biorąc pod uwagę fakt, że godziny aktywności człowieka są w ciągu dnia, poziom 40 dB dotyczy pory nocnej, czyli czasu, w którym odpoczywamy.

Moc akustyczna turbin wiatrowych zależy od prędkości wiatru. Przyjmuje się, że prędkość wiatru wzrasta wraz z wysokością nad poziomem terenu [12-16]. Jednak nie dzieje się tak zawsze. Stopień wzrostu prędkości wiatru uzależniony jest od wielu czynników, takich jak: ukształtowanie terenu, zmiany temperatury i ciśnienia atmosferycznego oraz wilgotności względnej powietrza [16-18].

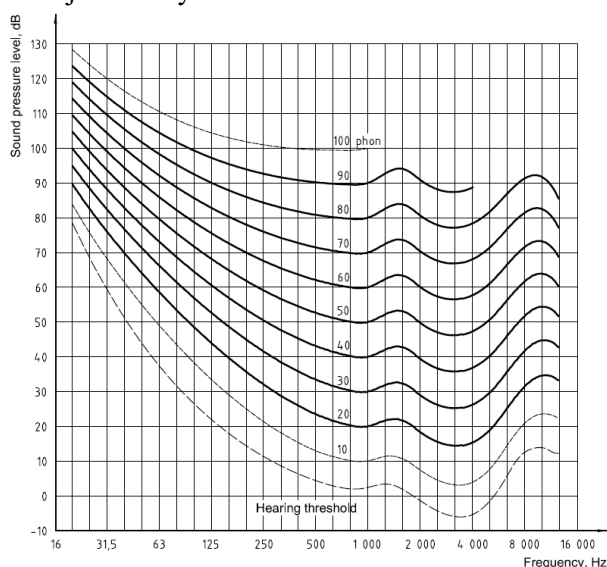
Emisja hałasu związana z interakcją powietrza i łopaty turbiny wiatrowej to jedno z kilku jednostkowych źródeł tego urządzenia [19]. Poza tym występuje hałas mechaniczny związany z pracą urządzeń zainstalowanych wewnątrz gondoli [20]. W przypadku WT wyższych niż 80 m, dominującym źródłem jest hałas aerodynamiczny związany z emisją zależną od konstrukcji łopaty wirnika. Mogą występować gwałtowne zmiany ciśnienia podczas przemieszczania się łopaty w pobliżu wieży nośnej turbiny. Ważnym czynnikiem mającym wpływ na wartość mierzonego hałasu emitowanego przez turbinę wiatrową w konkretnym punkcie pomiarowym ma tło akustyczne [21]. Wraz ze wzrostem prędkości wiatru, wzrasta poziom tła akustycznego na wysokości punktów pomiarowych [22]. Specyfika zjawisk akustycznych i pozaakustycznych zachodzących podczas pracy elektrowni wiatrowej opisana została

w wielu publikacjach [20,22-25]. W związku z tym, że prędkość wiatru wzrasta wraz z wysokością nad poziomem terenu, właściciele farm wiatrowych dążą do budowy obiektów na tyle wysokich, by ich produktywność była optymalna. Obecnie dostępne są zaawansowane techniki pomiaru prędkości wiatru oraz metody prognozowania wietrzności [26]. Na terenach o mniejszej wietrzności tzn. gdy średnia roczna prędkość wiatru wynosi poniżej 7 m/s buduje się turbiny wiatrowe na wieżach przekraczających

100 m wysokości. Ze względu na możliwości technologiczne wykonania wieży o konstrukcji rurowej, do niedawna budowano wieże stalowe, rzadziej żelbetowe o wysokości nie przekraczającej 120 m. Obecnie coraz częściej stosuje się technologię hybrydową. Polega ona na wykonaniu dolnej części wieży w postaci rury żelbetowej, a na wyższych partiach w postaci rury stalowej. Istnieje jeszcze rozwiązanie alternatywne, stosowane sporadycznie, polegające na wykonaniu konstrukcji wieży jako kratownicy przestrzennej. Znane są wieże kratownicowe turbin wiatrowych o wysokości nawet 160 m nad poziom terenu. Z punktu widzenia wpływu turbiny wiatrowej na środowisko akustyczne, umieszczenie źródła dźwięku wyżej jest korzystniejsze. Dzięki dłuższej drodze propagacji fali akustycznej w powietrzu, do punktu kontrolnego dociera mniejsza energia akustyczna. Zależność ta ma mniejsze znaczenie w przypadku emisji infradźwięków. Są one słabo tłumione przez powietrze i rozchodzą się na duże odległości [27-29].

Poziom mocy akustycznej korygowanej krzywą A generowanej przez WT zależy w dużej mierze od przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych i zawiera się w granicach 100 ÷ 107 dB przy wirniku turbiny. Rośnie wraz ze wzrostem prędkości wiatru i maleje, gdy prędkość wiatru słabnie. W tym samym czasie u podstawy wieży nośnej poziom ciśnienia akustycznego korygowanego krzywą A zawiera się w granicach 60 – 70 dB i wraz z oddalaniem się od turbiny poziom ten maleje. Na przykład przy prędkości wiatru 8 m/s, poziom ciśnienia akustycznego korygowanego krzywą A w odległości 350 ÷ 500 m od turbiny i na wysokości około 2 m nad ziemią wynosi od około 40 do 50 dB. Poziom infradźwięków korygowanych krzywą G w tym miejscu wynosi około 70 dB [30,31].

Krzywe korekcji (A, G) zostały ustalone na podstawie sposobu słyszenia dźwięków przez człowieka [32,33]. W pomiarach wykonanych z zastosowaniem krzywych korekcyjnych (A, G) badany sygnał jest najpierw przepuszczany przez filtry o specjalnej, ustandaryzowanej charakterystyce, a dopiero potem mierzona jest jego wartość. Przykładowo kształt krzywej A w przybliżeniu odpowiada odwróconej krzywej czułości słuchu ludzkiego dla głośności równej 30 fonów. Człowiek nie odbiera dźwięków jednakowo we wszystkich częstotliwościach. Wrażenie słuchowe wywołane dźwiękiem zależy od jego częstotliwości i poziomu ciśnienia akustycznego. Na Rys. 1 przedstawiono typowy zakres dźwięków słyszanych przez osoby o prawidłowym słuchu [34]. Przedstawione na wykresie krzywe odpowiadają dźwiękom, które postrzegane są jako mające tę samą głośność. Poziom głośności dźwięku wyrażany jest w fonach i jest liczbowo równy poziomowi ciśnienia akustycznego tonu o częstotliwości 1 kHz, który brzmi jednakowo głośno jak ten dźwięk. Najniższa krzywa odpowiada najcichszym dźwiękom jakie jest w stanie usłyszeć człowiek, stanowi zatem tzw. próg słyszenia. Najwyższa krzywa odpowiada dźwiękom wywołującym ból u osób bardziej wrażliwych na hałas



Rys.1 Zakres dźwięków słyszalnych (krzywe jednakowej głośności)[34]

Dominującym skutkiem ekspozycji na infradźwięki jest ich uciążliwe działanie, występujące już przy niewielkich przekroczeniach progu słyszenia, przejawiające się subiektywnie odczuwanymi stanami nadmiernego zmęczenia, dyskomfortu, senności oraz zaburzeniami sprawności psychomotorycznej i funkcji fizjologicznych [35]. Hałas niskoczęstotliwościowy (LFN) w zakresie 125 do 250 Hz może przykładowo prowadzić do utrudnionej komunikacji uczeń – nauczyciel. Dzieci na ogół mają mniej precyzyjną mowę, bardziej ograniczone słownictwo i mniejszą znajomość reguł językowych niż dorośli. Efekt tła akustycznego może być zatem szczególnie istotny dla percepcji mowy dzieci, jak i zrozumienia wypowiedzi przez dzieci [35-37]. Wiele osób dorosłych sygnalizuje zwiększoną wrażliwość na infradźwięki i LFN pochodzące od farmy wiatrowej. Charakteryzuje się ona nawracającymi, niesprecyzowanymi stanami skutkującymi złym samopoczuciem mieszkańców. Brak związku przyczynowego między narażeniem, a objawami przedstawiają dowody empiryczne [38]. Badania wskazują, że objawy można wytłumaczyć reakcją nocebo, w której zgłaszane problemy zdrowotne i uciążliwość powstały w wyniku dyskursu społecznego i doniesień medialnych [39-41]. Dzieci na ogół odbierają rzeczywistość bez uprzedzeń i często nie identyfikują własnych problemów środowiskowych i zdrowotnych z przyczynami występującymi w ich otoczeniu. Dlatego sprawdzenie potencjalnego zagrożenia oddziaływania hałasu infradźwiękowego i LFN na uczniów szkoły podstawowej jest ważnym aspektem badań środowiskowych. Wielu badaczy opisuje w swoich publikacjach obecność hałasu infradźwiękowego w otoczeniu turbin wiatrowych [42-44] oraz dróg [44]. Prezentowane w ich pracach poziomy ciśnienia akustycznego w zakresie infradźwiękowym nie przewyższają na ogół progów percepcji słuchowej. Znane są przypadki maskowania hałasu słyszalnego turbin wiatrowych przez drogi o znacznym natężeniu ruchu [45]. Brakuje do pełnego zobrazowania sytuacji akustycznej informacji o poziomach hałasu infradźwiękowego i LFN w stanie sumarycznym, tzn. dla dźwięków pochodzących jednocześnie od farmy wiatrowej i drogi o znacznym natężeniu ruchu.

Budowa WF finansowana jest w większości z kredytów bankowych. Projekt zaklasyfikowany przez bank jako możliwy do spłacenia, opiera się w dużej mierze na ekspertyzie warunków wietrznych. W ekspertyzie zawarta jest kompilacja danych pomiarowych ze wszystkich czujników, efekt cieniowania i inne analizy, takie jak: analiza ukształtowania terenu, analiza niepewności pomiaru, analiza gęstości powietrza, analiza rozkładu sił wiatru, wydajność zestawu analiz turbin wiatrowych i inne [13,46]. Ekspertyza bankowa obejmuje również dane, które pozwalają ocenić inwestycję pod kątem doboru turbiny wiatrowej, dystrybucji Weibulla, rozkładu kierunkowego wiatru [47-49] oraz wpływu na środowisko [8]. Szczegółowe informacje dotyczące miejsca posadowienia przyszłej farmy wiatrowej można uzyskać wyłącznie na podstawie przeprowadzonej kampanii pomiarowej [13,14,50]. Kampania pomiarowa to minimum roczne badania wietrzności obejmujące pomiary prędkości wiatru, kierunkowości wiatru, ciśnienia, temperatury oraz wilgotności powietrza na kilku wysokościach nad poziomem terenu [51]. Wiarygodne wyniki pomiarów uzyskuje się stosując sprawdzone procedury pomiarowe i certyfikowane urządzenia pomiarowe wysokiej klasy [13,50]. Dokument referencyjny, który opisuje prawidłową metodykę pomiaru na potrzeby wykonania analizy finansowej wymaganej przez bank, pochodzi z Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej (IEC Szwajcaria-Genewa). Wytyczne dotyczące pomiarów zawarte są w normie IEC 61400-12-1: Turbiny wiatrowe: Część 21-1: Pomiary mocy elektrycznej turbin wiatrowych [52]. W załączniku G powyższej normy znajdują się wytyczne dotyczące prawidłowej instalacji oprzyrządowania do celów pomiarowych na maszcie meteorologicznym typu rurowego lub kratownicowego. Wytyczne zawarte w normie IEC 61400-12-1, są międzynarodową praktyką dotyczącą pomiarów wiatru. Tylko pomiary wykonane przy użyciu wysokiego (120-160m) masztu pomiarowego lub wieży mogą być sklasyfikowane jako wiarygodne pomiary i mogą służyć w kolejnych etapach projektu jako punkt odniesienia dla uzyskania pełnego lub częściowego finansowania projektu.

Obliczenia zasięgu hałasu emitowanego przez farmy wiatrowe realizowane są na całym świecie. Prognoza zasięgu hałasu emitowanego przez farmy wiatrowe jest jedną z pierwszych prac projektowych umożliwiających ocenę zagrożenia akustycznego dla środowiska, wymaganą do uzyskania pozwolenia na budowę farmy wiatrowej. Obliczenia takie można prowadzić stosując programy komputerowe, wykorzystujące różne algorytmy obliczeniowe. Przegląd i porównanie wielu algorytmów obliczeniowych zawarto w wielu publikacjach, przykładowo Evans & Cooper [53] oraz Prospathopoulos & Voutsinas [54], w których uzyskiwane wyniki obliczeniowe porównywane są z pomiarami terenowymi. Najczęściej zalecanym w różnych krajach na świecie algorytmem obliczeniowym do prognoz hałasu od turbin wiatrowych jest algorytm zgodny z normą ISO 9613-2 [55]. Jednakże, algorytm ten nie jest dedykowany bezpośrednio do symulacji hałasu pochodzącego od turbin wiatrowych, jest algorytmem ogólnym dla źródeł hałasu przemysłowego. Evans & Cooper [53] zwracają uwagę, że zbieżność wyników obliczeń oraz pomiarów terenowych uzależniona jest od wielu czynników i jednocześnie podkreślają dwa: ukształtowanie terenu oraz przyjętą do obliczeń wartość wskaźnika gruntu G zgodnie z normą ISO 9613-2 [55].

Do realizacji pomiarów hałasu w środowisku przyjmuje się kryteria optymalnych warunków meteorologicznych i wyboru punktów pomiarowych zgodnie z normami ISO 1996 [56,57] oraz Rozporządzeniem Ministra Środowiska [58]. W Polsce do pomiaru hałasu pochodzącego od farm wiatrowych wykorzystywane są te same metody referencyjne, które obowiązują w pomiarach hałasu przemysłowego [58]. Otrzymane wyniki pomiarów odnoszone są do poziomów dopuszczalnych hałasu, określonych w Rozporządzeniu Ministra Środowiska [59]. Oba Rozporządzenia [58,59] stanowią podstawę prawną oceny oddziaływania hałasu wokół farm wiatrowych i wpływają na odległość elektrowni od zabudowy mieszkalnej. Metodykę tą zastosowano podczas pomiarów oraz w symulacjach, których wyniki przedstawiono w niniejszej pracy.

2. Cel i zakres pracy

Celem pracy było określenie głównych parametrów pozwalających maksymalnie wykorzystać teren pod elektrownię wiatrową. Badanymi parametrami są emisja dźwięku oraz charakterystyka wietrzności. Opisane zostały zależności między krzywą mocy prądowej, a emisją dźwięków turbiny wiatrowej. Przedstawione zostały wyniki własnych symulacji wskazujące jak emisja dźwięku determinuje lokalizację turbin na farmie wiatrowej oraz w jaki sposób ograniczenie jej emisji wpływa na produktywność.

Zakres pracy podzielony został na cztery zadania (*Z1 do Z4*) i obejmował określenie metodyki maksymalnego wykorzystania dostępnego terenu pod przyszłą farmę wiatrową uwzględniającą ograniczenia środowiskowe (*Z1 i Z2*) oraz potencjał wietrzny w danej lokalizacji (*Z3 i Z4*). Opracowana metodyka ma charakter praktyczny i pozwoli projektantom farm wiatrowych na optymalne rozstawienie oraz dobór urządzeń generujących energię elektryczną.

Głównym celem poszczególnych zadań było:

Zadanie 1. (Z1) – Identyfikacja źródła

Metodami pomiarowymi określono poziomy hałasu infradźwiękowego i akustycznego rejestrowane wokół farm wiatrowych. Przedstawiono wyniki pomiarów dźwięków zarejestrowane w pobliżu turbin wiatrowych o różnych wysokościach i konstrukcjach wieży nośnej (rura lub kratownica). Na podstawie przeprowadzonych badań ustalono charakter emisji źródła.

Zadanie 2. (Z2) – Identyfikacja zagrożenia

Zabudowa chroniona akustycznie oddalona jest zazwyczaj o kilkaset metrów od farmy wiatrowej. Najniższe poziomy dopuszczalne w Rozporządzeniu o dopuszczalnych poziomach hałasu w środowisku ustalone są dla zabudowy jednorodzinnej. Ze względu na brak możliwości wykonywania pomiarów w prywatnych budynkach mieszkalnych wytypowano do badań inny obiekt. Zgodnie z Rozporządzeniem szkoła jest terenem chronionym akustycznie, którego dopuszczalny poziom hałasu jest taki sam jak w przypadku zabudowy jednorodzinnej. Na podstawie badań ustalono poziomy dźwięku rejestrowane w badanym obiekcie oraz jego otoczeniu.

Zadanie 3. (Z3) – Optymalizacja ustawienia turbin ze względu na hałas i wydajność

Opisano jak powinien przebiegać prawidłowy proces doboru typu turbiny wiatrowej do konkretnej lokalizacji. Skupiono się na maksymalnym wykorzystaniu dostępnego terenu o dobrych parametrach wietrznych. Do prowadzonych analiz wytypowano kilka typów turbin powszechnie instalowanych na farmach wiatrowych. Wykazano konieczność równoległego prowadzenia analiz środowiskowych i energetycznych podczas projektowania umiejscowienia oraz doboru typu turbiny na farmie wiatrowej (WF). Wykonane symulacje pozwoliły na optymalne rozmieszczenie turbin przy zachowaniu poziomów dopuszczalnych hałasu i uzyskaniu maksymalnej wydajności energetycznej farmy wiatrowej.

Zadanie 4. (Z4) – Dobór turbiny ze względu na wydajność

Do prowadzonych analiz wytypowano kilka typów turbin powszechnie instalowanych na farmach wiatrowych. W prowadzonych analizach skupiono się wyłącznie na uzyskaniu maksymalnej wydajności urządzeń w badanych lokalizacjach. Zaproponowano metodykę doboru typu turbiny wiatrowej na podstawie zarejestrowanych rocznych pomiarów wiatru. Przedstawiony proces doboru turbiny doprowadził do ustalenia optymalnego urządzenia dla danych warunków wietrznych w badanej lokalizacji.

Określenie i zrealizowanie zadań (*Z1 do Z4*) posłużyło do zweryfikowania prawdziwości następujących **tez badawczych**:

1. Nominalna moc prądowa turbiny wiatrowej nie jest głównym kryterium wpływającym na wybór urządzenia farmy wiatrowej (Z3, Z4).

2. Jest możliwe takie przekształcenie terenu pod elektrownię wiatrową, które spowoduje maksymalne wykorzystanie potencjału wietrznego bez szkody dla środowiska akustycznego (Z1 do Z3).

Przeprowadzone analizy wykazały, że dokonując wyboru typu turbiny wiatrowej w danej lokalizacji należy przede wszystkim sprawdzić krzywą mocy prądowej urządzenia. Krzywa mocy przedstawia zależność generowanej mocy od prędkości wiatru. Okazało się, że najmniej wydajne w badanych lokalizacjach były turbiny o mocy nominalnej 2.3 - 2.5 MW. Ze względu na rozkład godzinowy poszczególnych prędkości wiatru, najwydajniejsze energetycznie okazały się turbiny o mocy 2 MW. Pewnym zaskoczeniem jest najmniejsza produktywność turbiny W2E100/2.55, gdyż ma ona największy wirnik i największą moc nominalną z badanych.

Uzyskanie celu akustycznego (zachowanie poziomów dopuszczalnych hałasu) wymaga często redukcji mocy akustycznej kilku turbin wiatrowych na farmie, oznacza to zazwyczaj spadek ich produktywności. Proces ten wymaga zmiany oprogramowania sterującego pracą turbiny i zawsze odbywa się kosztem generowanej energii (zmianą krzywej mocy). Niektóre typy turbin wiatrowych poza zmianą krzywej mocy mogą mieć stosowane nakładki montowane na łopaty wirnika turbiny, które nie powodują ograniczenia jej produktywności, a o kilka decybeli zmniejszają moc akustyczną urządzenia. Stosowana jest również optymalizacja lokalizacji urządzeń na farmie wiatrowej. Wykazano, że stosując powyższe rozwiązania, możliwe jest przekształcenie terenu pod elektrownię wiatrową z ograniczeniem emisji akustycznej turbin bez straty wydajności energetycznej farmy wiatrowej.

3. Materiał i metody badań

3.1. Materiał badawczy

Ze względu na określone w rozprawie doktorskiej zadania (Z1 – Z4) materiał badawczy w poszczególnych zadaniach stanowiły:

Identyfikacja źródła (Z1)

Analizie poddano 3 typy wież wsporczych turbin wiatrowych o mocach od 2.0 do 3.0 MW i o zbliżonej mocy akustycznej od 105 do 106 dB. Turbiny wchodziły w skład trzech różnych farm wiatrowych zlokalizowanych na płaskim terenie o charakterze rolniczym. W doświadczeniu badano wpływ konstrukcji wieży nośnej na emisję hałasu turbiny wiatrowej. Do analiz wybrano dwie turbiny zamocowane na wieży nośnej z rurową konstrukcją stalową o wysokości 80 m i średnicy wirnika 80 m oraz wysokości 120 m i średnicy wirnika 116 m. Jako trzecią, analizie poddano turbinę o średnicy wirnika 110 m, zamocowaną na wieży o stalowej konstrukcji kratowej i wysokości 160 m. Wybierając różne rodzaje turbin wiatrowych do badań, kierowano się powszechnością zastosowania określonego typu urządzenia na wieży rurowej. W przypadku wyboru turbiny o wieży kratownicowej, zdecydowano się na pomiar najbliższej dostępnej do badań zlokalizowanej w Polsce.

Identyfikacja zagrożenia (Z2)

W eksperymencie badano oddziaływanie hałasu słyszalnego oraz infradźwiękowego w tym niskoczęstotliwościowego (LFN) pochodzącego od farmy wiatrowej na uczniów gminnej szkoły podstawowej. Budynek szkoły nie został wybrany do oceny przypadkowo. Zgodnie z Rozporządzeniem o dopuszczalnych poziomach hałasu w środowisku szkoła jest terenem chronionym akustycznie, którego dopuszczalny poziom hałasu jest taki sam jak w przypadku zabudowy jednorodzinnej. Szkoła została wytypowana również ze względu na swobodny dostęp do pomieszczeń w celu wykonania pomiarów.

Optymalizacja ustawienia turbin ze względu na hałas i wydajność (Z3, Z4)

Analizie poddano rzeczywiste wyniki wietrzności z masztu pomiarowego w lokalizacjach udostępnionych przez projektantów farm wiatrowych. Dane wygenerowane w formie plików ROW zawierały: uśrednione 10-minutowe wyniki prędkości i kierunków wiatru, a także wilgotności, temperatury i ciśnienia powietrza. Następnie dane pomiarowe zostały importowane do arkusza Excel i poddane analizie. Badaniu poddano dwie przykładowe lokalizacje elektrowni wiatrowych w północnej Polsce, farma A i B. W celu zapewnienia możliwości porównań założono budowę farmy wiatrowej (WF) o podobnym kształcie i ograniczeniach środowiskowych lub analizowano pojedyncze turbiny wiatrowe w obu lokalizacjach. Analizy przeprowadzono biorąc pod uwagę charakterystykę elektrowni wiatrowej opisaną przez producenta, która przedstawia zależność mocy turbiny od prędkości wiatru [60-65].

3.2. Metody badań

Do rozwiązania problemu określonego w zakresie pracy wykorzystane zostały metody naukowe takie jak: pomiar, obserwacja, symulacje i analizy porównawcze.

Pomiary terenowe

— Pomiary parametrów meteorologicznych

Wytyczne dotyczące pomiarów zawarte są w normie IEC 61400-12-1: Turbiny wiatrowe: Część 21-1: Pomiary mocy elektrycznej turbin wiatrowych. W załączniku G powyższej normy znajdują się wytyczne dotyczące prawidłowej instalacji oprzyrządowania do celów pomiarowych na maszcie meteorologicznym typu rurowego lub kratownicowego. Wytyczne zawarte w normie IEC 61400-12-1, są międzynarodową praktyką dotyczącą pomiarów wiatru. Tylko pomiary wykonane przy użyciu masztu

pomiarowego o wysokości przyszłej wieży WT (100-160m) mogą być sklasyfikowane jako wiarygodne pomiary i mogą służyć w kolejnych etapach projektu jako punkt odniesienia dla uzyskania pełnego lub częściowego finansowania projektu. Pomiary wykonane na wysokościach niższych niż wysokość wieży turbiny wiatrowej mogą być przeliczane na wyższe wysokości, ale rezultaty przeliczeń obarczone są błędami trudnymi do oszacowania i zniwelowania. Zgodnie z normą IEC 61400-12-1 zostały przeprowadzone pomiary parametrów meteorologicznych przez profesjonalną firmę zajmującą się komercyjnie pomiarami. Wyniki pomiarów zostały udostępnione na użytek rozprawy z zastrzeżeniem upubliczniania lokalizacji, której dotyczą. Ponieważ są to dane wrażliwe firmy, lokalizacje których dotyczą analizy są opisane jedynie w sposób przybliżony.

— *Pomiary hałasu*

Pomiary hałasu w środowisku wykonano zgodnie z normami ISO 1996-1, 1996-2 oraz Rozporządzeniem Ministra Środowiska [58] przyjmując następujące kryteria optymalnych warunków meteorologicznych i wyboru punktów pomiarowych:

1. Średnia prędkość wiatru w punkcie pomiarowym nie mogła przekraczać 5 m/s.
2. Prędkość wiatru na wysokości osi turbiny wiatrowej miała być możliwie bliska tej, przy której turbina osiąga maksymalną lub bliską maksymalnej moc akustyczną.
3. Kierunek wiatru od wszystkich turbin na farmie do punktu pomiarowego ma spełniać kryterium propagacji dźwięku z wiatrem, czyli $\pm 45^\circ$ od kierunku głównego wiatru.
4. Temperatura powietrza możliwie bliska wartości 10°C .
5. Ciśnienie atmosferyczne możliwie bliskie 1000 hPa.
6. Wilgotność względna powietrza możliwie bliska 70 %.

Parametry meteorologiczne mierzono przenośną stacją meteo posiadającą ważne świadectwo wzorcowania. Pomiary hałasu przeprowadzono przy zastosowaniu cyfrowego analizatora dźwięku klasy 1 SVAN 912AE z osłoną przeciwwietrzną, umożliwiającego jednoczesny pomiar większości parametrów charakteryzujących hałas. Przed i po pomiarach, tor pomiarowy wraz z analizatorem dźwięku był sprawdzany kalibratorem klasy 1. Cały zestaw pomiarowy miał niezbędne certyfikaty kalibracji.

Symulacje

Obliczenie zasięgu hałasu emitowanego przez farmy wiatrowe jest jedną z pierwszych prac projektowych umożliwiających ocenę zagrożenia akustycznego dla środowiska, wymaganą do uzyskania pozwolenia na budowę farmy wiatrowej. Najczęściej zalecanym w różnych krajach na świecie algorytmem obliczeniowym do prognoz propagacji hałasu od turbin wiatrowych jest algorytm zgodny z normą ISO 9613-2. W obliczeniach stosowano metodę alternatywną, nie wymagającą określania wskaźnika gruntu, dopuszczoną normą ISO 9613-2. Jako obszar oddziaływania każdej farmy wiatrowej przyjęto obszar ograniczony izofoną 40 dB obliczoną dla maksymalnych mocy akustycznych turbin.

3.3. Przygotowanie i analiza danych

Pomiary hałasu

Podczas prowadzonych pomiarów starano się mieć na uwadze wszystkie specyficzne zjawiska związane z pracą WT mające wpływ na hałas. Eliminowano próbki z wyraźnie słyszalnymi zakłóceniami spowodowanymi przelotami samolotów, przejazdami pociągów i samochodów oraz odgłosami przyrody np. szczekające psy. Wyniki pomiarów hałasu określano na podstawie pomierzonych bez zakłóceń 3 do 5 próbek pomiarowych w każdym punkcie. Czas pomiaru pojedynczej próbki wynosił 10-60 s. Próby z zakłóceniami zostały odrzucone.

Badania prowadzono:

- w terenie otwartym,
- w klasach lekcyjnych budynku szkoły podstawowej w celu ustalenia poziomu hałasu akustycznego, infradźwiękowego i LFN przenikającego ze środowiska,
- przy elewacji budynku chronionego akustycznie.

W prowadzonych pomiarach określano średnią prędkość wiatru na wysokości 3.5 m nad poziomem terenu. Stosowano regułę, by podczas pomiarów nie była ona większa niż 5 m/s.

W terenie otwartym pomiary na każdej farmie wiatrowej przeprowadzono w punktach kontrolnych zlokalizowanych w odległości 50 m i 250 m od wieży nośnej skrajnej turbiny farmy. Pomiar w terenie otwartym, bez zabudowań i wysokich drzew, pozwalał na eliminowanie wpływu tych obiektów na mierzone parametry hałasu. Miejsce lokalizacji punktów pomiarowych było uzależnione od kierunku wiatru. Dobierano je tak, by wiatr wiał od farmy wiatrowej na punkty kontrolne. Na każdej z farm wiatrowych wykonano dwa rodzaje pomiarów: ciągły w określonym czasie oraz analizę tercjową. Rejestrowano zmiany w czasie niekorygowanego poziomu ciśnienia akustycznego oraz korygowanego krzywą A i G. Wynikiem analiz tercjowych był obraz widma hałasu oraz wartość równoważnego poziomu dźwięku w czasie pomiaru. Analizy tercjowe wykonano bez korekcji oraz przy zastosowaniu korekcji A i G. Po wykonaniu pomiarów hałasu zatrzymywano WT. Dokonywano wtedy pomiaru tła akustycznego w tych samych punktach pomiarowych oraz w podobnych warunkach meteorologicznych. W przypadku braku możliwości zatrzymania WT pomiar tła akustycznego wykonano w odległości 5 km od farmy wiatrowej.

W terenie zabudowanym (szkoła) punkty pomiarowe zlokalizowano w sześciu pionach pomiarowych, A1, A2, B1, B2, BG1 i BG2. W zewnętrznych pionach pomiarowych A1 i B1 oddalonych o 2 m od elewacji budynku szkoły wykonano badania na trzech wysokościach nad poziomem terenu: 4, 8 i 12 m. W wewnętrznych pionach pomiarowych A2 i B2 prowadzono badania na trzech piętrach budynku szkoły (parter, I piętro, II piętro). Pomiaru dokonywano w środkowej części klasy lekcyjnej na wysokości 1.5 m nad posadzką. Badania prowadzono po zamknięciu okien w ścianach zewnętrznych. W pionach pomiarowych BG1 i BG2 badano jedynie poziom tła akustycznego na wysokości 4 m nad poziomem terenu w odległości 2 m od elewacji budynku (BG1) oraz na wysokości 1.5 m nad poziomem posadzki parteru wewnątrz budynku szkoły (BG2). Ze względu na brak możliwości wyłączenia turbin wiatrowych podczas pomiaru tła akustycznego, punkty pomiarowe BG1 i BG2 usytuowano w cieniu akustycznym utworzonym przez wschodnie skrzydło budynku szkoły oraz budynek o wysokości 6 m stanowiący łącznik między wschodnim i zachodnim skrzydłem szkoły. Wybrana lokalizacja punktów pomiaru tła akustycznego pozwoliła na zminimalizowanie wpływu turbin wiatrowych na wyniki pomiarów oraz jednocześnie nie wyeliminowała wpływu na wynik badań wiatru wiejącego na punkt pomiarowy. Pomiary tła akustycznego wykonywano podczas braku ruchu pojazdów na drodze krajowej. W celu wyeliminowania zakłóceń wywołanych obecnością nauczycieli i uczniów w klasach lekcyjnych, badania prowadzono w godzinach 13:00 – 21:00 po zakończonych zajęciach dydaktycznych.

Symulacje hałasu

W obliczeniach zastosowano metodę alternatywną normy ISO 9613-2 [55] ze względu na jednoznaczny sposób doboru parametru tłumienia fali dźwiękowej przez grunt. Stosując metodę alternatywną źródło opisuje się dwoma parametrami, podając wysokość nad poziomem terenu i moc akustyczną. Poziom mocy akustycznej turbin wiatrowych zależy od prędkości wiatru. Do obliczeń przyjęto maksymalną moc akustyczną dla każdego typu turbiny wiatrowej.

Analiza energetyczna

Na podstawie uśrednionych 10-minutowych pomiarów prędkości wiatru obliczono średniodobowe, następnie średniomiesięczne a w konsekwencji średnioroczne prędkości wiatru. Wynikiem analizy wietrzności jest histogram rozkładu prędkości wiatru w przedziałach klasowych co jeden metr/sekundę. Przyporządkowano zmierzone prędkości wiatru do poszczególnych klas. Mając na względzie, dostępne wyniki wietrzności na wysokościach niższych niż projektowana wysokość wież turbin wiatrowych, analizy prowadzono wariantowo. Na podstawie dostępnych danych obliczono średnią prędkość wiatru na wysokości 100 lub 120 m nad poziomem terenu. Do modelowania prędkości wiatru w danej lokalizacji i na określonej wysokości najczęściej wykorzystuje się jedną z metod probabilistycznych. Rozkład wiatru na analizowanych wysokościach wyznaczano z dwu-parametrowej funkcji gęstości rozkładu Weibulla dla różnych wartości współczynnika kształtu k . Wartość parametru skali A obliczano na podstawie średniej prędkości wiatru i wybranego współczynnika kształtu k . W postaci graficznej rozkład Weibulla przedstawia zależność spodziewanej liczby godzin wietrznych dla określonej prędkości na badanym terenie. Analizowano turbiny o poziomej osi obrotu i mocy nominalnej 2.0, 2.3 lub 2.5 MW. Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów oraz charakterystyk produktywności dostępnych turbin wiatrowych dokonano wyboru urządzenia. Na podstawie charakterystyki elektrowni możliwe było oszacowanie mocy P_{we_i} dla prędkości wiatru v_i będących środkami kolejnych przedziałów klasowych. W następnym kroku obliczono energię E_{we_i} wygenerowaną przez elektrownię podczas jednego roku w kolejnym i-tym przedziale klasowym:

$$E_{we_i} = P_{we_i} \cdot t_i = P_{we_i} \cdot f_i \cdot T_Y \quad (1)$$

Sumując energię składową ze wszystkich przedziałów otrzymano całkowitą energię wygenerowaną podczas jednego roku przez elektrownię E_{we} :

$$E_{we} = \sum_{i=1}^k E_{we_i} \quad (2)$$

4. Wyniki badań

Rozprawa doktorska została oparta na czterech oryginalnych artykułach naukowych (Z1 – Z4) powiązanych tematycznie i opublikowanych w czasopismach znajdujących się na liście MEiN. Wszystkie cztery artykuły są artykułami naukowo – badawczymi opartymi na przeprowadzonych badaniach w terenie lub badaniach symulacyjnych. Artykuły stanowiące niniejsze opracowanie poruszają tematykę związaną z określeniem optymalnej lokalizacji turbin wiatrowych na terenach rolniczych, przy zachowaniu dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku oraz osiągnięciu maksymalnej dla danych warunków wietrznych produktywności.

Pierwszy artykuł (Z1) opisuje znaczące różnice w wynikach pomiarów hałasu infradźwiękowego i akustycznego rejestrowanych wokół farm wiatrowych w zależności od rodzaju konstrukcji wsporczej turbiny wiatrowej. W pracy przedstawiono wyniki pomiarów zarejestrowane w pobliżu turbin wiatrowych o różnych konstrukcjach wieży nośnej (rura lub kratownica) i różnych wysokościach.

Drugi artykuł (Z2) dotyczy badań, których celem było ustalenie występowania ewentualnych znaczących poziomów hałasu akustycznego, infradźwiękowego i niskoczęstotliwościowego w salach lekcyjnych oraz w otoczeniu szkoły podstawowej. Wybrany obiekt badań jest reprezentatywny dla terenów o najniższym poziomie dopuszczalnym hałasu w środowisku. Ustalono kryteria oceny hałasu infradźwiękowego i niskoczęstotliwościowego. Wykonano analizy tercjowe widma hałasu i obliczono niezbędne do oceny wskaźniki hałasu.

W artykule trzecim (Z3) wskazano na konieczność równoległego prowadzenia analiz środowiskowych i energetycznych podczas projektowania umiejscowienia oraz doboru typu turbiny na farmie wiatrowej (WF). Wytypowano urządzenia spełniające zarówno kryteria akustyczne jak i energetyczne (wydajność urządzeń). Opisano jak powinien przebiegać prawidłowy proces wyboru typu turbiny wiatrowej do konkretnej lokalizacji. Starano się pokazać wszystkie szczegóły dotyczące poszczególnych faz prowadzonych obliczeń.

W ostatnim czwartym artykule (Z4) przedstawiono sposób doboru typu turbiny wiatrowej na podstawie zarejestrowanych rocznych pomiarów wiatru w dwóch lokalizacjach. Przedstawiony proces wyboru turbiny prowadzi do ustalenia optymalnego urządzenia dla danych warunków wietrznych w badanej lokalizacji.

4.1 The impact of supporting tower on wind turbine noise emission (Z1)

Występują znaczne różnice w emisji hałasu przez turbiny wiatrowe o dużych mocach w zależności od rodzaju konstrukcji wsporczej turbiny (kratownica przestrzenna lub rurowa). Wybrano trzy kryteria porównawcze: emisję infradźwiękową w zakresie od 1 do 100 Hz korygowaną krzywą G, emisję hałasu słyszalnego w zakresie od 20 do 16000 Hz korygowaną krzywą A oraz niekorygowaną emisję hałasu w zakresie od 1 do 100 Hz. W pracy wykazano, że posługiwanie się wyłącznie określeniem „farma wiatrowa o mocy XX MW” lub „turbina wiatrowa o mocy XX MW” do opisu źródła hałasu jest niewystarczające. Zawsze należy podać parametry turbin wiatrowych zainstalowanych na opisywanej farmie wiatrowej w postaci: mocy akustycznej, średnicy wirnika, wysokości wieży oraz rodzaju konstrukcji wsporczej.

Większość stosowanych obecnie WT pracuje w taki sposób, że wirnik ustawia się na wiatr. Położenie wirnika na wiatr powoduje uginanie się łopat w kierunku wieży nośnej turbiny. Im dłuższa jest łopata tym bardziej się ugina ze względu na większą powierzchnię roboczą poddaną obciążeniu wiatrem. W celu uniknięcia kolizji łopaty z wieżą turbiny wiatrowej podczas silnych wiatrów, wirniki o dużych średnicach (powyżej 110 m) ustawiane są pod większym kątem do pionu niż wirniki o średnicach do 100 m. Wtedy końcówki dłuższych łopat przemieszczają się w większej odległości od wieży. Ustawienie to

ma korzystny wpływ na emisję hałasu. Eliminowane są wtedy gwałtowne zmiany ciśnienia akustycznego wywołane przemieszczaniem się łopat w pobliżu wieży rurowej turbiny. Zjawisko to nie ma większego znaczenia w przypadku turbin o kratowej konstrukcji wieży.

Wpływ WT na środowisko powinien być zawsze określany dla konkretnej lokalizacji famy wiatrowej, składającej się z dokładnie opisanych urządzeń. Wyniki badań przeprowadzone dla trzech różnych wież wsporczych WT, ale o podobnej mocy akustycznej, wskazują na znaczne różnice ich wpływu na środowisko akustyczne. Celem przeprowadzonych pomiarów była chęć odpowiedzi na pytanie, czy istnieją różnice w zmierzonych wartościach wybranych wskaźników hałasu w zależności od wysokości oraz rodzaju konstrukcji wieży według ustalonych kryteriów oceny. Istotnym było ustalenie wpływu na środowisko badanego obiektu. Nie przyrównywano uzyskanych wyników do poziomów dopuszczalnych. Oznaczenia AWT50, BWT50 i CWT50 odnoszą się do pomiaru wykonanego w odległości 50 metrów od wieży WT. Natomiast oznaczenia AWT250, BWT250 i CWT250 oznaczają, że pomiaru dokonano w odległości 250 metrów od wieży WT. Wynik każdego pomiaru jest zawsze wypadkową hałasu badanego źródła i tła akustycznego. Wynika to ze zjawisk towarzyszących podmuchom wiatru, których udział zależy od lokalizacji punktu pomiarowego i jego otoczenia.

Hałas infradźwiękowy (korygowany krzywą G)

Ze względu na właściwości hałasu infradźwiękowego, wynik pomiaru w wielu przypadkach uwzględnia również wpływ innych niezidentyfikowanych źródeł. Wyniki równoważnego poziomu dźwięku w zakresie infradźwiękowym L_{Geq} zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie zmierzonych wartości hałasu infradźwiękowego korygowanego krzywą G

Typ WT	Pomiar w odległości 50m (P1) od WT	Pomiar w odległości 250m (P2) od WT	Tło akustyczne
	L_{Geq} [dB]	L_{Geq} [dB]	[dB]
AWT	84.7–87.1	77.0–79.1	67.1–69.8
BWT	78.4–80.1	78.7–80.2	66.8–69.5
CWT	66.1–67.9	80.9–83.3	65.9–68.4

Obserwujemy różne, w zależności od typu turbiny zależności między wielkością mierzonego poziomu sygnału, a odległością. Dla turbiny o wysokości 80 m (AWT) poziom infradźwięków w pobliżu WT jest zdecydowanie większy, niż ten rejestrowany w odległości 250 m. W przypadku WT o wysokości 120 m (BWT) poziomy rejestrowane w odległości 50 i 250 m od wieży są na zbliżonym poziomie. Zarejestrowane zmiany poziomu ciśnienia akustycznego (SPL) dla turbiny o wieży kratowej i wysokości 160 m (CWT) pokazują, że infradźwięki w pobliżu wieży nośnej są niższe od tych zarejestrowanych w odległości 250 m.

Hałas akustyczny (korygowany krzywą A)

Wyniki równoważnego poziomu dźwięku L_{Aeq} zarejestrowane podczas wykonywania analiz trzeczych zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie zmierzonych wartości hałasu akustycznego korygowanego krzywą A

Typ WT	Pomiar w odległości 50m (P1) od WT	Pomiar w odległości 250m (P2) od WT	Tło akustyczne
	L_{Aeq} [dB]	L_{Aeq} [dB]	[dB]
AWT	57.9–59.4	48.3–49.0	40.7–41.8
BWT	56.4–57.7	50.1–51.6	40.0–41.2
CWT	46.3–47.4	41.1–42.6	39.9–41.0

Podczas pomiarów hałasu akustycznego obserwujemy różne, w zależności od typu turbiny, związki wielkości mierzonego poziomu sygnału z odległością. Fluktuacje ciśnienia akustycznego w odległości 50 m od wieży AWT dochodzą do 11 dB, w czasie 60 s, a następujące po sobie do 6 dB. W odległości 250 m od wieży AWT fluktuacje ciśnienia akustycznego zmniejszają się i wynoszą maksymalnie 8 dB w czasie 60 s, a następujące po sobie do 5 dB. Fluktuacje ciśnienia akustycznego przy wieżach kratownicowych WT CWT są najmniejsze ze zmierzonych. Niezależnie od odległości od wieży WT fluktuacje ciśnienia akustycznego, w czasie 60 s, nie przekraczają 5 dB, a następujące po sobie nie przekraczają 3 dB. W odległości 250 m zarejestrowano w czasie 60 s fluktuacje do 7 dB, a następujące po sobie do 3 dB. Wyznaczone dla przebiegów czasowych oraz w analizach tercjowych wartości równoważnego poziomu dźwięku wskazują, że najwyższe poziomy LAeq zarejestrowano przy WT o wysokości 80 m. Najniższe poziomy zmierzono przy turbinach posadowionych na wieżach kratownicowych o wysokości 160 m. Wraz ze wzrostem odległości punktu pomiarowego od źródła hałasu akustycznego rejestrujemy niższe wartości równoważnego poziomu dźwięku.

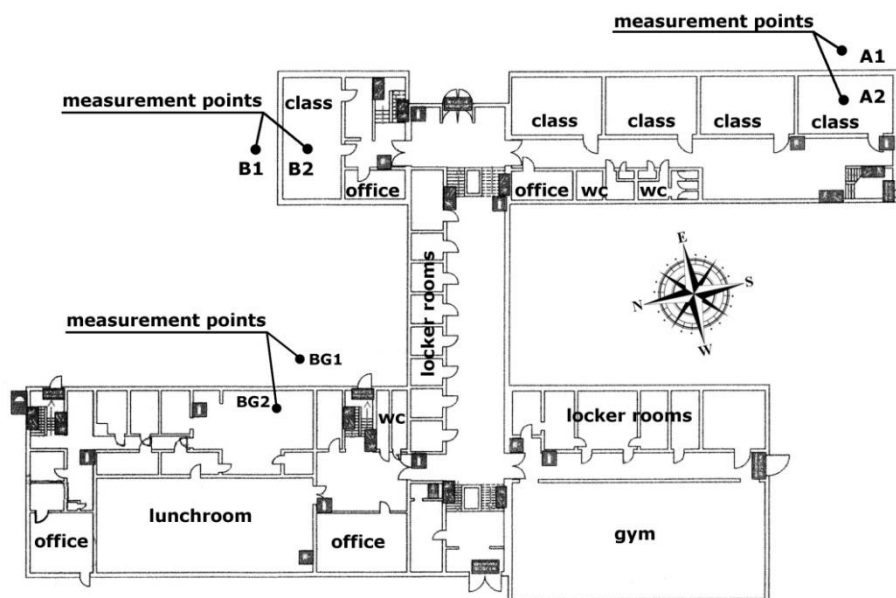
4.2 The Assessment of Infrasound and Low Frequency Noise Impact on the Results of Learning in Primary School – Case Study (Z2)

Celem przeprowadzonych badań było ustalenie czy poziom hałasu akustycznego i niskoczęstotliwościowego, w tym infradźwiękowego, w budynku i otoczeniu szkoły podstawowej jest odczuwalny przez dzieci. Antropogenicznymi źródłami hałasu podczas prowadzonych badań były ruch samochodowy na drodze krajowej zlokalizowanej od strony północnej budynku szkoły oraz farma wiatrowa usytuowana od strony wschodniej i południowej budynku szkoły (Rys.1). Badana szkoła jest szkołą gminną i znajduje się z dala od aglomeracji miejskiej. Punkty pomiarowe zlokalizowano w sześciu pionach pomiarowych (Rys.2), A1 i A2 od strony wschodniej, B1 i B2 oraz BG1 i BG2 od strony północnej.

Jako przedmiot prowadzonych analiz wybrano stosunkowo specyficzną sytuację, gdy w pobliżu budynku szkoły zlokalizowana jest farma wiatrowa oraz droga krajowa o znacznym natężeniu ruchu. Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono w postaci niekorygowanych analiz tercjowych wraz z poziomami progów słyszenia hałasu akustycznego (ISO 226) oraz hałasu niskoczęstotliwościowego.



Rys.1 Lokalizacja szkoły i źródeł hałasu

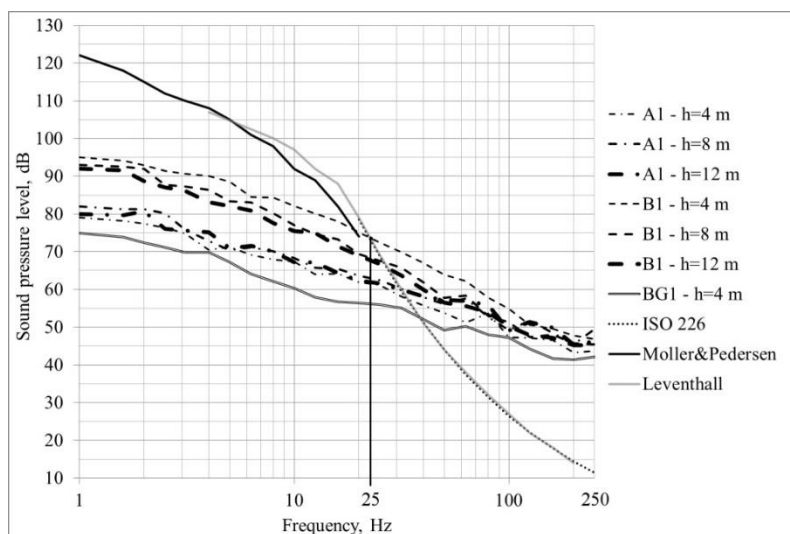


Rys.2 Rozmieszczenie punktów pomiarowych

Przystępując do identyfikacji potencjalnego zagrożenia LFN na zdrowie dzieci przebywających na zewnątrz w otoczeniu budynku szkoły, istotne są wyniki prób przeprowadzonych na wysokości 4 m. Należy zauważyć, że w pionie pomiarowym A1 (od strony turbin wiatrowych) najwyższe poziomy ciśnienia akustycznego rejestrowane są na wysokościach 8 i 12 m, a w pionie pomiarowym B1 (od strony drogi) na wysokości 4 m. Dla częstotliwości powyżej 25 Hz wyniki pomiarów na wysokości 4 m w pionie pomiarowym A1 są zbliżone do wartości tła akustycznego pomierzonych w pionie BG1.

Analizy tercjowe

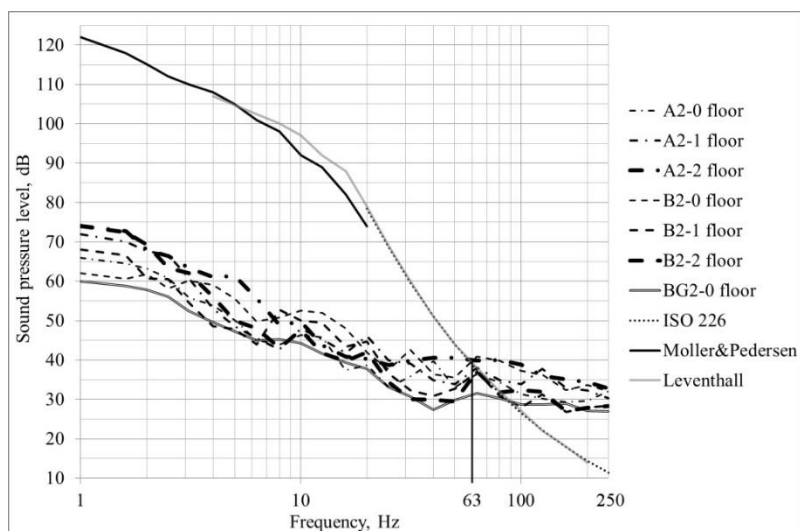
Na rysunku 3 pokazano wyniki przeprowadzonych analiz tercjowych na zewnątrz szkoły w punktach oddalonym o 2 m od elewacji budynku. Wyróżniono częstotliwość środkową pasma 25 Hz, po przekroczeniu której otrzymano wyniki pomiarów powyżej progu słyszenia.



Rys.3 Widmo hałasu niskoczęstotliwościowego (LFN) występującego na zewnątrz budynku

Na rysunku 4 pokazano wyniki przeprowadzonych analiz tercjowych w klasach lekcyjnych w pionach pomiarowych A2, B2 i BG2. Ze względu na dużą ilość przeprowadzonych analiz tercjowych

zaprezentowano wyniki o najwyższych zmierzonych wartościach. Wyróżniono częstotliwość środkową pasma tercjowego 63 Hz, po przekroczeniu której otrzymano wyniki pomiarów powyżej progu słyszenia.



Rys.4 Widmo hałasu niskoczęstotliwościowego (LFN) występującego w klasach lekcyjnych

Hałas infradźwiękowy

Zestawione w tabeli 3 wyniki ze wszystkich pobranych prób poziomu hałasu infradźwiękowego wewnątrz klas lekcyjnych nie przekraczają wartości 67 dB, a w otoczeniu szkoły nie przekraczają 92 dB. Obliczone wartości średnie równoważnego poziomu dźwięku korygowanego krzywą korekcji G nie przekraczają 65 dB wewnątrz klas lekcyjnych i 89 dB w otoczeniu budynku szkoły. Porównując otrzymane wyniki do wartości uzyskanych z pomiarów prowadzonych w podobnych warunkach meteorologicznych dla źródeł naturalnych hałasu infradźwiękowego oraz podczas codziennych czynności domowych [66] można stwierdzić, że są one na zbliżonych poziomach.

Tabela 3. Wyniki pomiarów hałasu infradźwiękowego

Wysokość pomiarowa /piętro budynku	Numer próby	Równoważny poziom dźwięku G - L _{Geq}									
		Seria pomiarowa 1				Seria pomiarowa 2				Tło	
		Pion pomiarowy									
		A1	A2	B1	B2	A1	A2	B1	B2	BG1	BG2
[m] / -	-	[dB]									
4 / 0	1 ₀	80.8	52.5	84.7	60.6	77.9	52.8	85.4	60.6	76.4	53.1
	2 ₀	78.5	53.2	87.2	60.2	78.4	54.5	91.4	61.0	74.8	52.3
	3 ₀	77.5	55.0	83.9	59.9	76.9	55.7	86.5	59.4	75.1	52.7
	L _{Geq,avg}	79.2	53.7	85.5	60.2	77.8	54.5	88.6	60.4	75.5	52.7
8 / I	1 _I	87.8	60.9	78.6	58.2	86.2	60.6	80.8	57.5	-	
	2 _I	88.4	66.6	77.5	58.9	87.8	66.0	80.0	59.8		
	3 _I	85.6	62.8	74.8	59.1	83.4	63.4	75.0	59.1		

	$L_{Geq,avg}$	87.5	64.1	77.3	58.8	86.2	63.9	79.2	58.9	
12 / II	1 _{II}	89.6	62.6	81.7	56.9	89.4	62.7	82.2	55.7	
	2 _{II}	84.6	60.3	82.6	58.8	83.0	57.9	82.5	55.7	
	3 _{II}	85.5	61.1	82.3	60.6	85.2	61.1	82.3	62.7	
	$L_{Geq,avg}$	87.1	61.4	82.2	59.0	86.7	61.0	82.3	59.4	

Hałas LFN

Analiza wykresów przedstawionych na rysunkach 3 i 4 wskazuje, że w widmie analizowanego hałasu znajdują się składowe LFN o poziomach powyżej progu słyszenia. Należy się zastanowić czy zmierzone poziomy hałasu mogą mieć uciążliwy lub szkodliwy wpływ na uczniów szkoły. W tabeli 4 zestawiono wyniki średnie pomiarów równoważnego poziomu dźwięku A i C w pionach pomiarowych A i B oraz obliczoną różnicę $L_{Ceq} - L_{Aeq}$, stanowiącą przyjęte kryterium oceny.

Tabela 4. Wyniki pomiarów wskaźników L_{Ceq} i L_{Aeq}

Wysokość pomiarowa /piętro budynku	Równoważny poziom dźwięku C - L_{Ceq}				Równoważny poziom dźwięku A - L_{Aeq}				$L_{Ceq} - L_{Aeq}$			
	Pion A		Pion B		Pion A		Pion B		Pion A		Pion B	
	A1	A2	B1	B2	A1	A2	B1	B2	A1	A2	B1	B2
[m] / -	[dB]											
4 / 0	68.1	46.3	75.2	50.8	59.7	40.4	60.2	37.5	8.4	5.9	15.0	13.3
8 / I	74.9	51.1	69.3	49.1	63.6	38.5	63.5	40.3	11.3	12.6	5.8	8.8
12 / II	74.4	54.0	71.2	48,9	59.5	40.8	62.8	38,1	14.9	13.2	8.4	10.8

Zaobserwowano następującą zależność kryterium oceny $L_{Ceq} - L_{Aeq}$:

- w pionach pomiarowych A (od strony turbin wiatrowych) większe różnice (>10) zmierzono na wysokościach 8 i 12 m (A1) co odpowiada klasom zlokalizowanym na I i II piętrze budynku szkoły (A2),
- w pionach pomiarowych B (od strony drogi krajowej) większe różnice (>10) zmierzono na wysokości 4 m (B1) co odpowiada klasom zlokalizowanym na parterze budynku szkoły (B2),
- w żadnym ze zmierzonych punktów pomiarowych przyjęte liczbowe kryterium oceny nie było wyższe jak 15 (niskie zagrożenie LFN).

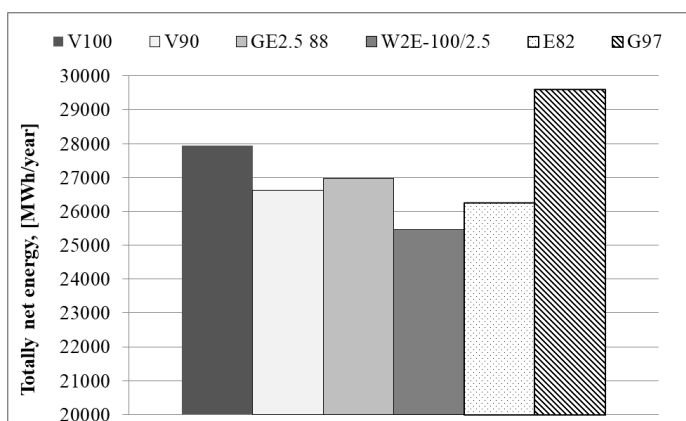
4.3 Energy and Acoustic Environmental Effective Approach for a Wind Farm Location (Z3)

Zasadność budowy farmy wiatrowej (WF) uzależniona jest przede wszystkim od dwóch czynników. Pierwszy to dostępność terenu o znacznej wietrzności, drugi to uwarunkowania środowiskowe w wybranej lokalizacji. Celem artykułu jest wskazanie konieczności równoległego prowadzenia analiz środowiskowych i energetycznych podczas projektowania umiejscowienia oraz doboru typu turbiny na farmie wiatrowej (WF). Dokładna analiza warunków wiatrowych w danej lokalizacji jest podstawową czynnością do określenia opłacalności posadowienia elektrowni wiatrowej. Głównym oddziaływaniem środowiskowym WF jest emisja hałasu. Prognoza zasięgu hałasu emitowanego przez WF umożliwia ocenę zagrożenia akustycznego dla środowiska w wybranej lokalizacji. Przedstawiono przykłady doboru turbiny wiatrowej optymalnie wykorzystującej zasoby wiatru w badanych lokalizacjach. Wybór turbiny

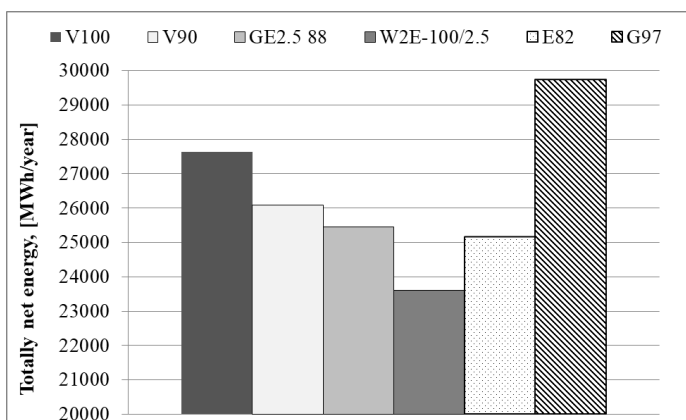
wiatrowej determinowany był parametrami urządzenia, wynikami rocznych pomiarów wiatru oraz dopuszczalnymi poziomami hałasu w środowisku. Analizie poddano dwie lokalizacje WF (farma A i farma B), w których przebadano po sześć turbin wiatrowych o poziomej osi obrotu. W celu zapewnienia możliwości porównań założono budowę WF o podobnym kształcie i ograniczeniach środowiskowych w obu lokalizacjach – Rys.2. WF składają się z czterech turbin o poziomej osi obrotu i mocy nominalnej 2.0, 2.3 lub 2.5 MW.

Wskazano urządzenia spełniające kryteria akustyczne jednocześnie będące najbardziej wydajne energetycznie. Opisano jak powinien przebiegać prawidłowy proces wyboru typu turbiny wiatrowej do konkretnej lokalizacji. Starano się pokazać wszystkie szczegóły dotyczące poszczególnych faz prowadzonych obliczeń.

Ilość energii sieciowej uzyskanej w ciągu roku przez całą WF składającą się z określonego typu turbin w sposób graficzny ukazują rysunki 5 i 6.



Rys.5. Ilość energii dostarczonej do sieci przez farmę wiatrową A



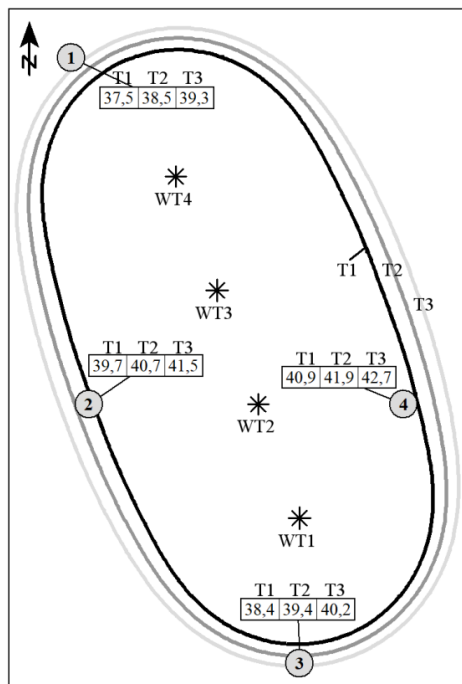
Rys.6. Ilość energii dostarczonej do sieci przez farmę wiatrową B

Do obliczeń przyjęto maksymalną moc akustyczną dla każdego typu turbiny wiatrowej. Wybrane turbiny wiatrowe zestawiono w trzy grupy o podobnej mocy akustycznej – Tabela 5.

Tabela 5. Parametry akustyczne analizowanych turbin wiatrowych

Model WT	V90	E82	V100	W2E-100/2.55	GE2.5	G97
Typ	T1		T2		T3	
Poziom mocy akustycznej, [dB]	104.0		105.0		105.8	

Wynikiem przeprowadzonej symulacji jest mapa z wynikami obliczeń w punktach kontrolnych. Izolinie wskazują na zasięg emisji hałasu o wartości 40 dB dla każdej grupy turbin T1 do T3. Ze względu na założenia takiego samego układu turbin i punktów kontrolnych w obu lokalizacjach, prezentowana jest jedna mapa – Rys.7. Uzyskane wyniki w punktach niewiele przekraczają wartość 40 dB dla maksymalnych mocy akustycznych urządzeń. Dlatego pominięto analizę dla pory dziennej w której założony poziom dopuszczalny wynosi 50 dB. W porze dziennej nie wystąpią przekroczenia poziomu dopuszczalnego hałasu na terenach chronionych akustycznie.



Rys.7. Mapa zasięgu emisji hałasu

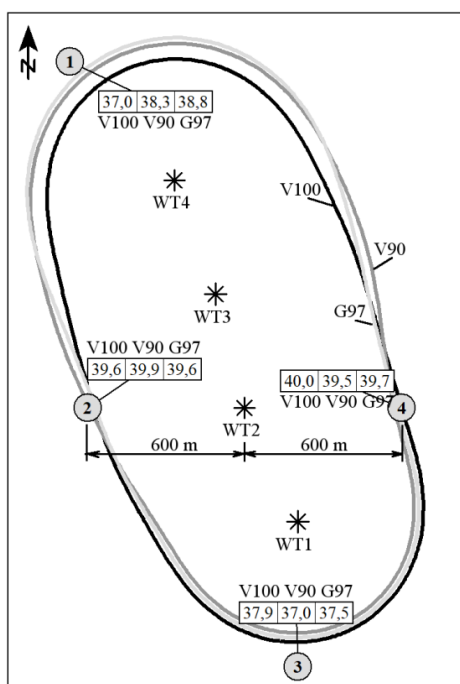
Uzyskane rezultaty wskazują na przekroczenia poziomu dopuszczalnego hałasu (40 dB) w punktach 2, 3 i 4 w porze nocnej. Wszystkie badane turbiny uzyskując maksymalną moc akustyczną spowodują przekroczenia (40 dB) w punkcie 4. Badane turbiny wiatrowe mają możliwość obniżenia maksymalnej mocy akustycznej. Na ogół powoduje to zmniejszenie produktywności energetycznej. Z badanych turbin tylko V100 ma możliwość redukcji mocy akustycznej poprzez założenie na łopaty wirnika nakładek STE (Serrated Trailing Edge), bez utraty nominalnej produktywności. Mając na uwadze wyniki przeprowadzonej analizy energetycznej i akustycznej do obliczeń końcowych wybrano trzy urządzenia.

Po przeprowadzonych analizach: energetycznej i akustycznej uzyskano informacje o produktywności i oddziaływaniu na środowisko wybranych turbin wiatrowych. Na tej podstawie wytypowano trzy urządzenia. Następnie odwrócono kolejność analiz. Przeprowadzono symulację emisji hałasu i po osiągnięciu celu w postaci braku przekroczeń poziomu dopuszczalnego (40 dB), przeprowadzono analizę energetyczną. Cel akustyczny osiągnięto przyjmując dane zestawione w tabeli 6 oraz poprzez przesunięcie turbiny WT2 o 50 m na zachód w stosunku do ustawienia wyjściowego.

Tabela 6. Parametry akustyczne analizowanych turbin wiatrowych

Model WT	V100 with STE				V90				G97						
Nr WT	WT1	WT2	WT3	WT4	WT1	WT2	WT3	WT4	WT1	WT2	WT3	WT4			
Poziom mocy akustycznej, [dB]	103.5				102.4				104.0				103.0		105.8

Ostateczne wyniki symulacji emisji hałasu przedstawiono na mapie Rys.8.



Rys.8. Mapa zasięgu emisji hałasu

Uzyskanie celu akustycznego wymagało redukcji mocy akustycznej kilku turbin wiatrowych, zgodnie z tabeli 6. Dla turbin V90 (WT1, WT2) i G97 (WT1, WT2, WT3) oznacza to spadek ich produktywności. Zastosowanie nakładek STE na łopaty wirnika turbiny V100 nie powoduje ograniczenia jej produktywności w stosunku do wirnika bez nakładek. Następnie przeprowadzono ostateczną analizę energetyczną. Ostatecznie w obu badanych lokalizacjach WF najwyższą produktywność całej farmy gwarantują turbiny G97. Jednak w przypadku lokalizacji farmy A produktywność turbin G97 nie jest znacząco wyższa od turbin V100 i wynosi około 350 MWh na rok. Biorąc pod uwagę uśredniony koszt produkcji energii lądowych WF wynoszący w roku 2017, 60 \$/MWh, różnica między produktywnością WF G97, a WF V100 to 21,000 \$ rocznie. Zatem decydującym kryterium wyboru turbiny wiatrowej może okazać się np. koszt zakupu lub koszt serwisowania urządzeń.

Zaproponowany w artykule sposób prowadzenia łącznie analiz energetycznych i akustycznych dostarcza inwestorowi dużo informacji o analizowanych urządzeniach. Pozwala wybrać lub zmienić typ urządzenia na dowolnym kolejnym etapie projektowania farmy wiatrowej. Proces projektowania WF trwa na ogół kilka lat. Na koniec procesu może okazać się, że określony typ turbiny nie jest dostępny w sprzedaży. Dzięki zaproponowanej w artykule analizie można szybko dokonać zmiany pierwotnie wybranego urządzenia.

4.4 Analysis of the Wind Turbine Selection for the Given Wind Conditions (Z4)

W niniejszej pracy przedstawiono sposób doboru turbiny wiatrowej na podstawie zarejestrowanych rocznych pomiarów wiatru kierując się uzyskaniem maksymalnych korzyści ekonomicznych.

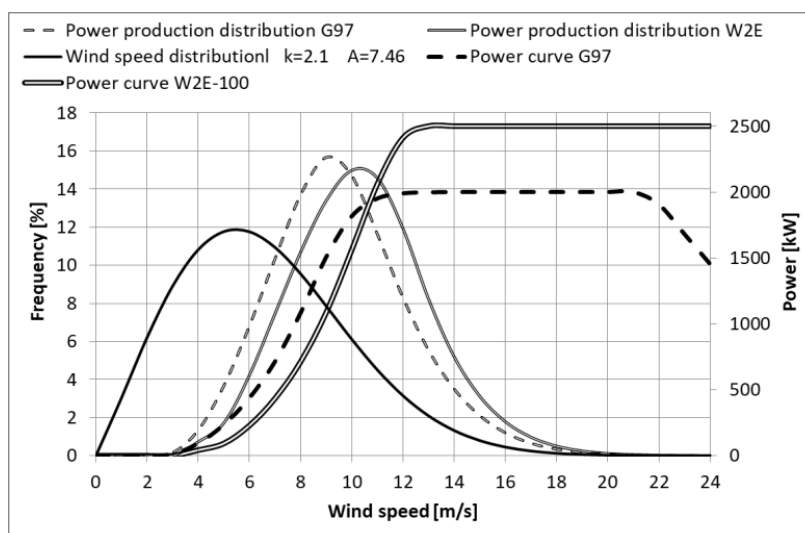
Charakterystyki wiatru należy analizować dla miejsca, w którym ma zostać zainstalowana turbina wiatrowa. Możliwe błędy szacowania produktywności mogą wynikać z niedokładnego przewidywania przetwarzanej energii. Zasadniczo pomiary wiatru są wykonywane na kilku wysokościach, ale zwykle poniżej wysokości piasty turbiny wiatrowej. Przeliczenie wartości średniej prędkości wiatru na inną

wysokość wymaga dokładnej analizy topografii terenu. Jednak błędne przyjęcie wskaźnika szorstkości może powodować przeszacowanie lub niedoszacowanie przyszłej produktywności farmy wiatrowej.

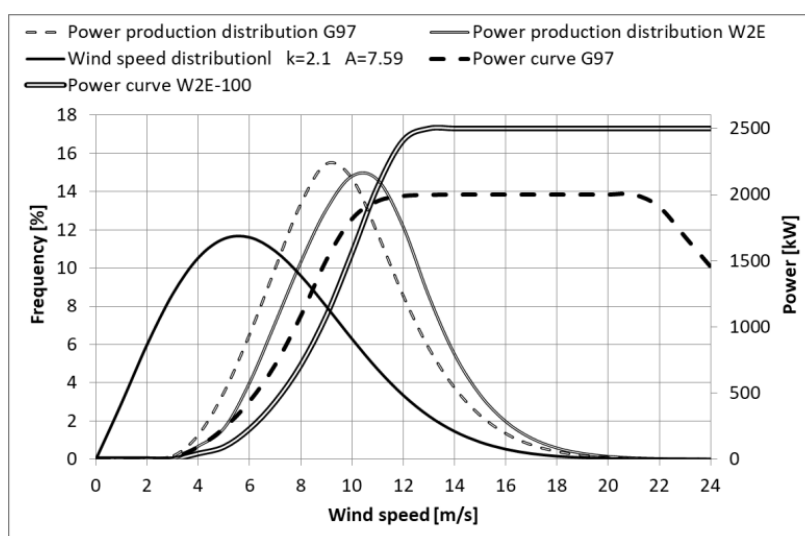
Współczynnik kształtu k Weibulla ma istotny wpływ na rozkład poszczególnych prędkości wiatru. Jednocześnie wykazano, że dobrze dobrana turbina wiatrowa może być mało czuła na zmiany współczynnika k . Analizę przeprowadzono dysponując jedno rocznym rozkładem prędkości wiatru. Wiadomym jest, że w poszczególnych latach eksploatacji turbin wiatrowych rozkład prędkości wiatru będzie zmienny i będzie oscylował wokół wieloletniej wartości średniej.

Pomiary wiatru wykazały przydatność badanych lokalizacji pod kątem ich wykorzystania do budowy parku wiatrowego. Przebadano sześć typów turbin wiatrowych o różnych mocach. Wskazano, które turbiny zapewniają najlepsze wykorzystanie zasobów energetycznych wiatru w badanych lokalizacjach.

Po przeprowadzonej analizie energetycznej uzyskano informacje o produktywności wybranych turbin wiatrowych. Zdecydowanym liderem w badanych lokalizacjach okazała się turbina G97. Uzyskała najwyższą produkcję energii sieciowej niezależnie od wartości parametru kształtu k . Najśłabszą produktywnością w wybranych lokalizacjach okazała się turbina W2E-100. Na rysunkach 9 i 10 pokazano rozkład Weibulla, krzywe mocy turbin G97 i W2E-100 oraz rozkład produktywności. Analiza danych wskazuje, że turbina W2E-100 osiąga swoją maksymalną moc przy prędkości wiatru 13 m/s.



Rys.9. Rozkład produktywności i krzywe mocy turbin wiatrowych - farma A



Rys.10. Rozkład produktywności i krzywe mocy turbin wiatrowych - farma B

W tabeli 7 zestawiono współczynniki wydajności analizowanych turbin wiatrowych w zależności od przyjętego współczynnika kształtu k . Współczynnik wydajności energetycznej jest ilorazem rocznej produkcji i technicznie możliwej maksymalnej produkcji turbiny wiatrowej. Należy zauważyć, że turbiny wiatrowe nie są zaprojektowane w celu maksymalizacji współczynnika wydajności energetycznej, ale raczej do generowania jak największej mocy przy określonych prędkościach wiatru. Współczynniki wydajności wynoszące 30–40% są uważane za bardzo wysokie w obszarach przybrzeżnych.

Ze względu na rozkład godzinowy poszczególnych prędkości wiatru, najwydajniejsze energetycznie okazały się turbiny o mocy 2 MW. Najmniej wydajne w badanych lokalizacjach będą turbiny o mocy nominalnej 2.3 - 2.5 MW.

Tabela 7. Współczynniki wydajności energetycznej

Lokalizacja	Współczynnik wydajności, [%]					
	V100	V90	G97	E82	GE2.5	W2E-100/2.55
$k = 2.1$						
Farma A	39.5	34.1	38.3	28.7	27.1	25.5
Farma B	40.4	35.0	39.2	29.5	28.2	26.5
$k = 2.3$						
Farma A	39.6	33.9	38.3	28.1	26.5	24.7
Farma B	40.8	35.0	39.4	29.2	27.5	25.7
$k = 2.5$						
Farma A	39.6	33.5	38.2	27.6	25.7	23.8
Farma B	40.8	34.7	39.4	28.6	26.9	25.0

Uśredniony koszt produkcji energii lądowych turbin wiatrowych wynosił w roku 2017, 60 \$/MWh. W tabeli 8 zestawiono roczny dochód z produkcji energii prezentowanych turbin w zależności od przyjętego współczynnika kształtu k .

Tabela 8. Dochód wygenerowany przez turbiny wiatrowe

Lokalizacja	Dochód, [tys. \$]					
	V100	V90	G97	E82	GE2.5	W2E-100/2.55
$k = 2.1$						
Farma A	372	355	397	349	356	335
Farma B	384	367	408	348	370	348
$k = 2.3$						
Farma A	371	352	397	342	348	324
Farma B	383	364	409	355	362	338
$k = 2.5$						
Farma A	367	348	395	334	338	313
Farma B	381	361	409	348	353	328

Maksymalna różnica między zyskiem finansowym z turbiny G97, a W2E-100 to 82,000 \$ rocznie. Biorąc pod uwagę minimalny czas użytkowania turbin wiatrowych wynoszący 20 lat, różnica w samym dochodzie z produkcji energii między tymi turbinami wyniesie 1,640,000 \$.

5. Podsumowanie i wnioski

Rosnący deficyt surowców energetycznych jak również degradacja środowiska naturalnego jest problemem wszystkich państw na Świecie. Potrzeby energetyczne przemysłu i ludności można zaspokoić w zgodzie z ideą zrównoważonego rozwoju, energią pozyskiwaną z odtwarzalnych źródeł energii, np. wiatru. Odpowiedni wybór lokalizacji terenu pod budowę elektrowni wiatrowych jest jedną z pierwszych decyzji inwestora w zakresie realizacji projektów farm wiatrowych. Wydajność energetyczna turbin wiatrowych w dużej mierze zależy od ich umiejscowienia w terenie. Miejscowy plan zagospodarowania przestrzennego wyraźnie rozgranicza tereny przeznaczone pod budowę siłowni wiatrowych, choć ich lokalizacja nie ma charakteru punktowego. Dzieje się tak dlatego, że nie jesteśmy w stanie z góry określić dokładnej lokalizacji elektrowni bez wcześniej przeprowadzonych badań uwzględniających ukształtowanie terenu, wietrzność, położenie najbliższej zabudowy mieszkalnej itd.

Zadaniem inżynierii lądowej jest kształtowanie powierzchni Ziemi na potrzeby egzystencji człowieka. Bezpieczeństwo eksploatacji budowli jakim jest turbina wiatrowa, związane jest nie tylko z nośnością oraz statecznością konstrukcji, ale także z minimalizacją negatywnego oddziaływania tego obiektu na środowisko. Poprawna lokalizacja elektrowni wiatrowej wymaga również uwzględnienia maksymalnego wykorzystania potencjału ekonomicznego terenu. W rozprawie doktorskiej powiązано wpływ aspektu środowiskowego (emisji hałasu) i ekonomicznego (wykorzystania zasobów naturalnych) na lokalizację elektrowni wiatrowej. Lokalizacja farmy wiatrowej powoduje przekształcenie obszaru wyłącznie rolniczego w teren upraw rolnych z elektrownią wiatrową. Mając na uwadze Ustawę Prawo budowlane oraz Ustawę o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym, przyjęta w rozprawie doktorskiej tematyka wpisuje się w problematykę rozwiązywaną przez inżynierię lądową.

Po dokonaniu analizy wyników uzyskanych z badań empirycznych oraz symulacyjnych sformułowano następujące wnioski:

1. Fluktuacje zmian ciśnienia akustycznego w czasie są znacznie większe w zakresie infradźwiękowym niż akustycznym. W pobranych próbkach hałasu infradźwiękowego korygowanego krzywą G maksymalne zmiany poziomu ciśnienia akustycznego sięgały 20 dB niezależnie od odległości punktu pomiarowego od wieży WT. Dla hałasu akustycznego korygowanego krzywą A fluktuacje nie przekraczały 11 dB przy wieży WT i 7 dB w odległości 250 m od wieży WT.
2. Spośród badanych WT hałas słyszalny rejestrowany wokół turbin zamocowanych na wieżach kratowych jest o około 10 dB mniejszy niż hałas przy wieżach WT o konstrukcji rurowej. W odległości 250 m od wieży turbiny o konstrukcji kratowej hałas turbiny jest nierozróżnialny z tłem akustycznym.
3. W pobliżu WT zamocowanej na kratowej konstrukcji wspanie nie występuje gwałtowna zmiana ciśnienia akustycznego związana z przemieszczaniem się łopaty wirnika w pobliżu wieży. Zjawisko to jest wyraźnie słyszalne przy WT o wieży rurowej i wysokości nie przekraczającej 100 m.
4. Wyniki pomiarów bez korekcji uzyskane w odległości 250 m od WT, wskazują na możliwość oddziaływania niskich częstotliwości dźwięku. Równoważny poziom hałasu infradźwiękowego korygowanego krzywą G rejestrowany w pobliżu WT mierzony łącznie z tłem akustycznym nie przekroczył 90 dB. Zmierzone wartości są na granicy progu odbierania infradźwięków przez ludzkie ucho lub poniżej tego progu. W odległości 250 m od źródła (TW) hałas infradźwiękowy w przypadku konstrukcji rurowej jak i kratownicy przestrzennej oscylował wokół 80 dB. W odległości 50 m od wieży WT najmniejszy poziom hałasu infradźwiękowego zarejestrowano przy turbinie o wieży kratowej. Wyniósł on poniżej 70 dB i był zbliżony do poziomu tła akustycznego.
5. Niższe poziomy hałasu infradźwiękowego oraz akustycznego przy turbinach o wieżach kratowych powodują mniejsze zagrożenie dla ludzi i zwierząt.

6. Dla odległości 500 m od turbin przyjęte kryterium oceny LFN pozwala stwierdzić niską lub nieistotną ekspozycję ludzi na hałas niskoczęstotliwościowy oraz brak zagrożenia hałasem infradźwiękowym. Zmierzone poziomy znajdują się poniżej progu percepcji człowieka na infradźwięki.
7. Wybór lokalizacji farmy wiatrowej powinien być poprzedzony przeprowadzoną łącznie analizą energetyczną i akustyczną uwzględniającą specyfikę pracy konkretnej turbiny. Określono poprawny proces doboru turbiny wiatrowej do danej lokalizacji:
 - podczas wstępnych analiz energetycznych nie wyklucza się żadnego dostępnego urządzenia,
 - dla wszystkich wybranych urządzeń wykonywana jest analiza oddziaływania hałasu,
 - po analizie hałasu przeprowadza się ponownie ocenę produktywności WF,
 - jako wynik sporządza się listę rankingową analizowanych urządzeń.

Otrzymane rezultaty potwierdziły osiągnięcie założonych celów oraz słuszność postawionych tezy. Wykonane badania wpisują się w globalny trend mający na celu dobro przyszłych pokoleń. Poddając ocenie osiągnięte wnioski z przeprowadzonych badań należy stwierdzić, że przekształcenie terenu rolniczego w elektrownię wiatrową może być zrealizowane bez szkody dla środowiska, jednocześnie osiągając cele ekonomiczne.

Literatura

1. Wasiuta A. *Ekonomiczne uwarunkowania rozwoju energetyki wiatrowej*, Warszawa: WDiNP UW, 2014.
2. Østergaard P. A., Duic N, Noorollahi Y., Mikulcic H., Kalogirou S. *Sustainable development using renewable energy technology*, Renewable Energy 2020, 146, 2430-2437.
3. U.S. EIA. *International Energy Outlook 2019 with Projections to 2050*; Office of Energy Analysis U.S. Department of Energy, Washington, DC, USA, 2019.
4. Hoogwijk M., De Vries B.J.M., Turkenburg W. *Assessment of the global and regional geographical, technical and economic potential of onshore wind Energy*, Energy Economics 2004, 26, 889-919.
5. Dupont E., Koppelaar R., Jeanmart H. *Global available wind energy with physical and energy return on investment constraints*, Applied Energy 2017, 209, 322-338.
6. Bosch J., Staffell I., Hawkes A.D. *Temporally-explicit and spatially-resolved global onshore wind energy potentials*, Energy 2017, 131, 207-217.
7. Letcher T.M. *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*, 1st ed., Academic Press: Cambridge, MA, USA; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2017.
8. Ehrlich R., Geller H.A. *Renewable Energy: A First Course*, 2nd ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2018.
9. Zagubień A., Wolniewicz K. *The impact of supporting tower on wind turbine noise emission*, Applied Acoustics 2019, 5, 260–270.
10. Burton T., Sharoe D., Jenkins N., Bossanyi E. *Wind Energy Handbook*. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd; 2001.
11. Kurpas D., Mroczek B., Karakiewicz B., Kassolik K., Andrzejewski W. *Health impact of wind farms*, Annals of Agricultural and Environmental Medicine 2013, 20(3), 595–605.
12. IEC 61400-12-1:2005: *Wind Turbines: Part 21-1: Power Performance of Electricity Producing Wind Turbines*; IEC: Geneva, Switzerland, 2005.
13. Jakubowski M., Mech Ł., Wolniewicz K. *A methodology of wind turbines selection for the given wind conditions*, J. Mech. Energy Eng. 2017, 1, 171–178.
14. Wolniewicz K., Kuczyński W., Zagubień A. *Method for wind turbine selection basing on in-field measurements*, J. Mech. Energy Eng. 2019, 3, 77–84.
15. Burton T., Sharoe D., Jenkins N., Bossanyi E. *Wind Energy Handbook*; John Wiley & Sons Ltd.: Hoboken, NJ, USA, 2001.
16. Van den Berg GP. *Wind turbine power and sound in relation to atmospheric stability*, Wind Energy 2008, 11, 151-169.
17. Kariniotakis G. *Renewable Energy Forecasting - From Models to Applications*. United Kingdom: Woodhead Publishing Elsevier, 2017.
18. Wharton S., Lundquist JK. *Assessing atmospheric stability and its impacts on rotor-disk wind characteristics at an onshore wind farm*, Wind Energy 2012, 15, 525-546.
19. Wegner S., Bareiss R., Guidati G. *Wind Turbine Noise*, Springer, Berlin, 1996.
20. Liu W.Y. *A review on wind turbine noise mechanism and de-noising techniques*, Renewable Energy 2017, 108, 311-320.
21. Zagubień A. *Measurement of Background Noise in the Environment – Cases Studies*, Rocznik Ochrona Srodowiska 2018, 20,1498-1514.
22. Tonin R. *Sources of wind turbine noise and sound propagation*, Acoustics Australia 2012, 40, 20-27.
23. Ingielewicz R., Zagubień A. *Problems of assessment of wind farm noise on the basis of local control measurements*, Rocznik Ochrona Srodowiska 2016, 18, 531-549.
24. Bullmore A., Adcock J., Jiggins M., Cand M. *Wind farm noise predictions and comparison with measurements*, Proceedings of the Third International Meeting on Wind Turbine Noise, Denmark Aalborg 2009.
25. Wszółek T., Kłaczyński M. *Problems in measurements of noise indicators for wind turbines in Poland*, Forum Acusticum 2014, Cracow Poland.

26. Debnath M., Iungo G.V., Brewer W.A., Choukulkar A., Delgado R., Gunter S., Lundquist J.K., Schroeder J.L., Wilczak J.M., Wolfe D. *Assessment of virtual towers performed with scanning wind lidars and Ka-band radars during the XPIA experiment*, Atmospheric Measurement Techniques 2017, 10, 1215–1227.
27. Ingielewicz R., Zagubień A. *Infrasound noise of natural sources in environment and infrasound noise of wind turbines*, Polish Journal of Environmental Studies 2014, 23, 1323-1327.
28. Jabben J., Verheijen E. *Options for Assessment and Regulation of Low Frequency Noise*, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control 2012, 31(4), 225-238.
29. Boczar T., Malec T., Wotzka D. *Studies on Infrasound Noise Emitted by Wind Turbines of Large Power*, Acta Physica Polonica A 2012, 122(5), 850-853.
30. Pawlas K. *Wpływ infradźwięków i hałasu o niskich częstotliwościach na człowieka – przegląd piśmiennictwa*, Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy 2009, 2(60), 27–64.
31. van Kamp I., van den Berg F. *Health effects related to wind turbine sound: An update*, International journal of environmental research and public health 2021, 18(17), 9133
32. ISO 7196:1995, Acoustics – Frequency weighting characteristic for infrasound measurements, International Organization for Standardization, Geneva 1995.
33. Zagubień A. *Pozazawodowe narażenie na hałas niskoczęstotliwościowy, analiza na podstawie wybranego środka transportu*, Rocznik Ochrona Środowiska 2016,18, 626-641.
34. ISO 226:2003, Acoustics – Normal equal loudness level contours, International Organization for Standardization, Geneva 2003.
35. Lundquist P. *Classroom noise – Exposure and subjective response among pupils*, Umeå University Sweden 2003.
36. Lundquist P., Holmberg K., Landström U. *Low frequency noise and annoyance in classroom*, J. Low Freq. Noise Vib. Active Control 2000, 19(4), 175-182.
37. Wu S., Peng J., Bi Z. *Chinese Speech Intelligibility in Low Frequency Reverberation and Noise in a Simulated Classroom*, Acta Acust. united Ac 2014, 100, 1067 – 1072.
38. Schmidt J.H., Klokke M. *Health effects related to wind turbine noise exposure: A systematic review* 2014, PLoS ONE 9(12), e114183.
39. McCunney R. J., Mundt K. A., Colby W. D., Dobie R., Kaliski K., Blais M. *Wind Turbines and Health: A Critical Review of the Scientific Literature*, J. Occup. Environ. Med. 2014, 56(11), 108-130.
40. Crichton F., Petrie K. J. *Health complaints and wind turbines: The efficacy of explaining the nocebo response to reduce symptom reporting*, Environ. Res. 2015, 140, 449-455.
41. Leventhall G. *Low frequency noise. what we know, what we do not know, and what we would like to know*, Journal Of Low Frequency Noise, Vibration And Active Control 2009, 28(2), 79-104.
42. Boczar T., Malec T., Wotzka D. *Studies on Infrasound Noise Emitted by Wind Turbines of Large Power*, Acta Phys. Pol., A 2012, 122(5), 850-853.
43. Ingielewicz R., Zagubień A. *Infrasound noise of natural sources in environment and infrasound noise of wind turbines*, Polish Journal of Environmental Studies 2014, 23(4), 1323–1327.
44. Herrmann L., Ratzel U., Bayer O., Krapf KG., Hoffmann M., Blaul J., Mehnert C. *Low-frequency noise incl. infrasound from wind turbines and other sources*, Inter-Noise 2016, 5786-5795.
45. Pedersen E., van den Berg F., Bakker R., Bouma J. *Can road traffic mask sound from wind turbines? Response to wind turbine sound at different levels of road traffic sound*, Energy Policy 2010, 38(5), 2520-2527.
46. Nowacka A., Wygoda M. *Potencjał produkcji energii elektrycznej przez turbinę wiatrową w zależności od lokalizacji i warunków wietrzności*, Górnictwo Odkrywkowe 2015, 56, 71-76.
47. Celik A. *Energy output estimation for small scale wind power generators using Weibull representative wind data*, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 2003, 91, 693–707.
48. Wais P. *Two and three-parameter Weibull distribution in available wind power analysis*, Renew. Energy 2017, 103, 15–29.
49. Hansen J., Mahak M., Tzanakis I. *Numerical modelling and optimization of Vertical Axis Wind Turbine pairs: A scale up approach*, Renew. Energy 2021, 171.

50. Emeksiz C., Cetin T. *In case study: Investigation of tower shadow disturbance and wind shear variations effects on energy production, wind speed and power characteristics*, Sustain. Energy Technol. Assess. 2019, 35, 148–159.
 51. Wharton S., Lundquist J.K. *Assessing atmospheric stability and its impacts on rotor-disk wind characteristics at an onshore wind farm*, Wind Energy 2012, 15, 525–546.
 52. IEC 61400-12-1:2005. Wind Turbines: Part 21-1: Power Performance of Electricity Producing Wind Turbines; IEC: Geneva, Switzerland, 2005.
 53. Evans T, Cooper J. *Comparison of predicted and measured wind farm noise levels and implications for assessments of new Wind Farm*, Acoustics Australia 2012, 40, 28-36.
 54. Prospathopoulos JM, Voutsinas SG. Application of a ray theory model to the prediction of noise emissions from isolated wind turbines and wind parks. Wind Energy 2007, 10, 103-119.
 55. ISO 9613-2:1996. Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors Part 2: General method of calculation. International Organization for Standardization 1996.
 56. ISO 1996-1. Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 1: basis quantities and assessment procedures. Geneva: International Organization for Standardization 2016.
 57. ISO 1996-2. Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 2: determination of environmental noise levels. Geneva: International Organization for Standardization 2017.
 58. Dz. U. 2014 poz. 1542. (2014). Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2014 r. w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów wielkości emisji oraz pomiarów ilości pobieranej wody. Warszawa: Dziennik Ustaw.
 59. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14.06.2007 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku, (Tj, Dz.U. z dnia 22 stycznia 2014 r., poz. 112).
 60. Vestas. Document no. 0062-4192 V01; VESTAS: Copenhagen, Denmark, 2018.
 61. Vestas. Document no. 0062-4191 V04; VESTAS: Copenhagen, Denmark, 2017.
 62. GE. Commercial Documentation Wind Turbine Generator Systems GE 2.5—100 m Rotor 50 Hz & 60 Hz; GE: Fairfield, Connecticut, USA, 2010.
 63. W2E. General Description W2E-100/2.5; W2E: Rostock, German, 2008.
 64. Enercon. Document no. SIAS-04-SPL E-82 E2 OM I 2,3MW; Enercon: Berlin, German, 2010.
 65. Gamesa. Document no. GD086484; Gamesa: Zamudio, Spain, 2010.
 66. Zagubień A., Wolniewicz K. *Every Exposure to Occupational/Non-Occupational Infrasound Noise In Our Life*, Archives of Acoustics 2016, 41(4), 659-668.
-

**KOPIE OPUBLIKOWANYCH ARTYKUŁÓW NAUKOWYCH
STANOWIĄCY ROZPRAWĘ DOKTORSKĄ
WRAZ Z OŚWIADCZENIAMI AUTORÓW**

**OŚWIADCZENIE AUTORÓW O WKŁADZIE W POWSTANIE PUBLIKACJI
NAUKOWEJ – ZI**

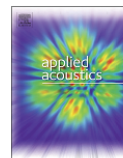
Zagubień A., Wolniewicz K.: The impact of supporting tower on wind turbine noise emission, Applied Acoustics, Vol. 155(2019), p. 260-270;
DOI: 10.1016/j.apacoust.2019.05.032

Współautor	Udział procentowy	Indywidualny wkład współautora	Podpis
Adam Zagubień	50%	Koncepcja badawcza; nadzór nad realizacją badań; zapewnienie materiałów badawczych i oprzyrządowania; analiza formalna wyników badań; korekta artykułu	<i>A. Zagubień</i>
Katarzyna Wolniewicz	50%	Koncepcja badawcza; przeprowadzenie badań; wizualizacja danych; przygotowanie i redakcja tekstu	<i>Katarzyna Wolniewicz</i>



Contents lists available at ScienceDirect

Applied Acoustics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/apacoust

The impact of supporting tower on wind turbine noise emission

Adam Zagubień*, Katarzyna Wolniewicz

Koszalin University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Environmental and Geodetic Sciences, Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin, Poland



ARTICLE INFO

Article history:

Received 15 July 2018
 Received in revised form 19 March 2019
 Accepted 31 May 2019

Keywords:

Noise propagation
 Impact on environment
 Wind turbine
 Noise measurements
 Lattice tower

ABSTRACT

The exploitation of a wind farm has a minor effect on the environment, however wind turbines generate noise, which is the negative side effect of their work. This article points out significant differences in the results of infrasound and acoustic noise measurements, registered near wind farms depending on the type of supporting structure of a turbine. There are presented measurements' results registered near wind turbines of different supporting structures (lattice or tubular) and different heights. There are not many wind turbines in Europe with lattice towers. The analysis below is a valuable source of information on the impact of lattice towers' turbines on acoustic environment. Local, infrasound and acoustic measurements near chosen wind turbines enabled to make comparisons and draw conclusions. It has been noticed that high wind turbines with lattice towers emit much lower levels of acoustic noise that those with tubular towers.

© 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Development of wind energy is undeniably connected with the negative impact of noise emitted during work of wind turbines (hereinafter referred to as WT) on environment. Therefore each planned wind farm localization should be assessed regarding the noise impact on environment. Sounds registered around WT are within wide frequency range of 0.1 Hz to 16,000 Hz: infrasound (0.1–20 Hz), low frequency noise (up to 200 Hz) and acoustic noise (up to 16,000 Hz) [1,2]. The level of acoustic power of available turbines in the market is varied, what is more, it also changes during operation depending on wind speed [1,3]. While planning a wind farm consisting of many WT, we should mind the localization that considers the right distance from acoustically protected areas (residential areas), so that there is no exceeding in sound levels causing acoustic discomfort. This level is described as permissible sound level in the environment. Certain countries estimate their own permissible levels taking into consideration, among other things, WHO guidelines [4]. WHO guidelines indicate, that such non-irritating, acoustic noise level in the environment for most people is about 40 dB. Considering the fact that human active hours are during the day, the level of 40 dB regards night time, the time when we are resting. The quality of natural environment influences the comfort of life, especially the comfort of relaxation of inhabitants of both big cities and small villages. Sample permissible noise levels defined by L_{Aeq} (equivalent sound level)

in various countries are presented in Table 1. After setting the farm in motion there are local measurements conducted at closest acoustically protected areas around the farm and on the basis of the results there can be made the assessment of the risk to the environment.

The aim of this study is to point the differences in noise emission of wind turbines of high power depending on the type of their support construction. There have been chosen 3 comparison criteria: G-weighted infrasound emission in the range of 1 to 100 Hz, A-weighted sound pressure level in the range of 20–16,000 Hz and linear, non-weighted noise emission in the range of 1 to 100 Hz. The study proves that using short phrases like “a wind farm of XX MW” or “a wind turbine of XX MW” in terms of describing a noise source is not enough. It is always necessary to give the parameters of wind turbines installed on a described wind farm in a form of: acoustic power, the rotor diameter, the height of the tower and the type of supporting construction. There are not many wind turbines in Europe with lattice towers. The analysis below is a valuable source of information on the impact of lattice towers' turbines on acoustic environment. The acoustic power level of wind turbine depends on wind speed. It is maintained that wind speed increases together with higher ground level [5]. However, it does not always happen. Increasing wind speed depends on many factors such as: landform, changes in temperature and atmospheric pressure and relative air humidity [6–8]. The ideal wind profile for WT noise measurements is the vertical profile of wind speed increase marked by the letter M, presented in Fig. 1. Then, the wind does not disturb the measurements (wind speed less than 5 m/s) and in the same time many types of wind turbines work at

* Corresponding author.

E-mail address: adam.zagubien@tu.koszalin.pl (A. Zagubień).

Table 1
Sample permissible noise levels.

Country	Permissible level for agricultural buildings L_{Aeq}	
	Day	Night
Poland	55	45
Finland	45	40
Belgium (Flanders)	48	43
Belgium (Wallonia)	45	45
Canada (Alberta)	50	40
Germany	60	45
USA (Georgia)	55	55
USA (Minnesota)	50	50
USA (Wisconsin)	50	45
USA (Wyoming)	50	50

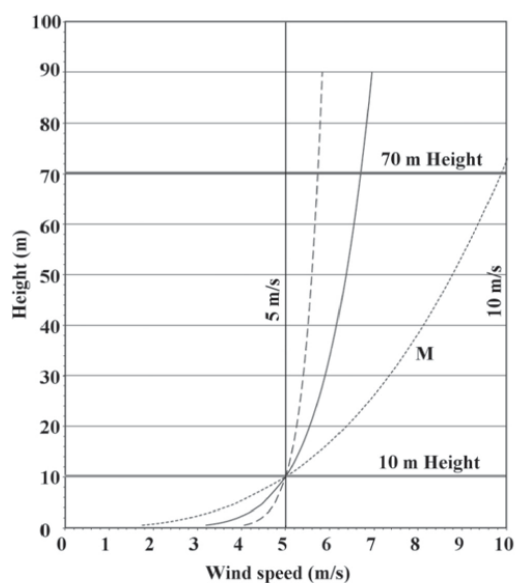


Fig. 1. Wind speed profiles with equal speed of 5 m/s at 10 m height above ground level.

maximum acoustic power (wind speed more than 10 m/s at the height of 80 m). This relation has been noticed while carrying out many measurements near land wind farms [9].

Noise emission connected with interaction, air and the WT blade, is one of several point sources of a wind turbine as a whole. Besides, there is also a mechanical noise connected with the work of devices inside the nacelle [3]. In the case of analyses done for turbines higher than 80 m, the dominant source is aerodynamic noise related to emission dependent on a rotor blade construction. Rapid pressure changes may occur during movement of the rotor blade close to the turbine tower. A very important factor which has influence on the value of measured noise emitted by a wind turbine in a certain measurement point is the acoustic background. The higher the wind speed, the higher the level of acoustic background at the height of measurement points [10]. The specificity of acoustic and non-acoustic phenomena that take place during WT work, has been described in many publications [3,9,11–13]. The safe exploitation of a technical object like a wind turbine is connected not only with the endurance of the main structure and the reliability of a turbine but also with the minimization of the

negative impact on the environment. The article focuses on the impact of WT support construction on noise emitted to the environment.

Because the wind speed increases together with the height above the ground level, the owners of wind farms aim for building objects high enough to get the optimal productivity. Nowadays, there are advanced techniques of measuring wind speed and fine methods of wind forecast [14]. At areas of less windiness, when annual average wind speed is less than 7 m/s, there are built turbines which are more than 100 m high. Minding technical capabilities of making a tubular tower, not so long ago, there were built steel towers or rarer concrete towers of the maximum height of 120 m, Fig. 2. Now, hybrid technology is very often applied. It means that the lower part of the tower is a concrete tube and the higher part is a steel tube. There is also an alternative solution, applied occasionally, which is making a tower construction in a form of spatial lattice. There are lattice towers of wind turbines which are of the height of up to 160 m above the ground level Fig. 3. Regarding the wind turbine impact on acoustic environment, setting the noise source higher, increases the distance from the protected place. Thanks to a longer way of propagation of the acoustic wave in the air, smaller acoustic energy reaches the control point. This dependency has a slight meaning in the case of infrasound emission. Infrasound is weakly suppressed by air and it spreads to long distances [15–17].

The higher the WT tower, the bigger the diameter of the rotor. Twenty years ago, there were applied WT rotors of a diameter of 80 m. Nowadays, it is common to apply diameters of more than 100 m [18]. Rotors usually consist of 3 blades and they work by setting on the wind – Figs. 2 i, 3. Most modern WT are upwind type. Setting the rotor on the wind causes bending the blades towards WT tower. The longer the blade the more it bends because of the larger working surface subjected to wind load. To avoid the collision of blades with the turbine tower during strong winds, rotors of large diameters (more than 110 m) are set at a wider angle to the vertical than rotors of diameters to 100 m. Then, the endings of longer blades move at a longer distance from the tower. Such setting has a beneficial influence on noise emission. It eliminates rapid changes of acoustic pressure caused by blades moving close to tubular tower of a wind turbine. This phenomena has no much meaning in the case of turbines of lattice tower.



Fig. 2. Analyzed turbine with a tubular tower.



Fig. 3. Analyzed turbine with a lattice tower.

2. Methodology

2.1. Case study presentation

There were studied 3 types of towers of wind turbines of 2.0–3.0 MW but of similar acoustic power from 105 to 106 dB. The three wind farms were located at the flat, agricultural area. For the analysis, there were chosen following turbines: one with steel, tubular tower of 80 m with the rotor diameter of 80 m (marked AWT) and the other one with the tower of 120 m with the rotor diameter of 116 m (marked BWT). The third wind turbine which was analyzed had a rotor diameter of 110 m and a lattice tower of 160 m (marked CWT) While choosing types of wind turbines with tubular towers, the main criteria was the universality of a certain type of a turbine. In the case of the lattice tower, there has been chosen simply the closest one available for study, located in Poland. It should be highlighted that in Europe there are only a few wind farms of high power with turbines with lattice towers.

2.2. Measurement procedure

During measurements, the average wind speed was estimated at the height of 3.5 m above the ground level. This speed could not be more than 5 m/s. In the same time it was checked that the wind speed registered at the nacelle of the turbine does not exceed 9 m/s. The two conditions guaranteed minimizing the impact of acoustic background on measured noise parameters and close to maximal WT emission. In cases of lack of information about the wind speed at the height of the WT nacelle, it is possible to estimate it by counting the number of rotor revolutions per minute. In WT catalogue data we can often find the graph of relation between the rotor speed and the wind speed. Studied wind tur-

bines reach maximum acoustic power when the wind speed at the height of the nacelle is at least 10 m/s. The measurement height (placing the microphone) was at 1.5 m above the ground level. This is the average height of human ear moving in the area. The measurements at each farm were conducted in control points located 50 m (P1) and 250 m (P2) from the tower of the outermost wind turbine at the open area. The measurement in the open area, without buildings or high trees, enabled to eliminate the influence of such objects on measured noise parameters. The location of the points depended on the wind direction – it was chosen so that the wind blew from the wind farm towards control points – Fig. 4. The analyzed WT are upwind type.

While conducting measurements all specific phenomena connected with a wind turbine operation, which may have impact on noise, were taken into consideration. Samples with clearly audible disturbances like flying airplanes, passing trains or cars, or nature sounds like barking dogs, were eliminated. The results of noise measurements were estimated on the basis of 3 to 5 non-disturbed, measurement samples in each point. Time of measurement of a single sample was 60 s. Samples with disturbances were eliminated. There were two types of noise measurements made on each farm. First was a continuous measurement in certain time – A-weighted [19], G-weighted [20]. The second was third octave band analyses. The result of third octave band analyses was the picture of noise spectrum and the A-weighted, G-weighted and non-weighted value of the equivalent sound level during measurement. After measurements the wind turbine was stopped and the acoustic background was measured at the same points and at similar atmospheric conditions. When it was impossible to stop the wind turbine (CWT), the measurement of acoustic background was made 5 km from the wind farm.

The sound pressure level L_p is defined as

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{P^2}{P_0^2} \right) \quad (1)$$

where P is the RMS value of the sound pressure and P_0 is a reference value of 2×10^{-5} Pa.

An equivalent sound pressure level $L_{eq,T}$ is the value of a continuous steady sound that, within the specified time interval (T) has the same mean square sound pressure level as the sound under consideration which varies with time [21].

$$L_{eq,T} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{P^2}{P_0^2} dt \right) \quad (2)$$

During acoustic noise measurements, P was just the value corrected by the curve A, while during infrasound noise measurement P was the value corrected by the curve G.

Local measurements of noise of wind turbines in chosen control points are conducted by various researchers in a similar way. Generally they measure the equivalent level of sound L_{Aeq} or levels L_{A90} , L_{A50} , L_{A10} , depending on recommended measurement procedures and assessment criteria valid in a certain country.

Measurements on chosen wind farms were conducted at following meteorological conditions: the temperature 5–15 °C, humidity 60–80%, pressure 980–1020 hPa and wind speed at the height of measurement point 3.5–5.0 m/s. The measurements were made by digital sound analyzer class 1 SVAN 912AE with wind protector. It enabled simultaneous measurement of most parameters characterizing noise. There was used a certified microphone (SV 02/C4L) of linear characteristics of 0.4 Hz to 16,000 Hz frequency. Before and after measurements, the measurement trajectory and sound analyzer were checked by class 1 calibrator. The whole equipment had valid calibration certificates.

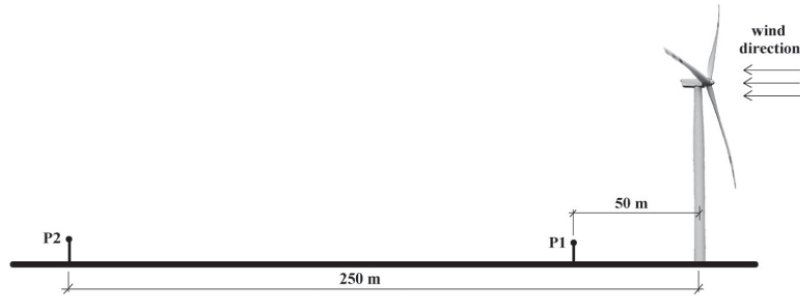


Fig. 4. Location of the measurement points during research.

3. Results and discussions

The aim of conducted measurements was to answer the question if there are any differences in measured values of chosen noise indicators depending on height and type of WT construction according to chosen assessment criteria. It was essential to assess the impact of studied object on the environment. The results of measurements were not compared to permissible levels. Marking in pictures AWT50, BWT50 and CWT50 apply to the measurement made in 50 m distance from WT, while markings AWT250, BWT250 and CWT250 apply to the measurement made 250 m from the WT.

3.1. Infrasound noise

The result of each measurement is always the resultant of noise of the studied source and acoustic background. It is connected with such phenomena as gusts of wind which depends on measurement point location and its surrounding. Regarding the infrasound characteristics the measurement result, in many cases, considers also the influence of other unidentified sources [15,17,22].

Pictures Figs. 5–7 present timings of changes of G-weighted sound pressure levels SPL and indicate the value of the equivalent sound level L_{Ceq} . Presented diagrams show significant changes in

momentary value SPL within infrasound range. There can be also observed various – depending on the WT type – connections between measured level of the signal and the distance. For the turbine of 80 m (AWT) the level of infrasound near WT is definitely higher than the one registered at the distance of 250 m. In the case of WT of 120 m (BWT) levels registered at distances 50 and 250 m from the tower are similar. Above correlations have been observed during measurements on many other wind farms [23]. Registered SPL changes for the turbine with the lattice tower of 160 m (CWT) show that infrasound near the tower is lower than infrasound registered at the distance of 250 m Fig. 8.

Dependencies between measured infrasound levels, distances and types of WT towers described above are proved by three bend analyses.

At the distance of 250 m from the WT G-weighted infrasound noise for all studied objects was similar and it oscillated around 80 dB. At the distance of 50 m from the WT the lowest level of infrasound noise was registered near the wind turbine on the lattice tower. It was 70 dB which was close to acoustic background level.

The results of equivalent sound level within infrasound range L_{Ceq} are presented in Table 2.

All results of measurements presented in Table 2 unambiguously show that the G-weighted equivalent infrasound noise level

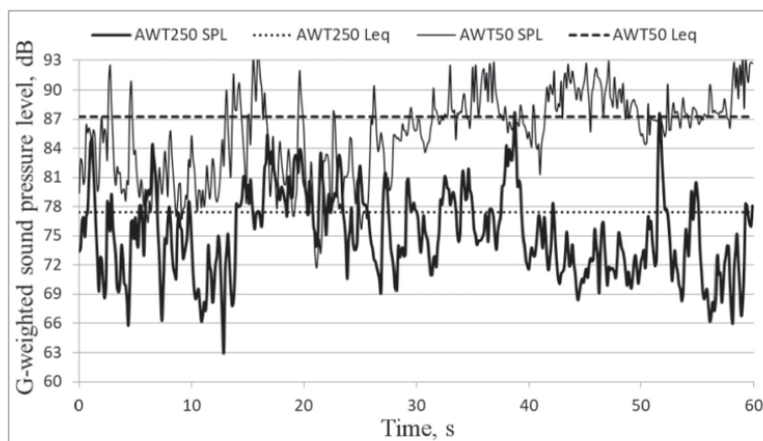


Fig. 5. Sample fluctuations of sound pressure level nearby turbine AWT.

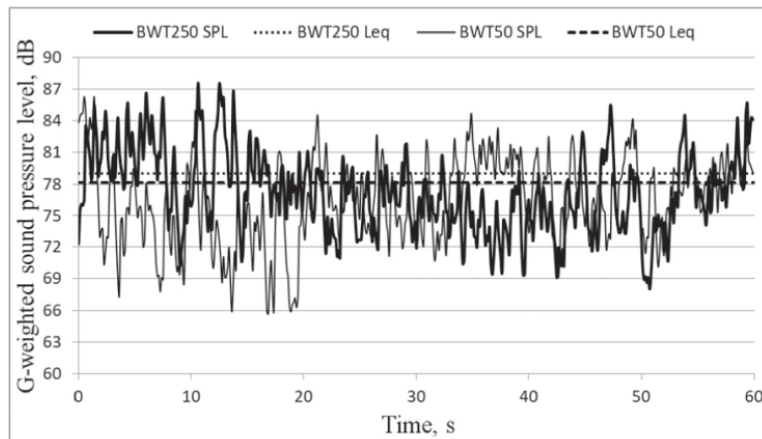


Fig. 6. Sample fluctuations of sound pressure level nearby turbine BWT.

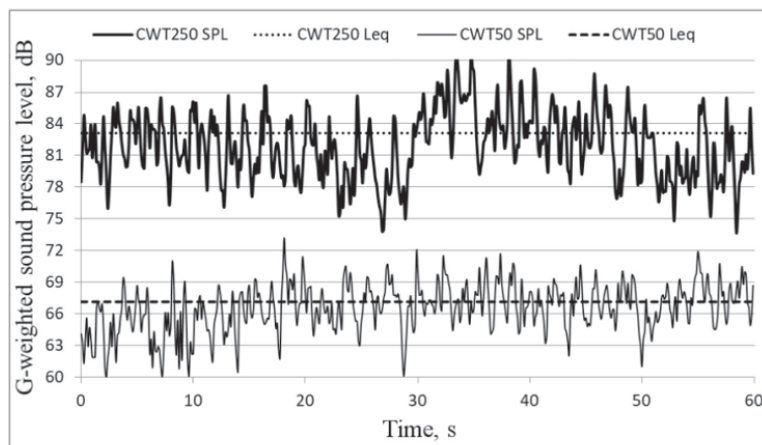


Fig. 7. Sample fluctuations of sound pressure level nearby turbine CWT.

registered near WT, measured together with acoustic background and other non-identified sources, did not exceed 90 dB. Measured values are at the edge of threshold of infrasound audibility by human ear or below this threshold. Minding the characteristics of infrasound noise (long wave, spreading to big lengths, smaller attenuation on obstacles) the result of the measurement, in many cases, takes into account the influence of other non-identified sources of infrasound noise.

If levels of acoustic pressure are high enough, infrasound is detected by ear and vestibular system. The lower the frequency of infrasound the higher the limits of audibility of infrasound, e.g. for frequency 6–8 Hz it is about 100 dB, for frequency 12–16 Hz it is about 90 dB. Moreover, besides a specific auditory way, infrasound are detected by sensory receptors responsible for sensing vibrations which are placed all over the body. It is estimated that such perception levels are of 20–30 dB higher than audible levels. So far, none of governments in any country have decided to establish permissible levels of infrasound noise in nat-

ural environment. Some kind of exception are Danish criteria. They concern infrasound registered in housing apartments and classrooms but infrasound coming from outside sources [24]. Danish indicator of permissible level of infrasound noise inside premises, was set at the human perception level and it is $L_{Geq} = 85$ dB.

In the range of frequency of 1–100 Hz, in Figs. 9–14 non-weighted third octave band spectra has been presented. Particular bands present average value received from 3 to 5 measurements with minimum and maximum value marked for each band. Figures also show hearing threshold lines [25,26].

Presented non-weighted, third octave band analyzes indicate that hearing threshold level is exceeded for all studied WT above the band of 25 Hz. All non-weighted measurements results conducted at the distance of 250 m from WT indicate the possibility of low frequency noise. This research does not consider permissible levels exceeding and such exceeding are not suggested. It was pointed out that researchers interest should focus on low frequency noise, above 25 Hz.

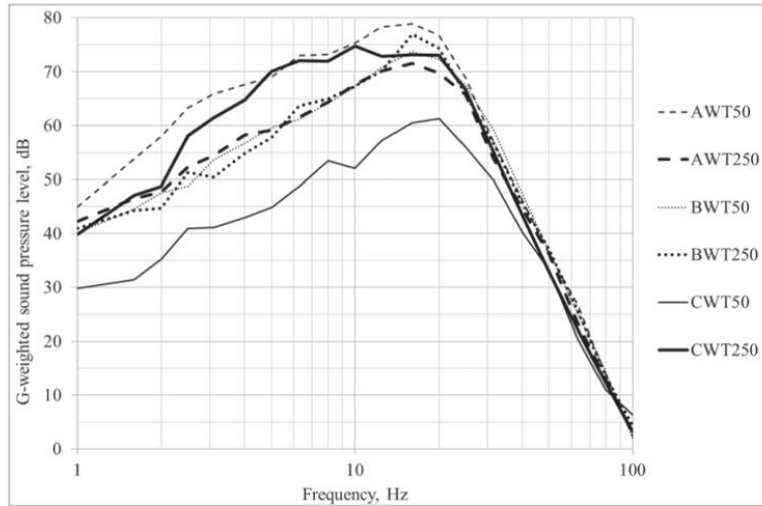


Fig. 8. Sample third-octave spectra of infrasound noise.

Table 2
Specification of measured values of infrasound noise.

Type of WT	Measurement at the distance of 50 m (P1) from WT	Measurement at the distance of 250 m (P2) from WT	Acoustic background [dB]
	L_{Geq} [dB]	L_{Geq} [dB]	
AWT	84.7 – 87.1	77.0 – 79.1	67.1 – 69.8
BWT	78.4 – 80.1	78.7 – 80.2	66.8 – 69.5
CWT	66.1 – 67.9	80.9 – 83.3	65.9 – 68.4

3.2. Acoustic noise

During measurements of acoustic noise, there can be observed various (depending on the type of turbine) connections between the measured level of the signal and the distance. Pictures Figs. 15–17 present timings of changes of A-weighted sound pressure levels SPL and indicate the value of the equivalent sound level L_{Aeq} . Presented diagrams show significant changes in momentary value SPL measured at turbines AWT. Fluctuations of A-weighted sound pressure levels at the distance of 50 m from AWT reach 11 dB (within 60 s) and then one by one drop to 6 dB. Similar fluctuations

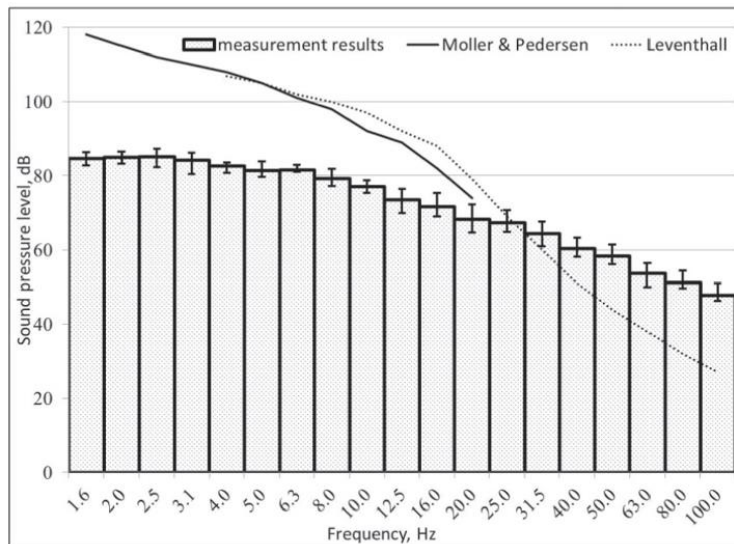


Fig. 9. Third-octave spectrum of low frequency noise measured at the distance of 50 m from AWT.

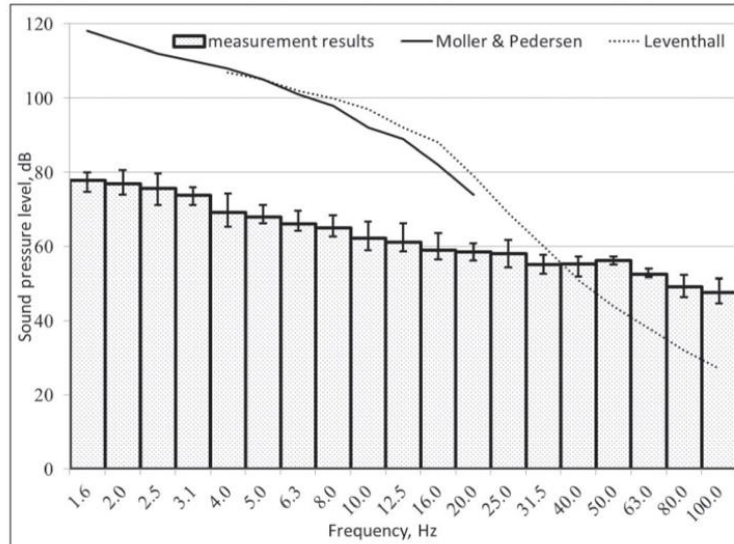


Fig. 10. Third-octave spectrum of low frequency noise measured at the distance of 250 m from AWT.

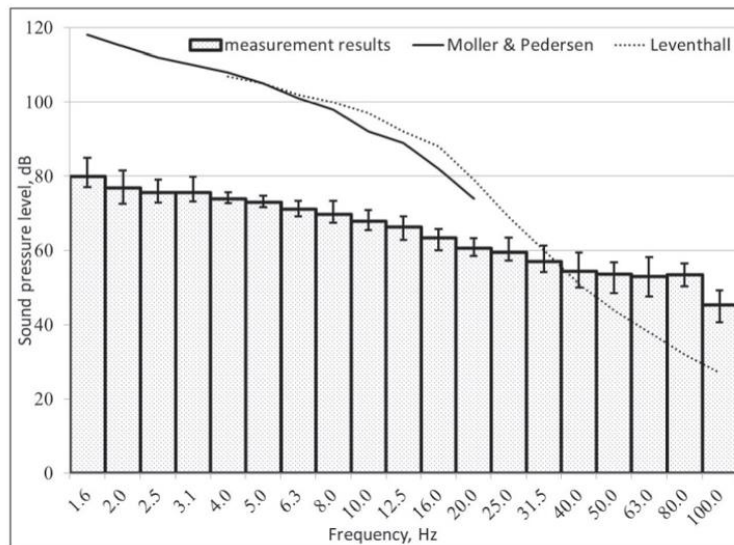


Fig. 11. Third-octave spectrum of low frequency noise measured at the distance of 50 m from BWT.

of acoustic pressure near WT which are not higher than 100 m were also registered by other researchers [27,28] Fig. 18.

At the distance of 250 m from AWT, acoustic pressure fluctuations tend to decrease and they are maximum 8 dB in 60 s, but adjacent values do not exceed 5 dB.

During measurements near turbines BWT it has been noticed that at the distance of 50 m from the tower, fluctuations of acoustic pressure are 3 dB. They are lower than the ones at the distance of 250 m, where in 60 s there were registered fluctuations up to 7 dB, but adjacent values do not exceed 3 dB.

Fluctuations of acoustic pressure near lattice towers turbines CWT are the smallest of all measured ones. Independently from the distance from the WT tower, acoustic pressure fluctuations (within 60 s) do not exceed 5 dB, but adjacent values do not exceed 3 dB.

Many researchers studying the impact of noise on human health point out [28–30] that the annoyance, caused by acoustic noise of values not exceeding permissible levels in environment, arise when acoustic pressure changes in a short time are bigger than ± 2 dB and when they exceed the level of acoustic pressure

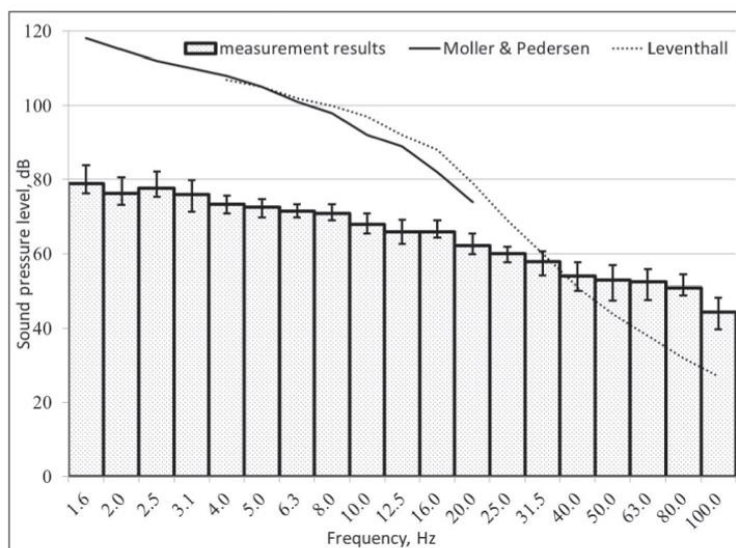


Fig. 12. Third-octave spectrum of low frequency noise measured at the distance of 250 m from BWT.

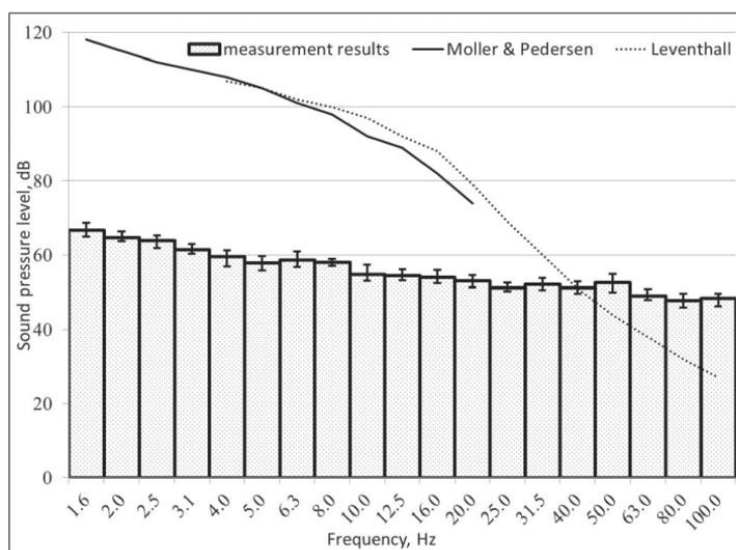


Fig. 13. Third-octave spectrum of low frequency noise measured at the distance of 50 m from CWT.

by 3 dB. On the basis of conducted research, it can be assumed that at the distance of 250 m, wind turbines with lattice towers of 160 m will not cause ear annoyance.

Generally, fluctuations of changes of acoustic pressure in time are much bigger in infrasound range than in acoustic range. In taken infrasound noise samples, within 60 s maximum changes of acoustic pressure level reached 20 dB independently from the distance of measurement point from WT, while for acoustic noise

they did not exceed 11 dB near WT and 7 dB at the distance of 250 m from WT.

Equivalent sound level values estimated for timings and three bend analyses show that the highest L_{Aeq} levels were registered near WT of 80 m (AWT), and the lowest ones near turbines of lattice towers of 160 m (CWT). When the distance between the measurement point and the source of acoustic noise increases there are registered lower values of equivalent sound level [31–34].

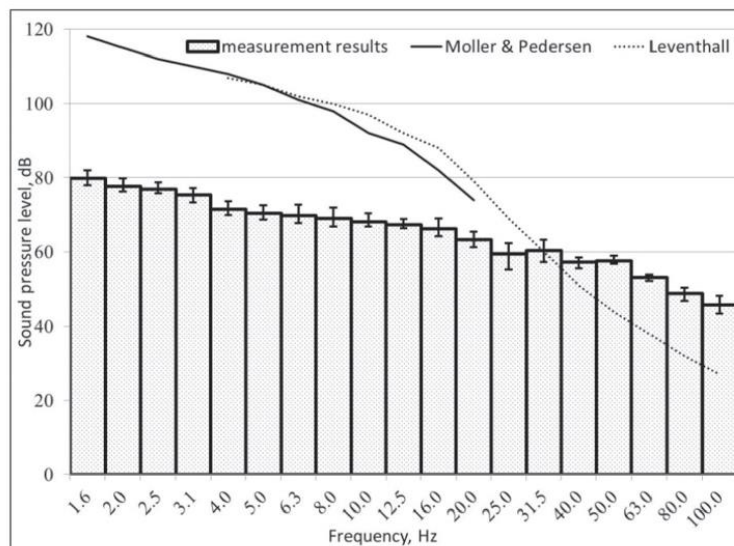


Fig. 14. Third-octave spectrum of low frequency noise measured at the distance of 250 m from CWT.

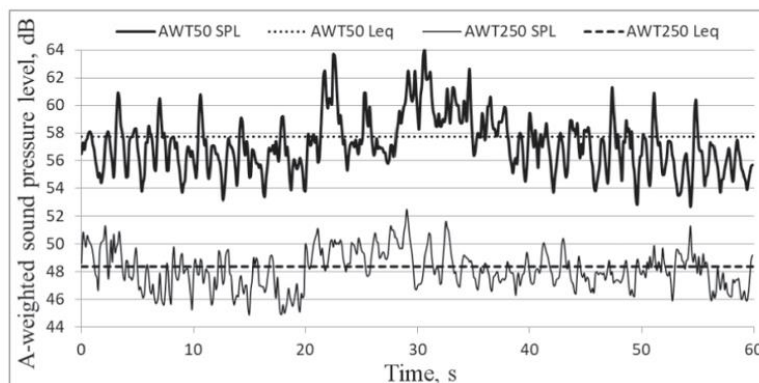


Fig. 15. Sample fluctuations of sound pressure level nearby turbine AWT.

The results of equivalent sound level L_{Aeq} registered during three bend analyses are presented in Table 3.

4. Conclusions

Field measurements of infrasound and acoustic noise conducted near chosen WT, have enabled to make comparisons and draw following conclusions:

1. For analyzed WT, audible noise registered near turbines with lattice towers was about 10 dB lower than the noise near wind turbines with tubular towers. At the distance of 250 m from the lattice tower, the turbine noise is undistinguishable from acoustic background.
2. Near WT with a lattice tower, there are no rapid changes of acoustic pressure connected with the blades movement close to the tower. This phenomenon is clearly audible near the WT on a tubular tower of maximum 100 m.

3. Lower levels of infrasound and acoustic noise near turbines with lattice towers are smaller threat to the environment. While taking measurements, there could be noticed wild animals preying on the wind farm field which proves that fact. For 20 years of measurements on various wind farms, there have not been noticed so many animals even on one of them. Animals on a wind farms could be observed only during their migration.
4. Lower levels of noise near turbines with lattice towers are also a smaller threat to farmers cultivating the land on wind farms.

Regarding non-acoustic issues, it is worth taking into consideration the impact of WT types on landscape. Lattice towers of wind turbines observed from long distances look like energy poles. They have been a part of landscape for many decades, thus focusing less attention of an observer. Human noise reception is subjective; this means that visual impressions also have influence on noise acceptance.

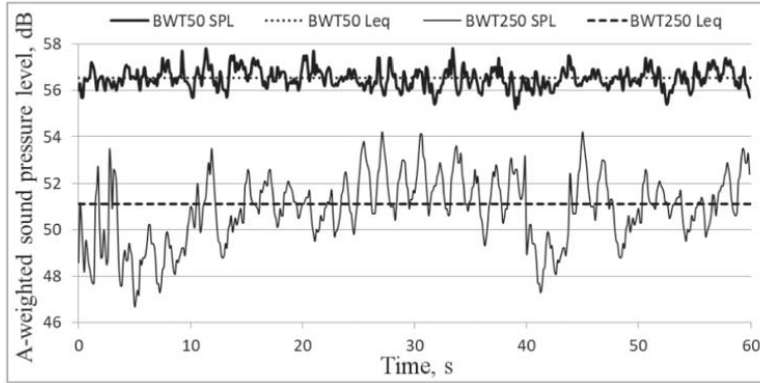


Fig. 16. Sample fluctuations of sound pressure level nearby turbine BWT.

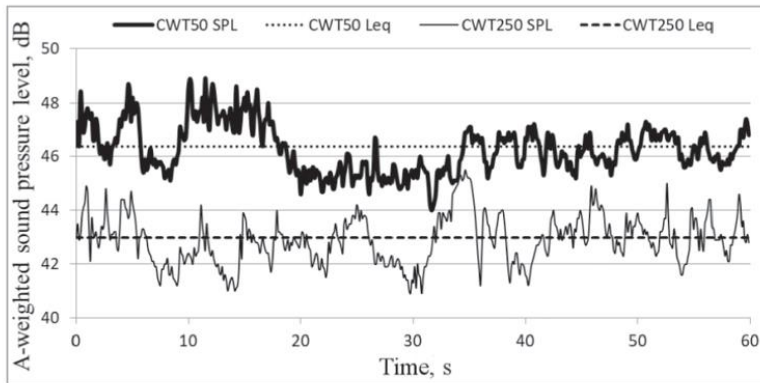


Fig. 17. Sample fluctuations of sound pressure level nearby turbine CWT.

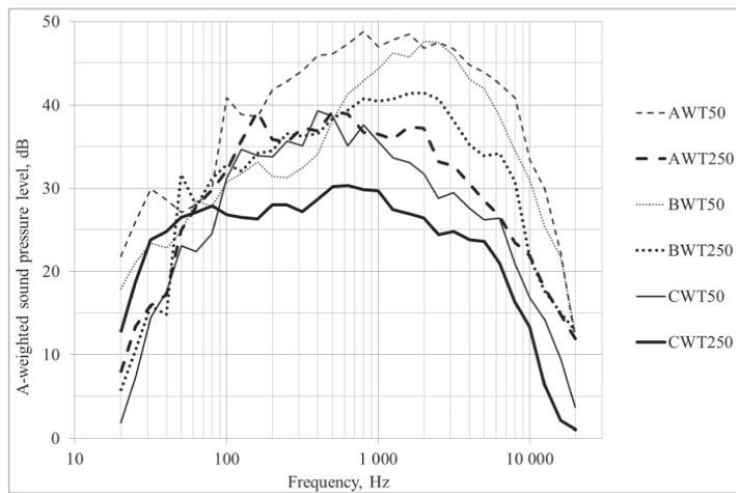


Fig. 18. Sample third-octave spectra of acoustic noise.

Table 3
Measured values of acoustic noise.

Type	Measurement at the distance 50 m (P1) from WT	Measurement at the distance 250 m (P2) from WT	Acoustic background
	L_{Aeq} [dB]	L_{Aeq} [dB]	[dB]
AWT	57.9 – 59.4	48.3 – 49.0	40.7 – 41.8
BWT	56.4 – 57.7	50.1 – 51.6	40.0 – 41.2
CWT	46.3 – 47.4	41.1 – 42.6	39.9 – 41.0

Minding the results of conducted measurements it seems justified to use lattice towers of more than 120 m. In European climate, using high towers also allows to use wind resources economically and to situate wind farms in areas of lower windiness.

Impact of WT on the environment should always be assessed for the specific location of the wind farm, consisting of accurately described devices. The results of measurements conducted for 3 different types of WT towers (of similar acoustic power) indicate significant differences in the impact on acoustic environment. It has been proved in this article that wind turbines with lattice towers have less impact on acoustic environment than wind turbines with tubular towers. This fact does not allow us though, to neglect the duty to monitor the dangers - we learn to take the responsibility for the natural environment all life!

References

- [1] Burton T, Sharoe D, Jenkins N, Bossanyi E. *Wind energy handbook*. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd; 2001.
- [2] Kurpas D, Mroczek B, Karakiewicz B, Kassolik K, Andrzejewski W. Health impact of wind farms. *Ann Agric Environ Med* 2013;20(3):595–605.
- [3] Liu WY. A review on wind turbine noise mechanism and de-noising techniques. *Renew Energy* 2017;108:311–20.
- [4] Regional WHO. Office for Europe. Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe. Copenhagen: World Health Organization; 2011.
- [5] Van den Berg GP. Effects of the wind profile at night on W/T sound. *J Sound Vib* 2004;277:955–70.
- [6] Kariniotakis G. *Renewable energy forecasting - from models to applications*. United Kingdom: Woodhead Publishing Elsevier; 2017.
- [7] Van den Berg GP. Wind turbine power and sound in relation to atmospheric stability. *Wind Energy* 2008;11:151–69.
- [8] Wharton S, Lundquist JK. Assessing atmospheric stability and its impacts on rotor-disk wind characteristics at an onshore wind farm. *Wind Energy* 2012;15:525–46.
- [9] Ingiełewicz R, Zagubień A. Problems of assessment of wind farm noise on the basis of local control measurements. *Rocznik Ochrona Srodowiska* 2016;18:531–49.
- [10] Kaldellis JK, Garakis K, Kapsali M. Noise impact assessment on the basis of onsite acoustic noise immission measurements for a representative wind farm. *Renew Energy* 2012;41:306–14.
- [11] Bullmore A, Adcock J, Jiggins M, Cand M. Wind farm noise predictions and comparison with measurements. Proceedings of the third international meeting on wind turbine noise, 2009. Denmark: Aalborg.
- [12] Tonin R. Sources of wind turbine noise and sound propagation. *Acoust Australia* 2012;40:20–7.
- [13] Wszolek T, Kaczyński M. Problems in measurements of noise indicators for wind turbines in Poland. *Forum Acusticum, Poland: Cracow* 2014.
- [14] Debnath M, Iungo GV, Brewer WA, Choukulkar A, Delgado R, Gunter S, et al. Assessment of virtual towers performed with scanning wind lidars and K-band radars during the XPIA experiment. *Atmos Meas Tech* 2017;10:1215–27.
- [15] Ingiełewicz R, Zagubień A. Infrasound noise of natural sources in environment and infrasound noise of wind turbines. *Polish J Environ Stud* 2014;23:1323–7.
- [16] Jabben J, Verheijen E. Options for assessment and regulation of low frequency noise. *J Low Frequency Noise, Vib Active Control* 2012;31(4):225–38.
- [17] Boczar T, Malec T, Wotzka D. Studies on infrasound noise emitted by wind turbines of large power. *Acta Phys Pol A* 2012;122(5):850–3.
- [18] Thresher R, Robinson M, Veers P. Wind energy technology: current status and R&D future. Presented at the physics of sustainable energy conference university of california at Berkeley, 2008. USA.
- [19] IEC 61672-1:2013. *Electroacoustics – sound level meters – Part 1: specifications*. International Electrotechnical Commission; 2013.
- [20] ISO 7196:1995. *Acoustics – frequency weighting characteristic for infrasound measurements*. Geneva: International Organization for Standardization; 1995.
- [21] International Energy Agency. *Recommended practice for wind turbine testing 4. Acoustics – measurements of noise emission from wind turbines, Third Edition* 1994.
- [22] Ministry of the Environment. *Noise guidelines for wind farms, Interpretation for applying MOE NPC Publications to Wind Power Generation Facilities*. Ontario: Ministry of the Environment Canada; 2008.
- [23] Ingiełewicz R, Zagubień A. The infrasound noise measurement emitted by wind farm. *Meas Autom Monit* 2013;59(7):725–7.
- [24] Jacobsen J. Danish guidelines on environmental low frequency noise, infrasound and vibration. *J Low Freq. Noise, Vib Active Control* 2001;20(3):141–8.
- [25] Moller H, Pedersen CS. Hearing at low and infrasonic frequencies. *Noise Health* 2004;6(23):37–57.
- [26] Leventhall G. Review What is infrasound? *Prog Biophys Mol Biol* 2007;93:130–7.
- [27] Schäffer B, Schlittmeier SJ, Pieren R, Heutschi K, Brink M, Graf R, et al. Short-term annoyance reactions to stationary and time-varying wind turbine and road traffic noise: a laboratory study. *J Acoust Soc Am* 2016;139:2949–63.
- [28] Seong Y, Lee S, Gwak D, Cho Y, Hong J, Lee S. An experimental study on annoyance scale for assessment of wind turbine noise. *J Renew Sustain Energy* 2013;5:52008-1–6.
- [29] De Coensel B, Botteldooren D. The quiet rural soundscape, and how to characterize it. *Acta Acust United Acust* 2006;92:887–97.
- [30] Bockstael A, Dekoninck L, Can A, Oldoni D, De Coensel B, Botteldooren D. Reduction of wind turbine noise annoyance: an operational approach. *Acta Acust United Acust* 2012;98:392–401.
- [31] Katinas V, Marčiukaitis M, Tamašauskienė M. Analysis of the wind turbine noise emissions and impact on the environment. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;58:825–31.
- [32] Zagubień A, Ingiełewicz R. The analysis of similarity of calculation results and local measurements of wind farm noise. *Measurement* 2017;106:211–20.
- [33] Iannace G. Effects of noise from wind turbines inside home. *Wind Eng* 2016;40:25–30.
- [34] Hessler G, Leventhall G, Schomer P, Walker B. Health effects from wind turbine low frequency noise & infrasound: Do wind turbines make people sick? That is the issue 50th ANNIVERSARY ISSUE. *Sound Vib* 2017:34–44.

**OŚWIADCZENIE AUTORÓW O WKŁADZIE W POWSTANIE PUBLIKACJI
NAUKOWEJ – Z2**

Zagubień A., Wolniewicz K.: The Assessment of Infrasound and Low Frequency Noise Impact on the Results of Learning in Primary School – Case Study, Archives of Acoustics, Vol. 45(1), 2020, pp. 93 – 102;
DOI: 10.24425/aoa.2020.132485

Współautor	Udział procentowy	Indywidualny wkład współautora	Podpis
Adam Zagubień	50%	Koncepcja badawcza; nadzór nad realizacją badań; zapewnienie materiałów badawczych i oprzyrządowania; analiza formalna wyników badań; korekta artykułu	<i>A. Zagubień</i>
Katarzyna Wolniewicz	50%	Koncepcja badawcza; przeprowadzenie badań; wizualizacja danych; przygotowanie i redakcja tekstu	<i>Katarzyna Wolniewicz</i>

Research Paper

The Assessment of Infrasound and Low Frequency Noise Impact
on the Results of Learning in Primary School – Case Study

Adam ZAGUBIEŃ*, Katarzyna WOLNIEWICZ

Koszalin University of Technology
Faculty of Civil Engineering, Environmental and Geodetic Sciences
Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin, Poland

*Corresponding Author e-mail: adam.zagubien@tu.koszalin.pl

(received March 26, 2019; accepted October 3, 2019)

The aim of the research was to determine the occurrence of possible, significant levels of infrasound and low frequency noise both in classrooms and around the primary school. Two sources of noise during research were significant: traffic on the national road and a wind farm, located near the school building. So far, few studies have been published regarding the impact of low-frequency, environmental noise from communication routes. The identification of hazards in a form of estimated noise levels resulted in preliminary information whether the location of the school near the road with significant traffic and the nearby wind farm can cause nuisance to children. There have been determined the criteria for assessing infrasound and low frequency noise. There have been made third octave band analyses of noise spectrum and the essential noise indicators were calculated. The results of learning in that school were thoroughly analysed for a long period of time and they were compared to the results obtained in other schools within a radius of 200 km situated near similar noise sources. Chosen assessment criteria show small exposure to low frequency noise. Measured infrasound noise levels are below hearing threshold.

Keywords: impact on environment; ease of learning factor; traffic noise; wind turbine; noise measurements.

1. Introduction

The aim of the research was to determine whether the level of low-frequency noise coming from the environment, including infrasound noise, in the primary school, can be felt by children and may affect the results of learning. Levels of infrasound noise in the close surrounding of the school were also studied. During conducted research, the anthropogenic sources of noise were car traffic on the national road (MR – main road) on the north side of the school building and a wind farm situated on the east and south sides of the school building (Fig. 1). The analysed school is a communal school and it is located far away from the urban agglomeration.

Within our environment, there are different sources of noise, but they generally depend on our activity, location, and the time of day. Transportation noise represents a large majority of external noise affecting people in cities and their surroundings. Traffic and wind turbine noise can lead to sleep disturbance and to psy-

chological and physiological sustained stress reactions, which could impact health. The health issues associated with excessive exposure to environmental noise pollution (particularly from transportation sources) are now fairly well-established and extensively documented (MUZET, 2007; MURPHY *et al.*, 2009; PIRRERA *et al.*, 2010). Authors of many publications (SEETHA *et al.*, 2008; SHIELD, DOCKRELL, 2008; XIE *et al.*, 2011; BAKAR *et al.*, 2013) describe the influence of external noise coming from school environment on the results of learning at school. There were studied correlations between the impact of external, environmental noise around schools and noise in school classrooms on learning results. The source of external noise was mainly traffic noise coming from a large urban agglomeration. Some authors point out the possibility of health problems related to the exposure to traffic noise. For example, it is suggested that it may increase the risk of developing type 2 diabetes (THIESSE *et al.*, 2018) or asthma (EZE *et al.*, 2018). Authors also indicate that there may be small connection between the



Fig. 1. School location and sources of noise.

exposure to road noise in childhood and the later risk of overweight (SCHULTZ CHRISTENSEN *et al.*, 2016). Traffic noise is also indicated as a factor discouraging children from physical activity (ROSWALL *et al.*, 2017). The range of above studies included also acoustic noise. Such research conducted in primary schools, concerning infrasound and low frequency noise which occurs in classroom is rarely described in literature. Our objective was to check the possible threats. The small number of studies of impact of low frequency noise on human health carried out so far does not allow us to draw unambiguous conclusions (KACZMARSKA, ŁUCZAK, 2008; BALIATSAS *et al.*, 2016). In the further part of the article, low-frequency noise is described by the abbreviation LFN.

The dominant effect of exposure to infrasound is the annoying feeling, which occurs at small exceeding of hearing thresholds, manifested by subjective states of extreme tiredness, discomfort, drowsiness and psychomotor and physiological disorders (LUNDQUIST, 2003). LFN in the range of 125 to 250 Hz can lead to worse student-teacher communication. Children generally have less precise speech, more limited vocabulary, and less familiarity with language rules than adults. Masking effects of noise may therefore be particularly critical both for the perception of children's speech and for the children's perception of speech (LUNDQUIST *et al.*, 2000; LUNDQUIST, 2003; WU *et al.*, 2014).

Many adults report environmental sensitivity to infrasound and LFN from wind farms. This is characterized by recurrent, unspecified symptoms resulting in a bad mood of the residents. The causal nexus between the exposure and its symptoms cannot be indicated by empirical evidence. Studies indicate that

the symptoms can be explained by nocebo reaction, in which health problems and nuisances reported as a result of social discourse and media reports (MCCUNNEY *et al.*, 2014; CRICHTON, PETRIE, 2015). Generally, children are unbiased when they perceive reality and they often do not identify their own environmental and health problems as a result of environmental conditions. Therefore, checking the potential impact of infrasound noise and LFN noise on primary school students is an important aspect of environmental research.

Many researchers describe in their publications the occurrence of infrasound noise near wind turbines (BOCZAR *et al.*, 2012; INGIELEWICZ, ZAGUBIEŃ, 2014; HERRMANN *et al.*, 2016) and roads (HERRMANN *et al.*, 2016). The sound pressure levels within the infrasound range presented here do not generally exceed the hearing thresholds. Presented noise spectra show that the level of LFN above the central frequency of third octave band of 25 Hz is above the hearing threshold. There are some cases of masking the audible noise of wind turbines by roads of significant traffic (PEDERSEN *et al.*, 2010). To get a full picture of acoustic situation it is necessary to get information on infrasound and LFN levels in a total state, i.e. for sounds coming simultaneously from the wind farm and high traffic noise.

2. Methodology

2.1. Noise measurements

The analyses were carried out in the primary school classrooms to determine the level of infrasound and LFN coming from the environment. The walls of the school building are made of brick, both sides plastered

(wall thickness – about 40 cm), over 60% of the surface of external walls is covered by windows. Window frames are made of PVC and are double-pane ones. The anthropogenic sources of noise during the measurements were: car traffic on the national road (MR – main road) located 150 m to the north facade of the school building and a wind farm. The nearest turbine of the wind farm is located 500 m from the eastern facade of the school building (Fig. 1). Average traffic intensity on the national road is 15 000 vehicles per day. The wind farm devices are located to the east and south side of the analysed school building and the farm consists of 25 turbines. The capacity of wind turbines of horizontal rotation axis is 2 MW each, the rotor's diameter is 80 m and there are three blades. The turbines' towers of 100 m are tubular ones.

Due to eastern and north-eastern location of classrooms (Fig. 2), the measurements were carried out when the wind direction was eastern or north-eastern (Fig. 1). Measurement points were located in six measurement sections (Fig. 2), A1 and A2 in the east, B1 and B2, and BG1 and BG2 in the north. The measurements, at external sections A1 and B1, were carried out at 3 different heights – 4, 8 and 12 m above the ground level, at the distance of 2 m from the building's façade. Internal measurements – A2 and B2 – were carried out at three floors of the school building (ground floor, 1st floor, 2nd floor). The measurement was made in the middle of the classroom, 1.5 m from windows at a height of 1.5 m above the floor. The microphone was minimum 0.5 m above the desk and any other reflecting surface. The measurement was made in 3 points situated 1 m from each other. The points were located parallel to windows, due to students' frequent activity in this part of the

classroom. The average size of analysed classroom was 5 × 8 m. Taking into consideration the furniture, the desk and teacher's area and other school equipment, there is 3 × 5 m left for children. The measurements were carried out when all windows in external walls were closed. In the BG measurement sections, there was measured only the acoustic background noise level at a height of 4 m above the ground level, at a distance of 2 m from the building facade (BG1) and at a height of 1.5 m above the ground floor level inside the school building (BG2) – minimum 0.5 m above any reflecting surface. Due to the fact that there was no possibility to stop turbines during acoustic background measurement, measurement points BG1 and BG2 were located in the acoustic shadow created by the east wing of the school building and a building of 6 m, which is a link building between the east and west wing of the school (Fig. 2). Chosen location of acoustic background measurement points, allowed to minimise the impact of wind turbines on the measurement results and at the same time, this did not eliminate the influence of blowing wind on these results. Measurements of acoustic background were made when there was no traffic on the national road (MR). In order to eliminate disturbances caused by the presence of teachers and students in classrooms, the research was conducted between 1:00 pm and 9:00 pm, after classes. Dates of the measurements were selected so as the meteorological conditions remained constant during measurements. Much attention has been paid to wind speed and its direction – it was important that it did change much. There were selected three measurement days in spring and summer. Thanks to favourable meteorological conditions, there were two series of measurements conducted each day.

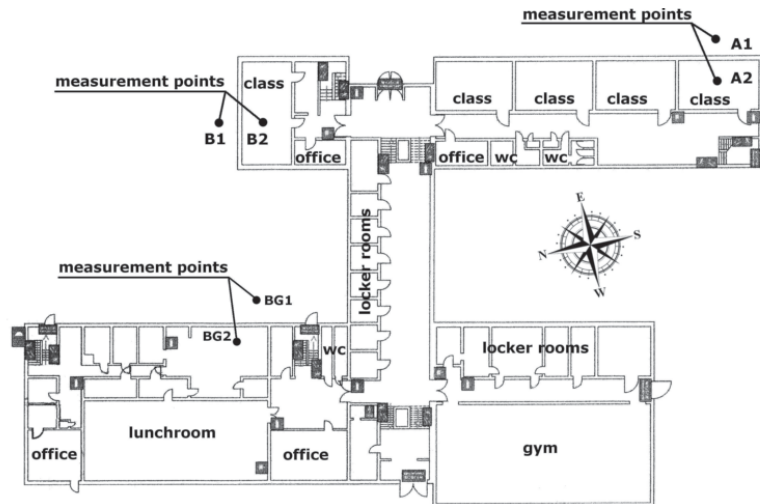


Fig. 2. Location of measurement points.

During both measurement series, there were taken three samples at each point, the duration of one trial was 5 minutes. Each sample contained third octave band analysis of sound conducted without correction, at the frequency range from 0.4 to 16 000 Hz. Next, the appropriate corrections A-weighted, C-weighted and G-weighted were digitally applied (ISO 7196, 1995; ISO 226, 2003) by the use of dedicated meter software.

The measurements were carried out under the following meteorological conditions: the temperature 15–21°C, humidity 61–79%, pressure 1005–1020 hPa and wind speed at the height of the measurement point 3.0–6.0 m/s. The average wind speed during the measurement did not exceed 5 m/s, the direction of wind – east and north-east. The measurement of selected meteorological parameters was made by the meteo-station set on the eastern side of the school, at a height of 4 m. Conducting measurements at wind speeds of 3.0–6.0 m/s, on one hand, allows to take into account wind turbines' noise emission working with maximum acoustic power and on the other hand, it allows to lower relatively the impact of acoustic background on noise measurement results (BULLMORE *et al.*, 2009; WSZOLEK, KLACZYŃSKI, 2014; ZAGUBIEŃ, INGIELEWICZ, 2017). The measurements were made by digital sound analyzer class 1 SVAN 912AE with wind protector, which enabled simultaneous measurement of most parameters characterizing noise. Before and after measurements, the measurement trajectory and sound analyzer were checked by class 1 calibrator. The whole equipment had valid calibration certificates. There was used the SV02/C4 microphone with constant measurement characteristics of frequency range from 0.4 to 16 000 Hz (ZAGUBIEŃ, 2016).

In the literature, a number of methods have been used for the detection of low frequency noise problems (LEVENTHALL, 2003). One of those focuses, on the difference between C- and A-weighted noise levels due to the difference being an indicator of the amount of low frequency energy in the noise as well as a useful predictor of annoyance (HOLMBERG *et al.*, 1997; KJELLBERG *et al.*, 1997). KJELLBERG *et al.* (1997) suggest that if the difference between the noise values for the two weightings – dB(C) and dB(A) – is bigger than 15 dB, there may occur a low frequency noise problem. While this indicator does not provide definitive proof of a low frequency noise problem, it points to the need for further investigation within narrower frequency bands.

The LFN evaluation criteria were estimated regarding differences between the measured equivalent sound level L_{Aeq} and L_{Ceq} . For example, in Germany, in accordance with the DIN 45680 norm, the confirmation of LFN is the difference between (equivalent or maximum) sound levels C and A, which is more or equal 20 dB. Considering different suggestions of authors

(LUNDQUIST *et al.*, 2000; PAWLACZYK-ŁUSZCZYŃSKA *et al.*, 2006; 2007; PAWLAS *et al.*, 2013) and the criteria used in the world (PAWLAS *et al.*, 2013; DIN 45680, 2013; Hygiene norm HN 30, 2016; SHEHAP *et al.*, 2016), there was adopted an own LFN potential threat rating scale:

- $L_{Ceq} - L_{Aeq} < 10$ – no threat,
- $L_{Ceq} - L_{Aeq} = 10-15$ – low LFN threat,
- $L_{Ceq} - L_{Aeq} = 15-20$ – medium LFN threat,
- $L_{Ceq} - L_{Aeq} > 20$ – high threat of LFN.

In a further part of the study A-weighted and C-weighted equivalent sound pressure levels were calculated for a limited frequency range, i.e. 20–16 000 Hz.

The criteria for assessing infrasound noise were estimated both for the school surroundings and in the classrooms. According to Danish recommendations (JACOBSEN, 2001), the permissible level of infrasound noise inside a school building was estimated at 85 dB(G). Considering the levels of natural infrasound in the environment during windy weather (INGIELEWICZ, ZAGUBIEŃ, 2014), the permissible level of infrasound noise outside a school building was estimated at 95 dB(G).

2.2. Learning results

The results of learning were checked on the basis of pass rates of final tests done by primary school students. The results concern children learning in the 6-grade primary school system, in other words, children graduating from school at the age of 13.

The assessment was made on the basis of two indicators, the average-percentage of the school results in this region within last two years and a long-term analysis of the ease of learning factor. Ease of learning factor used in didactic measurements tells us whether the graduate's achievements are his strength or weakness. The ease of learning factor is calculated by dividing the points obtained by the graduate by the maximum number of points possible to get for the task.

3. Results and discussions

The results of the conducted research are presented in a graphics form and in the form of tabular presentation. Long-term analysis of ease of learning factor, non-corrected third octave band analysis with hearing thresholds of acoustic noise (ISO 226, 2003) and low-frequency noise (MOLLER, PEDERSEN, 2004; LEVENTHALL, 2007) are presented in a graphic way.

3.1. Third octave band analyses

Figure 3 shows the results of the conducted third octave band analyses outside school at measurement points located 2 m from the facade of the building.

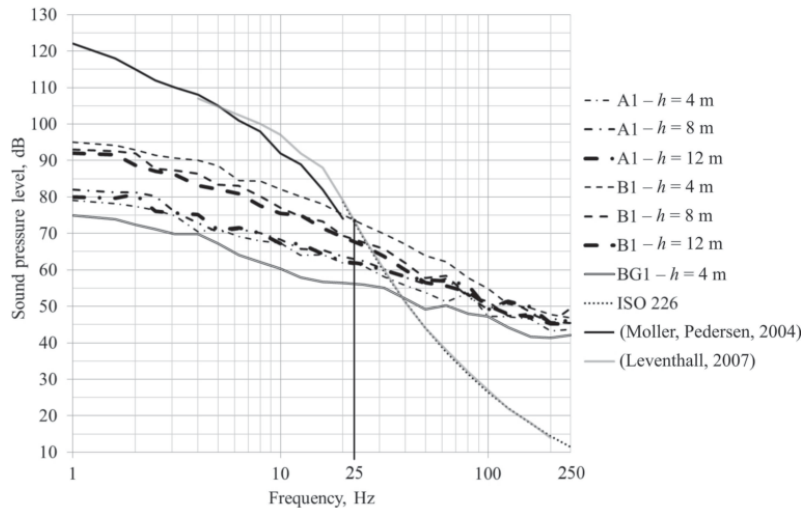


Fig. 3. Frequency spectrum of low frequency noise (LFN) occurring outside the building (ranges of measured sound pressure levels in 1/3-octave bands from 1 to 250 Hz).

The central frequency of 25 Hz of third octave band was highlighted; exceeding this frequency resulted in measurement results above hearing thresholds.

While identifying the potential threat of LFN to health of children, who stay outside school, the results of measurements at the height of 4 m are important. It should be noted that in the A1 measurement section (on wind turbines sides) the highest sound pressure levels are recorded at heights of 8 and 12 m, and in the measurement section B1 (from the road side) at a height of 4 m. At frequencies above 25 Hz, the

results of measurements at the height of 4 m in the measurement section A1 are close to the background noise measured in BG1 section.

Figure 4 shows the results of third octave band analyses conducted in classrooms in A2, B2 and BG2 sections. Because of the large number of measurements, only the results of the highest values are presented. The frequency of the 63 Hz of third octave band was highlighted; exceeding this frequency resulted in measurement results above hearing thresholds.

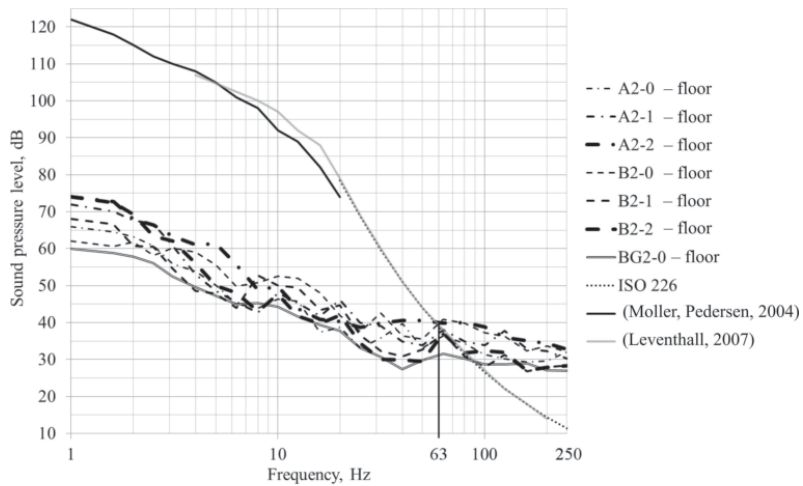


Fig. 4. Frequency spectrum of low frequency noise (LFN) occurring in classrooms (ranges of measured sound pressure levels in 1/3-octave bands from 1 to 250 Hz).

3.2. Infrasound noise

Table 1 summarizes the results of the selected measurement day from two series of measurements of the G-weighted equivalent sound pressure level. The mean equivalent sound level G was calculated for each test series at all measuring points. The measured values contain the background contribution. The values of the G-weighted equivalent sound pressure level of the background have been mixed up in separate columns.

The results of all collected infrasound noise measurements inside classrooms do not exceed 67 dB, and the ones collected outside the school do not exceed 92 dB. Calculated average values of equivalent sound level corrected by G weighted equivalent sound pressure level do not exceed 65 dB inside classrooms and 89 dB outside the school. Comparing the obtained results to values obtained during measurements carried out under similar meteorological conditions for natural sources of infrasound noise (INGIELEWICZ, ZAGUBIEŃ, 2014) and during everyday household activities (ZAGUBIEŃ, WOLNIEWICZ, 2016), it can be stated that they are at similar levels.

3.3. LFN noise

The analysis of the diagrams shown in Figs 3 and 4 indicates that within the spectrum of the analysed noise there are the LFN members above the hearing threshold. It should be considered whether the measured noise levels can have a bothersome or harmful impact on students. Table 2 summarizes the average results of measurements of the equivalent sound level A and C in A and B measurement sections and the calculated difference $L_{Ceq} - L_{Aeq}$, which is the estimated criterion of assessment. Table 3 shows maximum sound levels registered in measurement points all types of frequency weightings A, C and G.

The following dependence of the $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ assessment criterion was observed:

- in measurement sections A (from wind turbines side) larger differences (>10) were registered at heights of 8 and 12 m (A1) which corresponds to classrooms on the first and second floor of the school building (A2), it is probably caused by the direct (no reflections and loss) sound wave propagation on these points, from classroom win-

Table 1. Results of infrasound noise measurements.

Measurement height/floor [m]/-	Number of sample [-]	G-weighted equivalent sound pressure level, $L_{G_{eq}}$ [dB]									
		Measurement series 1				Measurement series 2				Background	
		Measurement section									
		A1	A2	B1	B2	A1	A2	B1	B2	BG1	BG2
4/0	1 ₀	80.8	52.5	84.7	60.6	77.9	52.8	85.4	60.6	76.4	53.1
	2 ₀	78.5	53.2	87.2	60.2	78.4	54.5	91.4	61.0	74.8	52.3
	3 ₀	77.5	55.0	83.9	59.9	76.9	55.7	86.5	59.4	75.1	52.7
	$L_{G_{eq,avg}}$	79.2	53.7	85.5	60.2	77.8	54.5	88.6	60.4	75.5	52.7
8/I	1 _I	87.8	60.9	78.6	58.2	86.2	60.6	80.8	57.5	-	
	2 _I	88.4	66.6	77.5	58.9	87.8	66.0	80.0	59.8		
	3 _I	85.6	62.8	74.8	59.1	83.4	63.4	75.0	59.1		
	$L_{G_{eq,avg}}$	87.5	64.1	77.3	58.8	86.2	63.9	79.2	58.9		
12/II	1 _{II}	89.6	62.6	81.7	56.9	89.4	62.7	82.2	55.7		
	2 _{II}	84.6	60.3	82.6	58.8	83.0	57.9	82.5	55.7		
	3 _{II}	85.5	61.1	82.3	60.6	85.2	61.1	82.3	62.7		
	$L_{G_{eq,avg}}$	87.1	61.4	82.2	59.0	86.7	61.0	82.3	59.4		

Table 2. Results of the L_{Ceq} and L_{Aeq} measurements.

Measurement height/floor [m]/-	C-weighted equivalent sound pressure level, $L_{C_{eq}}$ [dB]				A-weighted equivalent sound pressure level, $L_{A_{eq}}$ [dB]				$L_{C_{eq}} - L_{A_{eq}}$ [dB]			
	Section A		Section B		Section A		Section B		Section A		Section B	
	A1	A2	B1	B2	A1	A2	B1	B2	A1	A2	B1	B2
4/0	68.1	46.3	75.2	50.8	59.7	40.4	60.2	37.5	8.4	5.9	15.0	13.3
8/I	74.9	51.1	69.3	49.1	63.6	38.5	63.5	40.3	11.3	12.6	5.8	8.8
12/II	74.4	54.0	71.2	48.9	59.5	40.8	62.8	38.1	14.9	13.2	8.4	10.8

Table 3. Results of the L_{Cmax} , L_{Amax} and L_{Gmax} measurements.

Measurement height/floor [m]/-	C-weighted sound pressure level, L_{Cmax} [dB]				A-weighted sound pressure level, L_{Amax} [dB]				G-weighted sound pressure level, L_{Gmax} [dB]			
	Section A		Section B		Section A		Section B		Section A		Section B	
	A1	A2	B1	B2	A1	A2	B1	B2	A1	A2	B1	B2
4/0	72.7	54.2	83.4	57.9	64.5	49.1	66.1	45.7	91.1	65.1	99.5	71.6
8/I	78.9	58.0	76.0	55.4	68.1	46.4	69.9	48.5	95.9	75.3	94.4	70.8
12/II	78.8	61.8	78.5	55.9	63.6	48.2	68.2	47.0	97.8	74.2	94.7	72.1

dows on the 1st and 2nd floor it is possible to see wind turbines while on the ground floor they are partly obscured by trees and bushes,

- in measurement sections B (from the national road side) larger differences (>10) were registered at a height of 4 m (B1) which corresponds to classrooms on the ground floor of the school building (B2), which may be caused by shorter sound wave propagation from vehicles on this part of the road,
- the results of measurements were never higher than 15 – which is the adopted numerical evaluation criterion (low LFN threat).

Beside chosen criteria, differences between levels $L_{Cmax} - L_{Amax}$ in Table 3 have also been checked.

They did not exceed 20 dB in any measurement point. Only in one point the difference level was exceeded – $L_{Cmax} - L_{Amax} = 15$ dB, it was 17.3 dB registered from the MR road side, at the height of 4 m.

3.4. Learning results

Figures 5 to 7 show a long-term analysis of the ease of learning factor for three selected tasks: reading, writing and reasoning. The trend line of the results is presented. The results are shown in comparison with the results of the comparative school. The comparative school is of similar size as the analysed one and it is located in the same municipality. The comparative school is located at the distance of 250 m from the

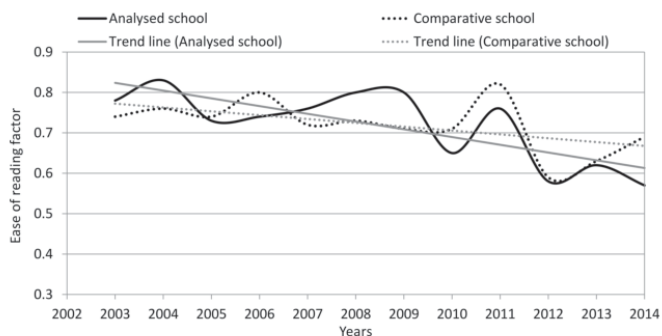


Fig. 5. Long-term analysis of ease of reading factor.

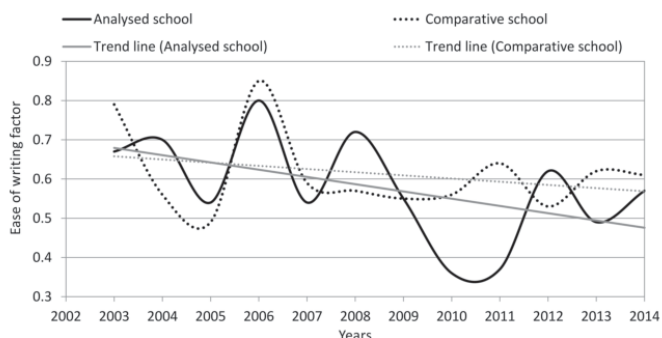


Fig. 6. Long-term analysis of ease of writing factor.

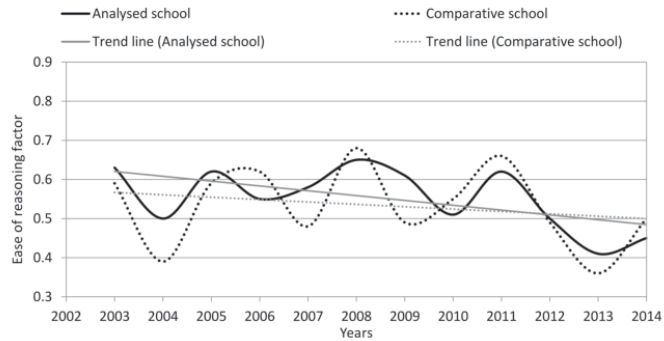


Fig. 7. Long-term analysis of the ease of reasoning factor.

Table 4. Average learning results compared to schools in the region.

Number of graduates	Year	Average school result [%]			
		School	Municipality	County	Voivodship
Analysed school: 24	2014	53.75	57.68	59.13	62.28
Comparative school: 19		58.55			
Analysed school: 17	2015	50.59	63.96	62.60	64.95
Comparative school: 32		69.28			
Analysed school: 20	2016	56.30	60.19	58.79	59.59
Comparative school: 21		62.24			

national road (MR) and partly shielded from traffic noise by buildings. The windows of the comparative school classrooms do not look out to the national road. The distance between the nearest wind turbine and the comparative school is 15 km.

The charts show that both schools have a declining trend line for all analysed factors. However, in the case of the analysed school, the line drops at an alarmingly large angle. Table 4 summarizes the average-percentage of learning results at the analysed school and the comparative school compared to schools in this region for last three years. The analysis of the presented data leads to the conclusion that the analysed school's educational results are below the average results in schools in this region.

4. Conclusions

The main conclusions of conducted research are:

- 1) The measured equivalent sound level A which is the acoustic background in analysed classrooms does not exceed 41 dB and most registered results are below 40 dB.
- 2) Adopted LFN assessment criterion describes the exposure of students to low-frequency noise as meaningless.
- 3) No threat of infrasound noise. Measured levels are below the threshold of human perception of infrasound.

- 4) Recreational facilities outside the school are located 100 m from the national road, which may discourage children from playing in the environment of increased noise levels. The measured values of the equivalent sound level A at the height of 4 m above the ground level, from the national road side, are higher than 60 dB (measurement sections B1). Lack of physical activity during breaks between lessons may cause tiredness and may lead to children's lower concentration.

Due to the fact that the express road, 500 m south-east from the school building, is still under construction, the research will be repeated within two years. There will be a survey conducted among students to know their subjective opinions on noise at school and its surroundings. On the basis of the measurement results collected so far, it is difficult to state clearly that worse learning results at this school are influenced by the acoustic climate in the school environment.

References

1. BAKAR A.H.A., ALIAS A., RAHMAT N. (2013), Teaching and Learning: The impact of noise pollution from Light Rail Transit (LRT) near the school compound, *Proceedings of International Academic Conference (IAC 2013)*, Malaysia.
2. BALIATSAS C., VAN KAMP I., VAN POLL R., YZERMANS J. (2016), Health effects from low-frequency

- noise and infrasound in the general population: Is it time to listen? A systematic review of observational studies, *Science of The Total Environment*, **557**–**558**: 163–169, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.065.
3. BOCZAR T., MALEC T., WOTZKA D. (2012), Studies on infrasound noise emitted by wind turbines of large power, *Acta Physica Polonica A*, **122**(5): 850–853, doi: 10.12693/APhysPolA.122.850.
 4. BULLMORE A., ADCOCK J., JIGGINS M., CAND M. (2009), Wind farm noise predictions and comparison with measurements, *Proceedings of Third International Meeting on Wind Turbine Noise*, Aalborg, Denmark.
 5. CRICHTON F., PETRIE K.J. (2015), Health complaints and wind turbines: The efficacy of explaining the nocebo response to reduce symptom reporting, *Environmental Research*, **140**: 449–455, doi: 10.1016/j.envres.2015.04.016.
 6. DIN 45680: 2013, *Measurement and assessment of low-frequency noise immisions in the neighbourhood*, Berlin, Deutches Institut für Normung.
 7. EZE I.C. *et al.* (2018), Transportation noise exposure, noise annoyance and respiratory health in adults: A repeated-measures study, *Environment International*, **121**: 741–750, doi: 10.1016/j.envint.2018.10.006.
 8. HERRMANN L. *et al.* (2016), Low-frequency noise incl. infrasound from wind turbines and other sources, *Proceedings of Inter-Noise 2016*, pp. 5786–5795, Hamburg, Germany.
 9. HOLMBERG K., LANDSTRÖM U., KJELLBERG A. (1997), Low frequency noise level variations and annoyance in working environments, *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, **16**(2): 81–88, doi: 10.1177/026309239701600202.
 10. Hygiene norm HN 30:2016, *Infrasound and low frequency sounds: Limit values for residential and public buildings*, Minister of Health of the Republic of Lithuania.
 11. INGIELEWICZ R., ZAGUBIEŃ A. (2014), Infrasound noise of natural sources in environment and infrasound noise of wind turbines, *Polish Journal of Environmental Studies*, **23**(4): 1323–1327.
 12. ISO 226:2003 (2003), *Acoustics – Normal equal-loudness level contours*, International Organization for Standardization, Geneva.
 13. ISO 7196:1995 (1995), *Acoustics – Frequency weighting characteristic for infrasound measurements*, International Organization for Standardization, Geneva.
 14. JACOBSEN J. (2001), Danish guidelines on environmental low frequency noise, infrasound and vibration, *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, **20**(3): 141–148, doi: 10.1260/0263092011493091.
 15. KACZMARSKA A., LUCZAK A. (2008), Analysis of annoyance caused by infrasound and low-frequency noise during mental work, *Archives of Acoustics*, **33**(3): 331–340.
 16. KJELLBERG A., TESARZ M., HOLMBERG K., LANDSTRÖM U. (1997), Evaluation of frequency-weighted sound level measurements for prediction of low-frequency noise annoyance, *Environment International*, **23**: 519–527, doi: 10.1016/S0160-4120(97)00054-8.
 17. LEVENTHALL G. (2003), *A review of published research on low frequency noise and its effects*, DEFRA, London.
 18. LEVENTHALL G. (2007), What is infrasound?, *Progress in Biophysics & Molecular Biology*, **93**(1–3): 130–137, doi: 10.1016/j.pbiomolbio.2006.07.006.
 19. LUNDQUIST P. (2003), *Classroom noise – Exposure and subjective response among pupils*, Umeå University, Sweden.
 20. LUNDQUIST P., HOLMBERG K., LANDSTRÖM U. (2000), Low frequency noise and annoyance in classroom, *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, **19**(4): 175–182, doi: 10.1260/0263092001493010.
 21. MCCUNNEY R.J., MUNDT K.A., COLBY W.D., DOBIE R., KALISKI K., BLAIS M. (2014), Wind turbines and health: A critical review of the scientific literature, *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, **56**(11): e108–e130, doi: 10.1097/JOM.0000000000000313.
 22. MOLLER H., PEDERSEN C.S. (2004), Hearing at low and infrasonic frequencies, *Noise and Health*, **6**(23): 37–57.
 23. MURPHY E., KING E.A., RICE H.J. (2009), Estimating human exposure to transport noise in central Dublin, Ireland, *Environment International*, **35**(2): 298–302, doi: 10.1016/j.envint.2008.07.026.
 24. MUZET A. (2007), Environmental noise, sleep and health, *Sleep Medicine Reviews*, **11**: 135–42, doi: 10.1016/j.smrv.2006.09.001.
 25. PAWLACZYK-ŁUSZCZYŃSKA M., DUDAREWICZ A., ŚLIWIŃSKA-KOWALSKA M. (2007), Proposals of exposure criteria for the assessment of low frequency noise at workplaces in industrial control rooms and office-like areas, *Archives of Acoustics*, **32**(2): 303–312.
 26. PAWLACZYK-ŁUSZCZYŃSKA M., SZYMCAK W., DUDAREWICZ A., ŚLIWIŃSKA-KOWALSKA M. (2006), Proposed criteria for assessing low frequency noise annoyance in occupational settings, *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, **19**(3): 185–197.
 27. PAWLAS K., PAWLAS N., BOROŃ M., SZLAPA P., ZACHARA J. (2013), Infrasound and low frequency noise assessment at workplaces and environment – review of criteria, *Environmental Medicine*, **16**(1): 82–89.
 28. PEDERSEN E., VAN DEN BERG F., BAKKER R., BOUMA J. (2010), Can road traffic mask sound from wind turbines? Response to wind turbine sound at different levels of road traffic sound, *Energy Policy*, **38**(5): 2520–2527, doi: 10.1016/j.enpol.2010.01.001.

29. PIRRERA S., DE VALCK E., CLUYDTS R. (2010), Nocturnal road traffic noise: a review on its assessment and consequences on sleep and health, *Environment International*, **36**(5): 492–498, doi: 10.1016/j.envint.2010.03.007.
30. ROSWALL N. *et al.* (2017), Residential exposure to traffic noise and leisure-time sports – A population-based study, *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, **220**(6): 1006–1013, doi: 10.1016/j.ijheh.2017.05.010.
31. SCHULTZ CHRISTENSEN J., HJORTEBJERG D., RAASCHOU-NIELSEN O., KETZEL M., SØRENSEN T.I.A., SØRENSEN M. (2016), Pregnancy and childhood exposure to residential traffic noise and overweight at 7 years of age, *Environment International*, **94**: 170–176, doi: 10.1016/j.envint.2016.05.016.
32. SEETHA P., KARUPPIAH K., ISMAIL M.Y., SAPUAN S., ISMAIL N., MOLI T. (2008), Effects to teaching environment of noise level in school classrooms, *Journal of Scientific and Industrial Research*, **67**(9): 659–664.
33. SHEHAP A.M., SHAWKY H.A., EL-BASHEER T.M. (2016), Study and assessment of low frequency noise in occupational settings, *Archives of Acoustics*, **41**(1): 151–160, doi: 10.1515/aoa-2016-0015.
34. SHIELD B., DOCKRELL J. (2008), The effects of environmental and classroom noise on the academic attainments of primary school children, *Journal of the Acoustical Society of America*, **123**: 133–144, doi: 10.1121/1.2812596.
35. THIESSE L. *et al.* (2018), Adverse impact of nocturnal transportation noise on glucose regulation in healthy young adults: Effect of different noise scenarios, *Environment International*, **121**: 1011–1023, doi: 10.1016/j.envint.2018.05.036.
36. WSZOŁEK T., KLACZYŃSKI M. (2014), Problems in measurements of noise indicators for wind turbines in Poland, *Proceedings of Forum Acusticum*, Cracow, Poland.
37. WU S., PENG J., BI Z. (2014), Chinese speech intelligibility in low frequency reverberation and noise in a simulated classroom, *Acta Acustica united with Acustica*, **100**: 1067–1072, doi: 10.3813/AAA.918786.
38. XIE H., KANG J., TOMPSETT R. (2011), The impacts of environmental noise on the academic achievements of secondary school students in Greater London, *Applied Acoustics*, **72**: 551–555, doi: 10.1016/j.apacoust.2010.10.013.
39. ZAGUBIEŃ A. (2016), Non-occupational exposure to low frequency noise – the analysis on the basis of chosen mean of transport [in Polish: Pozazawodowe narażenie na hałas niskoczęstotliwościowy – analiza na podstawie wybranego środka transportu], *Rocznik Ochrona Środowiska*, **18**: 626–641.
40. ZAGUBIEŃ A., INGIELEWICZ R. (2017), The analysis of similarity of calculation results and local measurements of wind farm noise, *Measurement*, **106**: 211–220, doi: 10.1016/j.measurement.2017.03.041.
41. ZAGUBIEŃ A., WOLNIEWICZ K. (2016), Everyday exposure to occupational/non-occupational infrasound noise in our life, *Archives of Acoustics*, **41**(4): 659–668, doi: 10.1515/aoa-2016-0063.

**OŚWIADCZENIE AUTORÓW O WKŁADZIE W POWSTANIE PUBLIKACJI
NAUKOWEJ – Z3**

Wolniewicz K., Zagubień A., Wesolowski M. (2021) Energy and Acoustic Environmental Effective Approach for a Wind Farm Location, Energies, Vol. 14(21), 7290;
DOI: 10.3390/en14217290

Współautor	Udział procentowy	Indywidualny wkład współautora	Podpis
Katarzyna Wolniewicz	60%	Koncepcja badawcza; nadzór nad realizacją badań; analiza formalna wyników badań; zapewnienie materiałów badawczych i oprzyrządowania; przeprowadzenie badań; wizualizacja danych; przygotowanie i redakcja tekstu	<i>Katarzyna Wolniewicz</i>
Adam Zagubień	20%	Koncepcja badawcza; metodologia; analiza formalna wyników badań; oprogramowanie aparatury pomiarowej; przygotowanie i redakcja tekstu	<i>A. Zagubień</i>
Mirosław Wesolowski	20%	Przygotowanie i redakcja tekstu; analiza formalna wyników badań; korekta artykułu	<i>M. Wesolowski</i>

Article

Energy and Acoustic Environmental Effective Approach for a Wind Farm Location

Katarzyna Wolniewicz, Adam Zagubień *  and Mirosław Wesołowski 

Faculty of Civil Engineering, Environmental and Geodetic Sciences, Koszalin University of Technology, ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin, Poland; kaja.wolniewicz@gmail.com (K.W.); miroslaw.wesolowski@tu.koszalin.pl (M.W.)

* Correspondence: adam.zagubien@tu.koszalin.pl

Abstract: The justification for the construction of a wind farm depends primarily on two factors. The first one is the availability of the area with significant windiness; the second one is the environmental conditions in the selected location. The aim of this paper was to demonstrate the need for parallel noise and energy analyses during the design of a turbine location and selection of its type on the wind farm. The noise analyses were performed according to ISO 9613-2. A detailed analysis of wind conditions in a given location is a basic activity to determine the profitability of a wind power plant foundation. The main environmental impact of WF is noise emission. The examples of wind turbines' selection optimally utilizing wind resources in two particular locations are presented. Six wind turbines were analyzed for each location. The choice of a wind turbine for the examined location was determined by the parameters of the device, the results of annual wind measurements, and acceptable noise levels in the environment. The three devices that met the acoustic criteria and the most energy efficient ones are indicated. We describe how a proper process of selecting a type of WT for a specific location should proceed.

Keywords: wind turbine; noise propagation; wind power; wind conditions



Citation: Wolniewicz, K.; Zagubień, A.; Wesołowski, M. Energy and Acoustic Environmental Effective Approach for a Wind Farm Location. *Energies* **2021**, *14*, 7290. <https://doi.org/10.3390/en14217290>

Academic Editor: Davide Astolfi

Received: 25 September 2021

Accepted: 1 November 2021

Published: 3 November 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

The construction of a wind farm is a complex project. It consists of many stages, such as selection of an appropriate location, wind measurement, equipment selection, turbine spacing analysis, formal and legal procedures, and construction design. A comprehensive study of many issues related to the design of wind farms can be found in the research papers of the DTU group [1], where a number of study cases as well as commonly used design methods for wind farms are presented.

The least noticed by investors, yet a very important stage, is the development of a concept for the selection of the equipment and the placement of the turbines. This process is referred to in the wind farm industry community as micro-siting. Micro-siting is the process of determining exactly where within the investment area particular turbines will be located. Location conditions and environmental protection requirements are taken into account while maintaining a broadly understood optimization of energy production. Decisions made at this stage determine the further course of the project and its execution. Appropriate execution of the technical concept allows minimizing the investment risk and optimizing the costs at the stage of design, construction, and operation.

By the middle of this century, global energy consumption is expected to increase by almost 50%. Although the production of energy from renewable sources (RES) is expected to increase dynamically, the production of energy from fossil fuels will also grow (although at a slower pace than in the case of RES) [2]. Due to the resignation of many countries from the production of energy from fossil raw materials, renewable forms of energy production will be subject to an increase [3,4]. One of the forms of renewable energy production is the use of wind resources by inland wind power plants. Wind farms (WF) composed

of installations with a nominal capacity above 1 MW have been in operation for more than 20 years [5]. Soon, old devices will be replaced by newer and more efficient ones. The stock of areas with significant windiness will decrease due to the expansion of the acquisition of land not yet used for the construction of wind farms. The wind power plants will come closer to the residential buildings. This will result in the environmental limitations of WF construction becoming a very important criterion for the selection of wind turbines [6,7]. The appropriateness of the WF construction depends primarily on two factors. The first one is the availability of the area with significant windiness; the second one is the environmental conditions or restrictions in the selected location.

The process of selecting WF turbines usually begins with determining the availability of equipment on the market. The investor identifies a group of devices for further analysis. Then, teams of specialists proceed to the design. Since the economic aspect of the project is very important, the productivity of the future power plant is examined. Based on the above, the power engineers team selects one type of equipment and specific turbine foundation points. Then, a group of acousticians accepts the WF for analysis. Due to environmental restrictions, the acousticians' team often makes adjustments to the turbine modes. The adjustment is made by reducing the acoustic power of the device but with the loss of its productivity.

The construction of WF is mainly financed by bank loans. The project, classified by the bank as repayable, is also based on wind expertise. The expertise includes compilation of measurement data from all sensors, the shading effect, and other analyses, such as landscape analysis, uncertainty of measurement analysis, air density analysis, wind power distribution analysis, wind turbine set efficiency analysis, and others. Bank expertise also includes data that allow assessing the investment in terms of wind turbine selection, Weibull distribution, wind directional distribution [8–10], and environmental impact [6].

The basic tools that determine the foundation of future wind farms are topographic maps, identification of roughness of the area and permanent barriers, assumptions concerning wind conditions, selection of height, and power of wind turbines. On-site inspection at the location of the future wind farm provides information about the real state (photographic records, GPS data, as well as a full and detailed description of all barriers occurring in a given location). Obstacles that can affect wind energy potential are typically industrial buildings, residential buildings, forests, single trees, chimneys, other wind turbines, observation towers, traffic towers, hills, mountains, heaps, bridges, etc. A correctly conducted wind conditions' measurement campaign must take these conditions into account. Guidelines for wind measurements are given in IEC 61400-12-1 [11]. Annex G of this standard sets out the arrangements for the correct installation of the measuring equipment on a meteorological mast. The guidelines given in IEC 61400-12-1 [11] are international practice for wind measurements [12,13].

A wind farm itself has a negligible influence on the environment. However, the negative aspect of the wind farms is the noise generated while the turbines are in operation condition. Because of the noise, the decision made on a new wind farm location should be preceded by the analysis of the noise influence on the surrounding environment. Especially, the range of this noise is considerably wide and ranges from 0.1 Hz to 16,000 Hz [14,15]. The available wind turbines possess different characteristics of the acoustic power, which may also change during operation depending on the wind speed [14,16]. Having in mind the above, the wind farm composed of many wind turbines (WT) should be located the right distance from a residential area in order to provide an appropriate sound level, which would not cause an acoustic discomfort for the inhabitants. This sound level is described as a permissible sound level in the environment and varies from country to country. Individual countries define it according to WHO guidelines [17]. WHO guidelines indicate that a non-irritating, acoustic noise level in the environment for most people is about 40 dB at nighttime. According to the L_{Aeq} , the permissible noise levels are between 43 dB (Belgium, Flanders) and 55 dB (Georgia, USA).

The aim of this paper was to demonstrate the need for parallel environmental and energy analyses during the design of turbine location and selection of its type on the wind farm (WF). Due to the authors' experience, gained while participating in many processes of determining the location and selection of wind farm equipment, a lack of coordination between project teams was observed. This problem applies to all ongoing projects. The acousticians' team focused only on noise analysis. On the other hand, the power engineers' team only analyzed the aspect of maximum WF productivity.

The paper presents an example of two detailed analyses performed for a small WF. On their basis, the erroneous course of action described above was proven. The proposed simultaneous consideration of the aspect of productivity and maintenance of acceptable levels of noise in the environment is more beneficial for the investor. Using simple examples, it was shown that extended analysis, including many devices, allows making investment decisions more efficiently. The results obtained allow the investor to choose or change the type of equipment at any subsequent design stage. The article attempts to indicate multidisciplinary parameters, such as the sound power level of a turbine, the location conditions, local average wind speed range, and power curve of a turbine, influencing the amount of energy generated by WF. The paper also focuses on the selection of an appropriate type of wind turbine for the studied locations, taking into account the protection of the environment against the noise.

2. Materials and Methods

Two examples of locations of wind power plants, farms A and B, were investigated. In order to ensure comparability, the construction of wind power plants of similar shapes and environmental limitations in both locations was assumed (Figure 1). The WFs consisted of four turbines with a horizontal axis of rotation and nominal power of 2.0, 2.3, or 2.5 MW. No device was excluded during the energy analyses. However, after the noise analysis, the productivity of the farms was re-evaluated. Table 1 presents the wind turbines selected for analysis.

Table 1. Parameters of investigated types of turbines.

Vendor/ Model	Vestas/ V100	Vestas/ V90	General Electric/ GE2.5	Wind to Energy/ W2E-100/2.55	Enercon/ E82	Gamesa/ G97
Power, [MW]	2.0	2.0	2.5	2.5	2.3	2.0
Impeller diameter, [m]	100	90	88	100	82	97

Assumptions for both locations were:

- achievement of maximum energy efficiency for the entire WF;
- the maximum height of the wind turbine (tower + rotor) must not exceed 150 m above ground level;
- a single tower height of 100 m was set for all types of turbines;
- the noise in the nearest protected areas may not exceed the limit value;
- the permissible noise level for daytime is 50 dB and for nighttime, 40 dB;
- the possibility of reducing the acoustic power of a turbine at the expense of its productivity was taken into account;
- due to the appropriately selected WF shape, the impact of individual wind turbines on the neighboring ones (turbulence, delayed wake-up, etc.) was not taken into account;
- the turbines were positioned in a line inclined at an angle of 20° in the direction of N-S (Figure 1); and
- the distance between the turbines was about 500 m, which corresponded to a minimum of five rotor diameters.

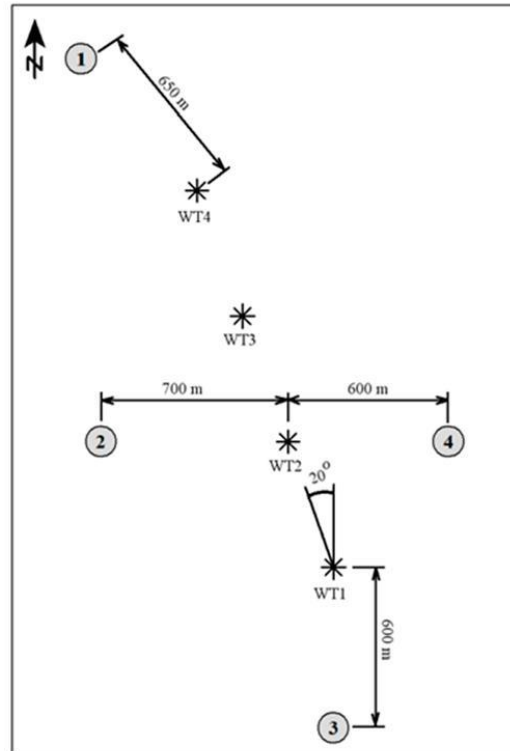


Figure 1. Location of a wind turbines and the control points.

To achieve the maximum WF energy efficiency, reliable wind measurements are required at the selected location. The comprehensive development of various aspects of the wind measurement procedure reduces the risk of error or uncertainty in the subsequent stages of wind turbine location design [12,13]. When measuring wind resources at a given location, land relief, natural and infrastructural barriers, slope, and other factors influencing the wind are taken into account. The wind analysis will result in a histogram of the wind speed distribution in class intervals of 1 meter/second. The duration of the measurements will be at least 1 year [12]. The selection of a wind turbine is made on the basis of the measurement results and productivity characteristics of available wind turbines. The manufacturer of the equipment presents the dependence of the turbine power on the wind speed. The characteristics of the equipment also contain information about the turbine start speed, nominal power, and maximum wind speed causing the equipment to be switched off. Based on the power plant characteristics, it is necessary to estimate the power value $P_{we,i}$ for the wind speed v_i being the means of successive class intervals. In the next step, $E_{we,i}$ energy generated by the power plant during 1 year in the next i -th class interval should be calculated:

$$E_{we,i} = P_{we,i} \cdot t_i = P_{we,i} \cdot f_i \cdot T_Y \quad (1)$$

Summing up the component energy from all compartments, the total energy E_{we} generated during 1 year by the power plant is obtained:

$$E_{we} = \sum_{i=1}^k E_{we,i} \quad (2)$$

The maximum height of a wind turbine is the sum of the length of the supporting tower and half the diameter of the rotor. The height of the hub as well as the rotor's diameter have a crucial influence on the power output and facility cost [18]. The construction and assembly of a high mast give the possibility to use higher wind speeds in higher air layers [19,20]. The permissible height is determined by local law or national regulations. These are the local spatial development plans or the regulations of the relevant government department. The purpose of determining the permissible height of a building is to introduce and maintain order in the landscape.

Calculations of the range of noise emitted by wind farms are being performed worldwide. The prediction of the noise emission is a starting point for each design works, enabling the assessment of an acoustic threat to the environment, required to get the building permission [21]. Local studies of the noise of wind turbines in chosen control points are conducted by various researchers in a similar way. Generally, they measure the equivalent level of sound (L_{Aeq}) or levels L_{A90} , L_{A50} , L_{A10} , depending on the recommended measurement procedures and assessment criteria valid in a certain country. In these analyses, the L_{Aeq} indicator was used. The equivalent continuous sound level (L_{eq}) is the steady sound pressure level, which, over a given period of time, has the same total energy as the actual fluctuating noise.

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{P^2}{P_0^2} dt \right) \quad (3)$$

The main objective of wind farm design is to optimize energy efficiency. To achieve the above, one must provide the minimum energy losses while keeping the maximum of the energy generation. The largest losses are termed wake losses and are the result of mutual interference between wind turbines. The wind partially consumes its energy when passing through the rotor of a wind turbine. Its speed behind the turbine is weakened, which may result in a decrease in the power of other, further wind turbines [22–24]. Moreover, placing the wind turbines in a row along the main wind direction intensifies this phenomenon and significantly reduces the output power of the WF [25]. This aspect was omitted in these analyses. The turbines were positioned in a line perpendicular to the prevailing wind direction.

3. Results

3.1. Energy Analysis

The main parameter influencing the choice of wind turbine type is the available wind power and the related wind speed distribution in the tested location. These parameters influence the amount of electricity generated and the income from the investment.

3.1.1. Wind Power

The wind power, modeled as a gas, can be expressed with the following formula [14]:

$$P_w = \frac{\rho \cdot A_f \cdot v^3}{2} \quad (4)$$

The air density for the normal conditions (at temperature $t = 273$ K and pressure $p = 105$ Pa) equals $\rho = 1.2759$ kg/m³. In the wind power sector, the assumed temperature is $t = 15$ °C and the pressure is $p = 1013$ hPa [19] for which the air density equals to $\rho = 1.225$ kg/m³. Assuming the unit flow area $A_f = 1$ m², the unit wind power obtained in the i -th speed range P_{we_i} can be expressed using the following formula:

$$P_{we_i} = 0.6125 \cdot v_i^3 \quad (5)$$

On the basis of Equations (1), (2), (4), and (5), it is possible to determine the resources of wind power and wind energy in the examined location. The average annual wind speed in the wind farm A is $v_{av} = 6.56$ m/s and in the wind farm B $v_{av} = 6.58$ m/s. While

making the preliminary assessment of the results it can be noticed that in the examined location a wind stream with the energy of 1962 kW/m^2 per farm A and 1725 kW/m^2 per farm B flowed through the area of 1 m^2 in 1 year. Although in both locations the average wind speed values were almost identical, their distribution in the different speed classes was different. Detailed wind measurement results for both locations are presented in Section 3.1.2.

3.1.2. Wind Speed Distribution in Selected Locations

The following analysis used the results of wind measurements made at the site of the future location of two wind farms in northern Poland. The distance between the future wind farms is more than 100 km. Accuracy and correctness of validation and a thorough analysis of measurement data are the key elements determining the usefulness of a given location in terms of its wind potential. The primary objective of the final report on wind measurements is to summarize the measurement period and present it in a graphical or tabular form. Taking into account the assumptions presented in Section 2, the results relating to the height of the center of the wind turbine rotor were selected.

The data were counted and a Weibull fit was performed to the measured frequency distribution. It must be noted that the provided parameters were a mathematical result. The two-parameter Weibull function is the most accepted technique for fitting the wind speed curve over a time period [26].

The two-parameter Weibull probability density function is given by the following:

$$p(v) = \left(\frac{k}{A}\right) \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k} \quad (6)$$

where v , k , and $A > 0$.

The factor k is a dimensionless quantity that determines the shape of curve. It is called a shape factor. Parameter A is the scale parameter. The distributions take different shapes with different values of k and A . For farm A, the best Weibull distribution match was obtained for $k = 2.13$ and $A = 7.45 \text{ m/s}$ (Figure 2), and for farm B, for $k = 2.44$ and $A = 7.42 \text{ m/s}$ (Figure 3). The percentage results obtained from the density function were multiplied in each speed class by 8760 (number of hours per year). The number of hours for each wind speed class was thus obtained.

The Figures 2–5 present the summary of selected data at selected locations in northern Poland.

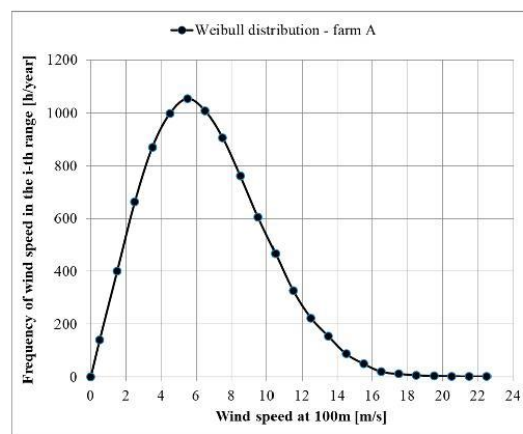


Figure 2. The Weibull distribution for the anemometer at 100 m above ground level, farm A.

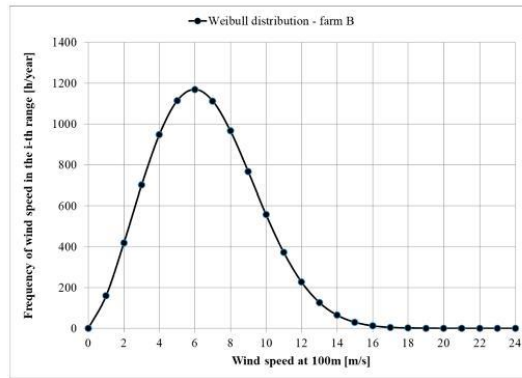


Figure 3. The Weibull distribution for the anemometer at 100 m above ground level, farm B.

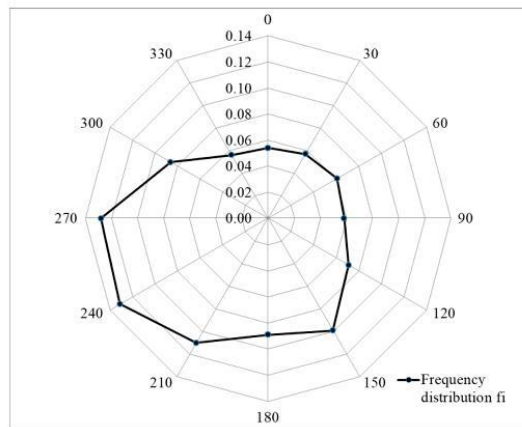


Figure 4. Wind direction distribution in the measurement period - wind rose for farm A.

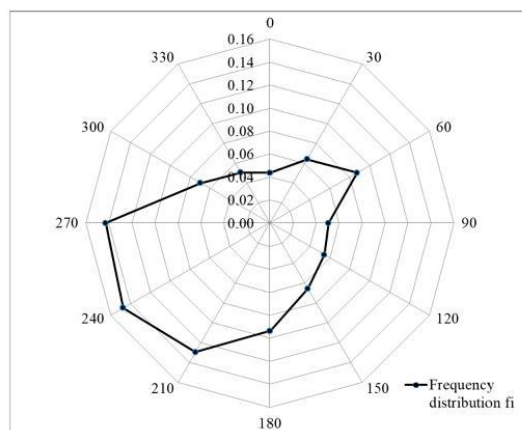


Figure 5. Wind direction distribution in the measurement period - wind rose for farm B.

3.1.3. Wind Turbine Selection

Selection of the type of wind power plant and estimation of its energy efficiency in the tested location are made on the basis of the histogram of wind speed distribution (Figures 2 and 4). Calculations are made, taking into account the characteristics of the wind power plant described by the manufacturer, which presents the dependence of the turbine power on the wind speed.

Tables 2 and 3 contain the number of hours per year with wind speed falling within specific range of 1 m/s resolution. Basing on the productivity vs. wind speed tables available for each turbine, the yearly energy production was determined for each of the turbines.

Table 2. Net energy produced by six different wind turbines, farm A.

Wind Speed (100 m), [m/s]	Number of Hours per Year, [h]	Net Energy, [MWh]					
		V100	V90	GE2.5	W2E-100/2.55	E82	G97
0.50	139	-	-	-	-	-	-
1.50	401	-	-	-	-	-	-
2.50	663	-	-	-	-	-	-
3.50	871	54	79	46	37	71	82
4.50	999	192	200	153	93	174	236
5.50	1055	391	382	321	242	339	462
6.50	1009	618	593	522	438	537	720
7.50	907	866	806	726	647	739	983
8.50	762	1065	957	881	828	899	1148
9.50	606	1112	992	979	947	957	1101
10.50	467	925	889	962	962	883	911
11.50	326	652	648	771	786	685	649
12.50	223	446	446	552	558	502	446
13.50	153	306	306	382	383	360	306
14.50	87	174	174	218	218	204	174
15.50	49	98	98	123	123	115	98
16.50	19	38	38	48	48	45	38
17.50	11	22	22	28	28	26	22
18.50	6	12	12	15	15	14	12
19.50	3	6	6	8	8	7	6
20.50	2	4	4	5	5	5	4
21.50	1	2	2	3	3	2	2
22.50	1	2	2	3	3	2	2
Totally, [MWh]		6985	6657	6743	6367	6566	7402

The results for individual turbines presented in Tables 2 and 3 are shown graphically in Figures 6 and 7. The figures show the productivity of turbines depending on wind speed.

Table 3. Net energy produced by six different wind turbines, farm B.

Wind Speed (100 m), [m/s]	Number of Hours per Year, [h]	Net Energy, [MWh]					
		V100	V90	GE2.5	W2E-100/2.55	E82	G97
0.50	131	-	-	-	-	-	-
1.50	259	-	-	-	-	-	-
2.50	477	-	-	-	-	-	-
3.50	695	43	63	37	30	57	65
4.50	958	184	192	147	89	167	226
5.50	1208	448	437	367	277	388	529
6.50	1300	796	764	672	564	692	928
7.50	1275	1217	1133	1020	909	1039	1382
8.50	985	1377	1237	1138	1069	1162	1484
9.50	585	1073	958	945	914	924	1063
10.50	344	681	655	709	709	650	671
11.50	206	413	410	489	498	434	411
12.50	124	248	248	307	310	279	248
13.50	80	160	160	200	200	188	160
14.50	56	112	112	140	140	132	112
15.50	34	67	67	84	84	79	67
16.50	20	40	40	50	50	47	40
17.50	11	22	22	28	28	26	22
18.50	6	11	11	14	14	13	11
19.50	3	5	5	7	7	6	5
20.50	3	6	6	8	8	7	6
21.50	1	3	3	3	3	3	3
22.50	0	0	0	0	0	0	0
Totally, [MWh]		6906	6524	6363	5901	6292	7433

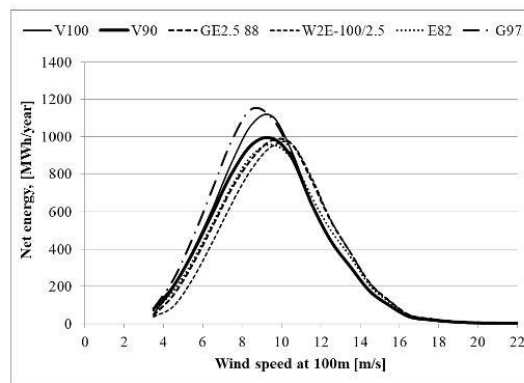


Figure 6. Level of energy supplied to the power grid by the wind turbines as a function of the wind speed, farm A.

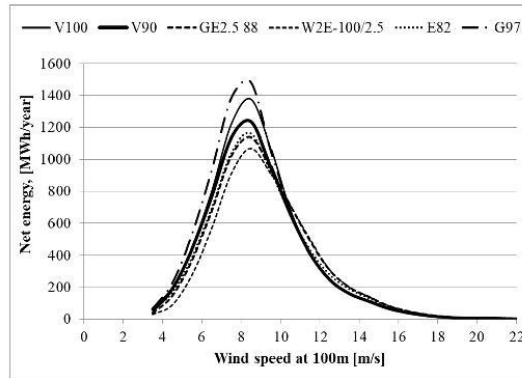


Figure 7. Level of energy supplied to the power grid by the wind turbines as a function of the wind speed, farm B.

Figures 8 and 9 graphically show the amount of network energy generated per year by the entire WF consisting of a specific type of turbines.

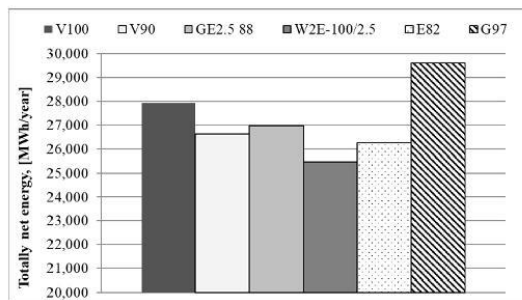


Figure 8. Level of energy supplied to the power grid by the wind farm A.

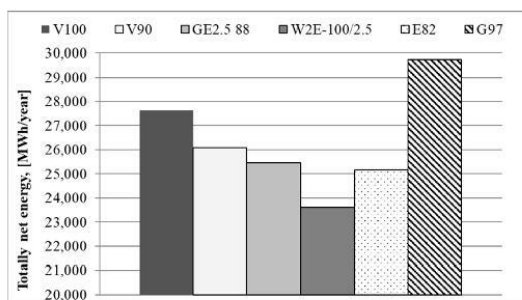


Figure 9. Level of energy supplied to the power grid by the wind farm B.

3.2. Acoustic Analysis

The most frequently recommended calculation algorithm in various countries around the world for forecasting the noise emission of wind turbines is the one compliant with the ISO 9613-2 standard [27]. This algorithm is not dedicated directly to the simulation of noise from wind turbines; it is a universal algorithm for industrial noise sources. The results' agreement between the noise simulation performed according to the ISO 9613-2 and the corresponding field measurements was confirmed [21]. The standard contains two

calculation methods, general and alternative. The methods differ in the way the sound attenuation by the ground is taken into account. The review and comparison of many calculation algorithms for forecasting WF noise emissions have been included in many publications [21,28,29]. Domestic regulations for the noise assessment methods determine the selection of the algorithm to be used. However, irrespectively from the algorithm used, the methodology of the acoustic analysis of the WF is very similar. The rotor as well as the peripheral equipment inside the nacelle are replaced with a point source with an acoustic power established by means of measurements. Calculation points are located in the vicinity of a residential area. The results of the simulation are given in the form of isolines of the sound level as well as the values in selected points. The above quantities are presented on maps in an appropriate scale.

In the calculations an alternative method of standard [27] was used due to the unambiguous way of selecting the parameter of sound wave attenuation by the ground. Using the alternative method, the source is described by two parameters, the height above the ground level and the acoustic power. The sound power level of wind turbines depends on the wind speed. Wind turbines are characterized by an increase in acoustic power up to the wind speed of circa 10 m/s at the top of the rotor axis. After exceeding this wind speed, the acoustic power remains unchanged [30,31]. The maximum acoustic power for each type of wind turbine was assumed for calculations. Selected wind turbines were grouped into three groups of similar acoustic power (Table 4).

The result of the simulation is a map with the results of calculations at control points. The isolines indicate the range of noise emission of 40 dB for each group of turbines, T1 to T3. Due to the assumptions of the same system of turbines and control points in both locations, one map is presented (Figure 10). The obtained results at the points slightly exceeded the value of 40 dB for maximum acoustic power of devices. Therefore, the analysis for the daytime, in which the assumed acceptable level is 50 dB, was omitted. During the day there will be no exceeding of the permissible noise level in the acoustically protected areas.

Table 4. Acoustic parameters of investigated types of turbines.

Model WT	V90	E82	V100	W2E-100/2.55	GE2.5	G97
Type	T1		T2		T3	
Sound power level, [dB]	104.0		105.0		105.8	

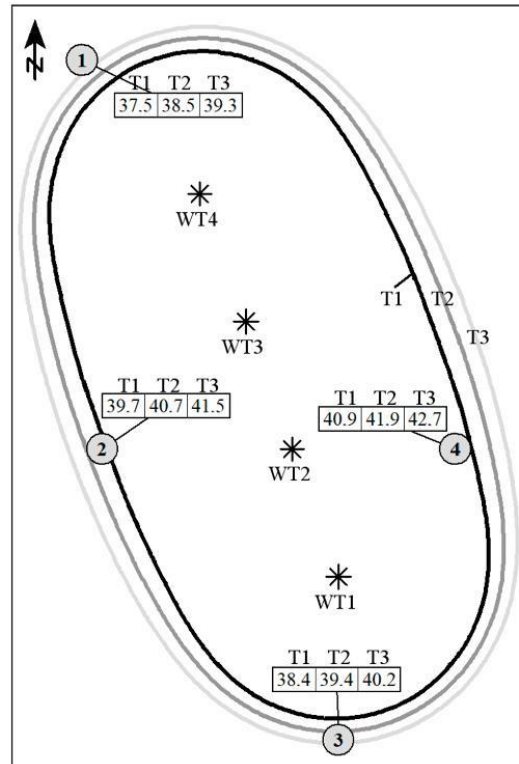


Figure 10. Noise emission range map.

The obtained results indicated that the acceptable noise level (40 dB) was exceeded in points 2, 3, and 4 at night. All tested turbines achieving the maximum acoustic power will cause exceeding (40 dB) in point 4. The tested wind turbines have the possibility to reduce the maximum acoustic power. In general, this results in a reduction in energy productivity. Of the turbines studied, only V100 has the ability to reduce sound power by using STE (Serrated Trailing Edge) on the rotor blades without losing nominal productivity. Taking into account the results of the energy and acoustic analysis, three devices were selected for the final calculation. The choice of equipment was significantly influenced by the factory's ability to control the acoustic power of each type of wind turbine.

The necessary technical data of the analyzed wind turbines were obtained from the manufacturers' technical specifications [32–37].

4. Final Results and Discussion

After the analyses carried out in Sections 3.1 and 3.2, information on productivity and the environmental impact of selected wind turbines was obtained. For further analyses, the three most energy efficient turbines were selected for both locations. Then, the order of analyses was reversed. The simulation of noise emission was carried out and, after reaching the target of not exceeding the permissible level (40 dB), the energy analysis was carried out. The acoustic target was achieved by taking the data presented in Table 5 and by shifting the WT2 turbine 50 m westward in relation to the initial setting (Figure 1).

Table 5. Acoustic parameters of investigated types of turbines.

Model WT	V100 with STE				V90				G97			
No. WT	WT1	WT2	WT3	WT4	WT1	WT2	WT3	WT4	WT1	WT2	WT3	WT4
Sound power level, [dB]		103.5			102.4		104.0		103.0			105.8

The final results of the simulation of noise emissions are shown on the map (Figure 11). To achieve the acoustic target, the acoustic power of several wind turbines had to be reduced, according to Table 5. For the V90 (WT1, WT2) and G97 (WT1, WT2, WT3) turbines, this meant a decrease in their productivity. The use of STE caps on the rotor blades of the V100 turbine did not reduce its productivity in relation to the rotor without caps.

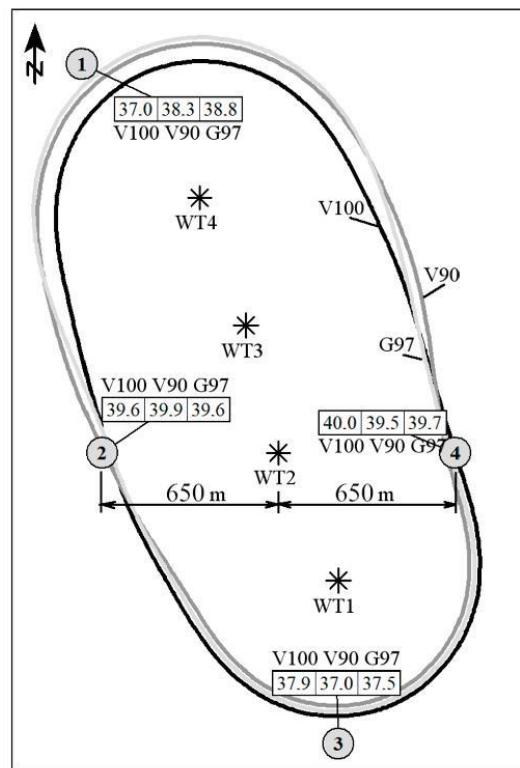


Figure 11. The final noise emission range map.

The final energy analysis was then carried out. Figures 12 and 13 show the productivity of individual turbines depending on wind speed after the applied reductions of acoustic power of the V90 and G97 turbines.

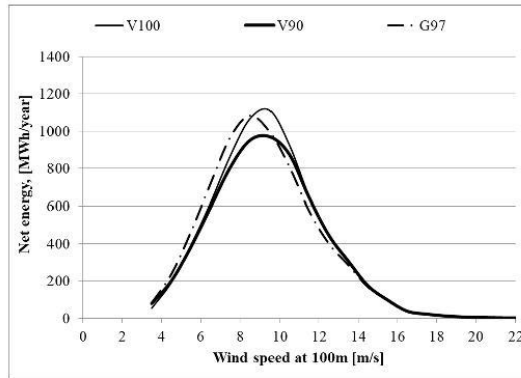


Figure 12. The final level of energy supplied to the power grid by the wind turbines as a function of the wind speed, farm A.

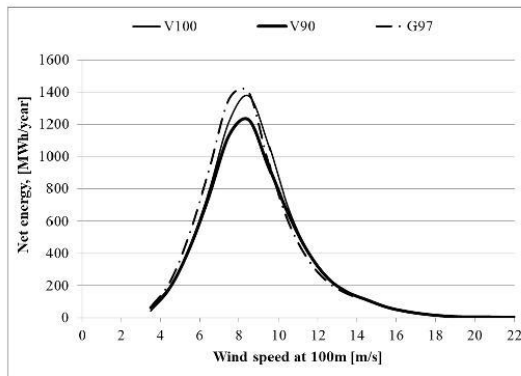


Figure 13. The final level of energy supplied to the power grid by the wind turbines as a function of the wind speed, farm B.

Figures 14 and 15 graphically show the amount of network energy generated per year by the entire WF consisting of a specific type of turbine after the reduction of the sound power. The energy productivity of the V90 (WT1, WT2) and G97 (WT1, WT2, WT3) turbines was reduced.

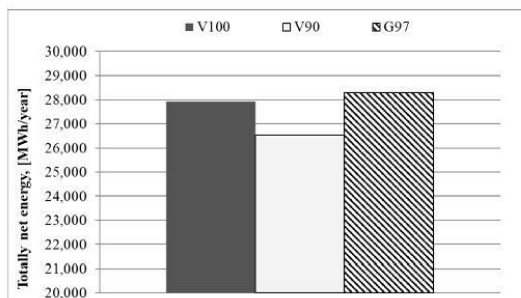


Figure 14. The final level of energy supplied to the power grid by the wind farm A.

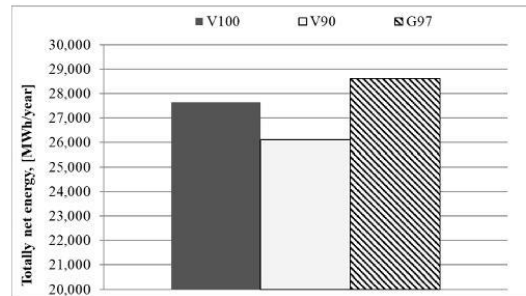


Figure 15. The final level of energy supplied to the power grid by the wind farm B.

Analyzing Figures 14 and 15, it can be concluded that in both studied WF locations the highest productivity of the whole farm was guaranteed by the G97 turbines. However, in the case of farm A location, the productivity of the G97 turbines was not significantly higher than that of the V100 turbines and amounted to about 350 MWh per year. Taking into account the average land-based energy production cost of WF [2], which was \$60/MWh in 2017, the difference between the productivity of WF G97 and WF V100 is \$21,000 per year. Therefore, the decisive criterion for selecting a wind turbine may be, for example, the cost of equipment purchasing, transport costs, terms of guarantee, or servicing the equipment.

The comparison of the energy analyses for the first (Section 3.1) and second (Section 4) design, showed the influence of the acoustic power reduction methods on the productivity efficiency of the selected turbines. Despite the fact that for both locations the highest productivity had WF consisting of G97 turbines, at the same time the G97 suffered from the highest loss of an annual energy generation. Figures 8 and 14 as well as Figures 9 and 15 show that for the four G97 turbines the energy loss was more than 10,000 MWh/year. For the case of the WF consisting of V100 turbines, no energy loss was noticed. For the case of WF consisting of V90 turbines, the energy loss was negligible in the context of the present research.

5. Conclusions

The method proposed in the paper for conducting energy and acoustic analyses together provides the investor with a lot of information about the analyzed equipment. It allows selecting or changing the type of equipment at any subsequent stage of wind farm design. The WF design process usually takes several years. At the end of the process, it may turn out that a certain turbine type is not available for sale. With the analysis proposed in this paper, the originally selected device can be changed quickly. The correct wind turbine selection process for a given site should be as follows:

- no available device is excluded during preliminary energy analyses;
- a noise impact analysis is performed for all selected devices;
- after noise analysis, WF productivity is re-evaluated; and
- a ranking list of analyzed devices is prepared as a result.

This paper presents the method of wind turbine selection on the basis of registered annual wind measurements, taking into account the environmental conditions of the investment. Wind measurements showed the usefulness of the tested locations in terms of their use for the construction of a wind farm. Six types of wind turbines of different power capacities were examined. It was indicated which turbines ensure the best use of wind resources in the studied locations. It turned out that the least efficient turbines in the studied locations would be those with a nominal capacity of 2.3–2.5 MW. Due to the hourly distribution of individual wind speeds, 2 MW turbines turned out to be the most energy efficient. The lowest productivity of the W2E100/2.55 turbine was a surprise, as it had the largest rotor and the highest nominal output. The application of the G97 turbine for both locations will result in the highest electric power generation.

A properly conducted measurement campaign minimizes uncertainty and provides high-quality information about wind conditions. Equally important is the accurate identification of environmental constraints. The influence of WT in the environment will be estimated for each design layout of the wind farm. The above will be supported by precise descriptions of the devices used. Taking into account both above criteria, it is possible to choose wind turbines that will bring the best economic and ecological effect when combined in a wind park. Based on simple designs of WFs, it was shown that an extensive analysis involving many devices (turbines) allows for more efficient investment decision making. The study showed a significant impact of environmental noise limits on the actual amount of energy generated by WF. Limiting the acoustic power of a wind turbine in most cases entails a reduction of the WF productivity. The obtained results imply that the amount of power generated to the grid may be significantly lower than originally assumed if the acoustic limitations are taken into account.

Author Contributions: Conceptualization, A.Z. and M.W.; methodology, A.Z.; software, A.Z.; validation, A.Z. and K.W.; formal analysis, A.Z. and M.W.; resources, K.W.; data curation, K.W.; writing—original draft preparation, A.Z.; writing—review and editing, M.W.; visualization, K.W.; supervision, A.Z.; project administration, M.W. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Data available on the request.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Nomenclature

A_f	area of air flow, m^2
A	Weibull scale parameter, m/s
$E_{we,i}$	wind energy for the i -th speed range, Wh
E_{we}	total wind energy, Wh
L_{Aeq}	A-weighted equivalent sound level, dB
L_{A90}	A-weighted 90th percentile of broadband sound levels, dB
P_w	wind power, W
$P_{we,i}$	unit of wind power obtained in the i -th speed range, W/m^2
P_0	the reference value of 2×10^{-5} , Pa
P	the RMS value of the sound pressure, Pa
T_Y	1 year expressed in hours, 8760 h
T	time interval, s
f_i	frequency of wind speed falling within the i -th range,
k	Weibull shape factor,
ρ	air density, m^3/kg
v	wind speed, m/s
v_{av}	average wind speed range, m/s
v_i	i -th wind speed range, m/s

References

1. WWW.dtu.dk. Available online: <https://windenergy.dtu.dk/english/research/publicationslist?dtulistcode=ISTLIST46&fr=1&mr=100&ptype=all&qt=DtuPublicationQuery> (accessed on 27 October 2021).
2. U.S. EIA. *International Energy Outlook 2019 with Projections to 2050*; Office of Energy Analysis U.S. Department of Energy: Washington, DC, USA, 2019.
3. ECA. *Wind and Solar Power for Electricity Generation: Significant Action Needed If EU Targets to be Met*; Special Report No 08/2019; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2019.

4. Enevoldsen, P.; Permien, F.H.; Bakhtaoui, I.; von Krauland, A.K.; Jacobson, M.; Xydis, G.; Sovacool, B.; Valentine, S.; Luecht, D.; Oxley, G. How much wind power potential does Europe have? Examining European wind power potential with an enhanced socio-technical atlas. *Energy Policy* **2019**, *132*, 1092–1100. [[CrossRef](#)]
5. Letcher, T.M. *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*, 1st ed.; Academic Press: Cambridge, MA, USA; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2017.
6. Ehrlich, R.; Geller, H.A. *Renewable Energy: A First Course*, 2nd ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2018.
7. Zagubień, A.; Wolniewicz, K. The impact of supporting tower on wind turbine noise emission. *Appl. Acoust.* **2019**, *5*, 260–270. [[CrossRef](#)]
8. Celik, A. Energy output estimation for small scale wind power generators using Weibull representative wind data. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* **2003**, *91*, 693–707. [[CrossRef](#)]
9. Wais, P. Two and three-parameter Weibull distribution in available wind power analysis. *Renew. Energy* **2017**, *103*, 15–29. [[CrossRef](#)]
10. Hansen, J.; Mahak, M.; Tzanakis, I. Numerical modelling and optimization of Vertical Axis Wind Turbine pairs: A scale up approach. *Renew. Energy* **2021**, *171*. [[CrossRef](#)]
11. IEC 61400-12-1:2005 *Wind Turbines: Part 21-1: Power Performance of Electricity Producing Wind Turbines*; IEC: Geneva, Switzerland, 2005.
12. Jakubowski, M.; Mech, Ł.; Wolniewicz, K. A methodology of wind turbines selection for the given wind conditions. *J. Mech. Energy Eng.* **2017**, *1*, 171–178.
13. Wolniewicz, K.; Kuczyński, W.; Zagubień, A. Method for wind turbine selection basing on in-field measurements. *J. Mech. Energy Eng.* **2019**, *3*, 77–84. [[CrossRef](#)]
14. Burton, T.; Sharoe, D.; Jenkins, N.; Bossanyi, E. *Wind Energy Handbook*; John Wiley & Sons Ltd.: Hoboken, NJ, USA, 2001. [[CrossRef](#)]
15. Kurpas, D.; Mroczek, B.; Karakiewicz, B.; Kassolik, K.; Andrzejewski, W. Health impact of wind farms. *Ann. Agric. Environ. Med.* **2013**, *20*, 595–605. [[PubMed](#)]
16. Liu, W.Y. A review on wind turbine noise mechanism and de-noising techniques. *Renew. Energy* **2017**, *108*, 311–320. [[CrossRef](#)]
17. Regional WHO. *Office for Europe: Burden of Disease from Environmental Noise. Quantification of Healthy Life Years Lost in Europe*; World Health Organization: Copenhagen, Denmark, 2011.
18. Lee, J.T.; Kim, H.G.; Kang, Y.H.; Kim, J.Y. Determining the optimized hub height of wind turbine using the wind resource map of South Korea. *Energies* **2019**, *12*, 2949. [[CrossRef](#)]
19. Van den Berg, G.P. Wind turbine power and sound in relation to atmospheric stability. *Wind Energy* **2008**, *11*, 151–169. [[CrossRef](#)]
20. Wharton, S.; Lundquist, J.K. Assessing atmospheric stability and its impacts on rotor-disk wind characteristics at an onshore wind farm. *Wind Energy* **2012**, *15*, 525–546. [[CrossRef](#)]
21. Zagubień, A.; Ingielewicz, R. The analysis of similarity of calculation results and local measurements of wind farm noise. *Measurement* **2017**, *106*, 211–220. [[CrossRef](#)]
22. Manwell, J.F.; McGowan, J.G.; Rogers, A.L. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2009.
23. Yang, K.; Kwak, G.; Cho, K.; Huh, J. Wind farm layout optimization for wake effect uniformity. *Energy* **2019**, *183*, 983–995. [[CrossRef](#)]
24. Wu, X.; Hu, W.; Huang, Q.; Chen, C.; Chen, Z.; Blaabjerg, F. Optimized Placement of Onshore Wind Farms Considering Topography. *Energies* **2019**, *12*, 2944. [[CrossRef](#)]
25. Rajper, S.; Amin, I. Optimization of wind turbine micro-siting: A comparative study. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2012**, *16*, 5485–5492. [[CrossRef](#)]
26. Wais, P. A review of Weibull functions in wind sector. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2017**, *70*, 1099–1107. [[CrossRef](#)]
27. ISO 9613-2:1996. *Acoustics—Attenuation of Sound during Propagation Outdoors Part 2: General Method of Calculation*; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1996.
28. Evans, T.; Cooper, J. Comparison of predicted and measured wind farm noise levels and implications for assessments of new Wind Farm. *Acoust. Aust.* **2012**, *40*, 28–36.
29. Prospathopoulos, J.M.; Voutsinas, S.G. Application of a ray theory model to the prediction of noise emissions from isolated wind turbines and wind parks. *Wind Energy* **2007**, *10*, 103–119. [[CrossRef](#)]
30. Van den Berg, G.P. Effects of the wind profile at night on W/T sound. *J. Sound Vib.* **2004**, *277*, 955–970. [[CrossRef](#)]
31. Tonin, R. Sources of wind turbine noise and sound propagation. *Acoust. Aust.* **2012**, *40*, 20–27.
32. Vestas. *Document no. 0062-4192 V01*; VESTAS: Copenhagen, Denmark, 2018.
33. Vestas. *Document no. 0062-4191 V04*; VESTAS: Copenhagen, Denmark, 2017.
34. GE. *Commercial Documentation Wind Turbine Generator Systems GE 2.5—100 m Rotor 50 Hz & 60 Hz*; GE: Fairfield, Connecticut, USA, 2010.
35. W2E. *General Description W2E-100/2.5*; W2E: Rostock, German, 2008.
36. Enercon. *Document no. SIAS-04-SPL E-82 E2 OMI 2,3MW*; Enercon: Berlin, German, 2010.
37. Gamesa. *Document no. GD086484*; Gamesa: Zamudio, Spain, 2010.

**OŚWIADCZENIE AUTORÓW O WKŁADZIE W POWSTANIE PUBLIKACJI
NAUKOWEJ – Z4**

Kuczyński W., Wolniewicz K., Charun H. (2021). Analysis of the Wind Turbine Selection for the Given Wind Conditions, *Energies*, Vol. 14(22), 7740.
DOI: 10.3390/en14227740

Współautor	Udział procentowy	Indywidualny wkład współautora	Podpis
Waldemar Kuczyński	40%	Koncepcja badawcza; analiza formalna wyników badań; nadzór nad realizacją badań; przygotowanie tekstu	<i>Waldemar Kuczyński</i>
Katarzyna Wolniewicz	40%	Koncepcja badawcza; zapewnienie materiałów badawczych i oprzyrządowania; przeprowadzenie badań; analiza formalna wyników badań; wizualizacja danych; przygotowanie i redakcja tekstu; korekta artykułu	<i>Katarzyna Wolniewicz</i>
Henryk Charun	20%	Koncepcja badawcza; metodologia; administracja projektu	<i>dr inż. Henryk Charun</i> <i>2021.10.12. 2021.</i> <i>Henryk Charun</i>

Article

Analysis of the Wind Turbine Selection for the Given Wind Conditions

Waldemar Kuczyński ^{1,*}, Katarzyna Wolniewicz ^{2,*} and Henryk Charun ¹

¹ Department of Energy, Faculty of Mechanical Engineering, Koszalin University of Technology, ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin, Poland; henryk.charun@tu.koszalin.pl

² Environmental and Geodetic Sciences, Faculty of Civil Engineering, Koszalin University of Technology, ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin, Poland

* Correspondence: waldemar.kuczynski@tu.koszalin.pl (W.K.); kaja.wolniewicz@gmail.com (K.W.)

Abstract: The aim of the current paper is to present an approach to a wind turbine selection based on an annual wind measurements. The proposed approach led to a choice of an optimal device for the given wind conditions. The research was conducted for two potential wind farm locations, situated on the north of Poland. The wind measurements pointed out a suitability of the considered localizations for a wind farm development. Six types of wind turbines were investigated in each localization. The power of the wind turbines were in the range of 2.0 to 2.5 MW and with a medium size of the rotor being in the range of 82 to 100 m. The purpose of the research was to indicate a wind turbine with the lowest sensitivity to the variation of wind speed and simultaneously being most effective energetically. The Weibull density distribution was used in the analyses for three values of a shape coefficients k . The energy efficiency of the considered turbines were also assessed. In terms of the hourly distribution of the particular wind speeds, the most effective wind turbines were those with a nominal power of 2 MW, whereas the least effective were those with the nominal power of 2.3–2.5 MW. The novelty of the proposed approach is to analyze the productivity for many types of wind turbines in order to select the one which is the most effective energy producer. The analyses conducted in the paper allowed to indicate a wind turbine which generates the highest amount of energy independently on the wind speed variation.

Keywords: wind turbine; selection of wind turbines; energy-economic analysis



Citation: Kuczyński, W.; Wolniewicz, K.; Charun, H. Analysis of the Wind Turbine Selection for the Given Wind Conditions. *Energies* **2021**, *14*, 7740. <https://doi.org/10.3390/en14227740>

Academic Editor: Davide Astolfi

Received: 1 November 2021

Accepted: 16 November 2021

Published: 18 November 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Optimum usage of energy sources has become the priority for the majority of countries and regions. Considering that many countries have withdrawn from using raw fossil materials, the contribution of renewable energy generation forms will continue to grow stronger [1]. Research shows that the use of fossil fuels to obtain energy results in harmful air emissions, which impact global warming [2,3]. Authors of numerous forecasts state that the use of energy will continue to grow, and in the year 2050 it will reach a 50% higher level than the present one [4]. Production of energy based on fossil fuels will increase, but its growth will be considerably slower than the energy production from renewable sources. Renewable energy sources include wind, solar radiation, biomass, precipitation, marine tides, sea waves and geothermal energy. The most extensively used renewable source of energy is the gravitational energy of water. In 2018 it corresponded to 62.8% of energy from renewable sources. Other sources include wind (19.0%), solar energy (8.8%), biofuels (6.3%) and geothermal energy [5].

In the last two decades, wind energy has faced the greatest growth of resource use. It is also characterized by a rapid return on investment [6]. The popularity of wind energy around the world is linked to the general availability of the energy source, which is wind. The wind energy is generated without harmful emission of pollutants to the atmosphere, therefore it has minor impact on ecosystems [7–9]. A potential impact on the

avian fauna [10] and excessive noise generation exist [11–14]. However, the areas occupied by wind farms can still be used for agricultural and other purposes. It is also important that the wind farm can work as a part of a power system as well as working autonomously. The whole investment process lasts for about 2 years and gives the opportunity to select the farm output adapted to the needs and financial resources of the investor.

While choosing the land for wind farm construction it is crucial to find the one with the highest wind potential. The most desirable location is where the annual mean of the wind speed is more than 5 m/s [15,16]. Taken into consideration while deciding on the construction of the future wind farms are: topographic maps, identification of the land roughness and solid barriers, assumptions on wind conditions, selection of the height and power of the wind turbines.

The data below provides the average of the multi-annual (often 60-year) wind speed and demonstrates fluctuations of this speed over a long period of time (Figure 1).

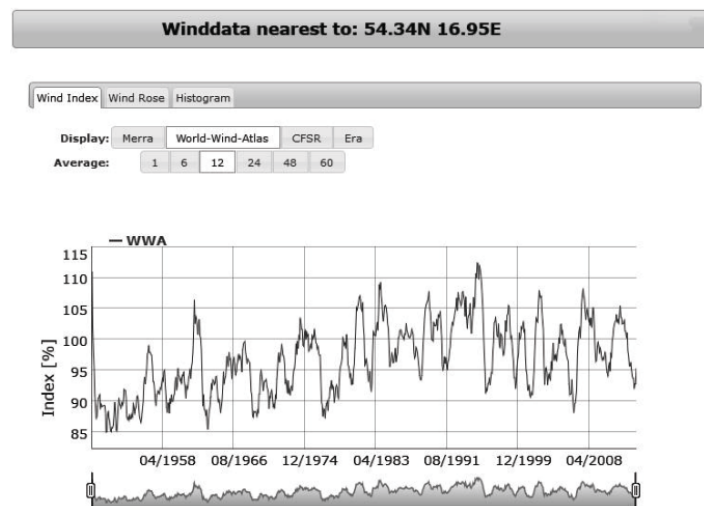


Figure 1. Multi-annual fluctuations of the mean of the wind speed (Farm A) [17].

In order to identify an area with the highest wind potential, the wind atlas can be used. It contains the long-term data about the wind characteristics e.g., speed, distribution and direction, that can be used for the further detailed analyses. These data are typically collected from local meteorological stations. Before the site of the future wind farm is chosen, the measurement campaign has to take place [18–20]. The measurement campaign consists of the wind study including measurements of wind speed, direction and air pressure, temperature and humidity measured at several heights above the ground, which last at least one year [21]. The most preferable site of these measurements is the height where the future impeller boss of the wind turbine will be situated. Obtaining the maximum energy performance of the future wind farm requires conducting of the reliable measurements of the wind speed in the selected locality. The reliable measurement results are obtained by using approved measurement procedures and certified measuring equipment [18,19]. The document, describing the proper measurement methodology for the purposes of financial analysis required by the bank, is issued by the International Electrotechnical Commission (IEC Switzerland-Geneva). The guidelines for the measurements are included in the IEC 61400-12-1 standard: Wind turbines: Part 21-1: Power performance of the electricity producing wind turbines [22]. Appendix G of the above norm contains guidelines for the correct installation of measurement equipment on a tube or truss-type meteorological tower. The guidelines included in the IEC 61400-12-1 [22] standard are said to be international practice for wind measurements. Only the measurements performed

with a tall measurement tower can be classified as reliable and therefore can be used in the further stages of the project in order to obtain full or partial project financing. The above is measured to the level of the rotor axis. For currently installing wind turbines this level is in the range of 120 to 160 m. Taking into consideration various aspects of the wind measurement procedure has an impact on reducing the risk of error or uncertainty in the subsequent stages of wind turbine's location design [19]. The measurements of the wind resources in the given location take into account the land form, natural and infrastructural barriers, land inclination and other factors affecting the wind. The wind analysis results in a histogram of the wind speed distribution at one meter/second intervals.

In order to increase the productivity of the wind farm it is crucial not only to install the most productive wind turbine but also to gain the precise knowledge about the characteristics of the wind in a particular location. A lot of experiments were carried out in order to analyze the potential of wind energy usage, considering different perspectives like localization and type of the wind turbine [23–26]. A significant part of scientific research is aimed at finding the optimal location of the wind farm for one type of wind turbine [27,28]. Other experiments are trying to find out the impact of turbines blades' shape [29] and environmental conditions on the productivity of wind farms [30]. The articles of DTU groups [31] present a wide scope of scientific research elaborating not only on case studies but also on the other solutions being commonly used in a field of wind energy.

It is already stated that it is possible to adjust the proper wind turbine for wide variations of wind conditions [32]. It is also known that the highest turbine with the biggest diameter does not have to be the most energetically productive in every kind of localization. This article also aims to adjust the most productive turbine to precise wind conditions. Two different localizations of wind farm were taken into consideration for the proper analysis as well as the six types of turbines, which are most commonly used in Europe, with their power ranging from 2.0 to 2.5 MW. The aim of the research was to find the turbine which is less sensitive to the variation of a wind speed distribution. That is why the density of Weibull's distribution was analyzed for three values of a shape factor k .

2. Problem Description

The objective of the conducted study was to select the wind turbine allowing obtaining the maximum economic result for the investment based on available annual wind measurements. Two locations for the wind farms were taken into consideration by the study, referred to as farm A and farm B, each with 120 m high wind turbine. Considering the available wind results at heights lower than the designed height of wind towers, the analyses were carried out in variants. The wind speed increases with height [33]. On the bases of the available data, the mean of the wind speed at 120 m height above the ground was calculated. The wind distribution was determined according to the Weibull probability density function [16] for three values of the k shape coefficient. Value of the A scale parameter was calculated on the basis of the mean of the wind speed and the selected k shape coefficient. Turbines with horizontal axis of rotation and nominal power of 2.0, 2.3 or 2.5 MW were selected. Table 1 lists wind turbines selected for the analysis.

Table 1. Parameters of investigated types of turbines.

Vendor/Model	Vestas/V100	Vestas/V90	Gamesa/G97	Enercon/E82	General Electric/GE2.5	Wind to Energy/W2E-100/2.55
Power, [MW]	2.0	2.0	2.0	2.3	2.5	2.5
Impeller diameter, [m]	100	90	97	82	88	100

The choice of the proper equipment is made on the bases of the measurement results and the characteristics of the wind turbine productivity. The device manufacturer demonstrates the relationship between the turbine power output and wind speed. However, data for different air density values are rarely presented. The device characteristics further includes information on the start speed of the turbine, nominal power output and maximum

wind speed resulting in device shutdown. The selected turbines have similar starting wind speed of 3.5 m/s. All of them shut down when the wind speed exceeds 25 m/s. The wind speed did not exceed 24 m/s in the selected locations, therefore turbine shutdown did not influence outcomes of the presented analyses. The P_{we_i} for wind speed v_i , being the middle of subsequent class ranges, can be estimated based on the characteristics of wind farm performance. Then, the E_{we_i} energy can be calculated, generated by the wind farm for one year in i -th class range [23]:

$$E_{we_i} = P_{we_i} \cdot t_i = P_{we_i} \cdot f_i \cdot T \quad (1)$$

By summing up the component energy from all ranges, the total energy generated for one year by the wind farm will be obtained E_{we} :

$$E_{we} = \sum_{i=1}^k E_{we_i} \quad (2)$$

3. Energy Analysis of Selected Wind Turbines

The main parameter that impacts selection of type of the wind turbine is not only the wind power available but also the distribution of the wind speeds in the tested location. These parameters determine the amount of energy generated, and thus income from investment.

3.1. Wind Power

The wind power, modelled as a gas, can be expressed with the following formula [23]:

$$P_w = \frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2} \quad (3)$$

The air density for the normal conditions (at temperature $t = 273$ K and pressure $p = 105$ Pa) equals $\rho = 1.2759$ kg/m³. In the wind power sector, the assumed temperature is $t = 15$ °C and the pressure $p = 1013$ hPa [34] for which the air density equals to $\rho = 1.225$ kg/m³. Assuming the unit flow area $A = 1$ m², the unit wind power obtained in the i -th speed range P_{we_i} can be expressed using the following formula:

$$P_{we_i} = 0.6125 \cdot v_i^3 \quad (4)$$

Based on Equations (1)–(4), wind power and energy resources can be calculated for the tested location. The annual average wind speed for farm A is $v_{av} = 6.61$ m/s, for farm B $v_{av} = 6.72$ m/s. A preliminary assessment of the result shows that every year in the tested locations a stream of wind passes through the surface area of 1 m² carrying a maximum energy of 2053 kW/m² for farm A and 2169 kW/m² for farm B. Despite the fact that in both locations the values of average wind speed are similar, they differ in the distribution of the individual wind speed classes.

3.2. Wind Speed Distribution in Selected Locations

The following analysis used the results of the wind measurements performed in future locations for two wind farms in northern Poland. The two future farms are separated by a distance of over 100 km. Accuracy and correctness for the validation and analysis of measurement data are key determinants for the applicability of the given location in terms of its wind potential. The basic objective of the final report from wind measurements is the summary of the period of measurement and presentation of the results in graphic or tabular form. Construction of wind turbines with the tower height of 120 m above the ground was assumed. As a result of the performed measurement campaign, average wind speeds were obtained, listed in Table 2.

Table 2. Wind speed results obtained from measurements.

Farm A		Farm B	
Measuring Height, m	Wind Speed, m/s	Measuring Height, m	Wind Speed, m/s
35	495	30	493
65	579	58	576
98	644	60	583
100	658	-	-

Interaction between the terrain surface and air movement results in wind speed values varying with height. The vertical profile of wind speed is strongly linked to the land type. Flat areas produce lower wind disturbance than built-up areas [35–37]. In wind energy, the wind profile is typically explained according to the Equation (5) or (6):

$$\frac{v_1}{v_{ref}} = \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^\alpha \quad (5)$$

$$\frac{v_1}{v_{ref}} = \frac{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_{ref}}{z_0}\right)} \quad (6)$$

After the Equation (5) was transformed, the α time exponent was calculated. After substitution of measurement data listed in Table 2, its mean value was determined

$$\alpha = \frac{\log \frac{v}{v_{ref}}}{\log \frac{h}{h_{ref}}} \quad (7)$$

for both locations. For farm A, $\alpha = 0.256$ was obtained, whereas for farm B $\alpha = 0.237$. Subsequently, average wind speed at $h = 120$ m was calculated with the use of Equation (5) for both locations. For farm A the average wind speed was $v_{1A} = 6.79$ m/s and $v_{1B} = 6.87$ m/s for farm B. The values of α exponent described for rural areas in the literature [35,38] range from 0.17 to 0.25. Value 0.25 concerns areas with low number of trees, suburbs of large cities, neighboring villages and undulating areas, which is in line with the actual state of both locations. By determining the mean wind speed with the use of Equation (6), we assumed $z_0 = 0.25$ m, which corresponds to a location near a village, rows of trees, scattered buildings and high cultivation areas [38]. The obtained average wind speed values at the height of 120 m were $v_{1A} = 6.43$ m/s for farm A and $v_{1B} = 6.57$ m/s for farm B. For further analyses average values from both estimations were assumed and the final average values were established at $v_{1A} = 6.61$ m/s and $v_{1B} = 6.72$ m/s.

Maximum heights of the wind measurements for both farms were lower than the planned height of wind turbine towers. Knowing the average wind speed at the desired height (120 m), the wind speed distribution was generated using two-parameter Weibull function. It must be noted that the provided parameters are a mathematical result. Though different wind speed distribution models are applied to fit the wind speed over a time period, the two-parameter Weibull function is accepted as the most popular technique [38].

The two-parameter Weibull probability density function is expressed by:

$$p(v) = \left(\frac{k}{A} \right) \left(\frac{v}{A} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k} \quad (8)$$

where $v, k, A > 0$.

Dimensionless factor k determines the shape of the curve and is called a shape factor. Parameter A is the scale parameter. The distributions take different shapes with different values of k and A . Parameter k specifies the shape of a Weibull distribution and takes on a value of between 1 and 3. A small value for k signifies very variable winds, while constant

winds are characterized by a larger k . Parameter A was calculated on the basis of the following relationship:

$$A = \frac{v}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \tag{9}$$

With the wind speed distributions at the measured height (Table 2) being available, the Weibull distribution was adjusted to them. It was established that the k parameter shape ranges in both locations from 2.1 to 2.5. Further analysis was conducted for three k parameter values, that is: 2.1, 2.3 and 2.5. Figures 2 and 3 show Weibull probability density function results for both locations.

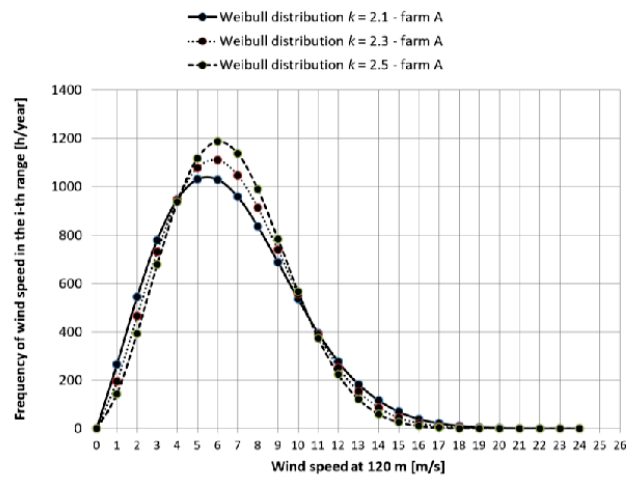


Figure 2. The Weibull distribution for high at 120 m above ground level—farm A.

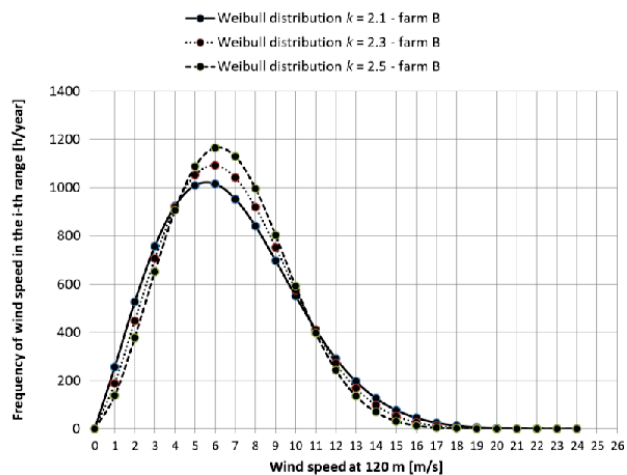


Figure 3. The Weibull distribution for high at 120 m above ground level—farm B.

Percentage results obtained from the probability density function were multiplied by 8760 (total number of hours per year) in each wind speed class. Thus, the number of hours per year for each speed class were obtained.

3.3. Wind Turbine Selection

Selection of wind turbine type and estimation of its energy performance for both locations was obtained based on the wind speed distribution histogram—Figures 2 and 3. The calculations were performed considering the wind turbine characteristics provided by manufacturer, presenting the relationship between turbine power and wind speed—Table 3.

Table 3. Wind turbines specifications.

Wind Speed, [m/s]	Power, [kW]					
	V100	V90	G97	E82	GE2.5	W2E-100/2.55
0.50	-	-	-	-	-	-
1.50	-	-	-	-	-	-
2.50	-	-	-	-	-	-
3.50	62	91	94	82	53	43
4.50	192	200	236	174	153	93
5.50	371	362	438	321	304	229
6.50	612	588	714	532	517	434
7.50	955	889	1084	815	800	713
8.50	1398	1256	1507	1180	1156	1086
9.50	1835	1637	1817	1580	1616	1562
10.50	1980	1904	1951	1890	2061	2061
11.50	1999	1988	1990	2100	2366	2411
12.50	2000	1999	1998	2250	2477	2500
13.50	2000	2000	2000	2350	2498	2500
14.50	2000	2000	2000	2350	2500	2500
15.50	2000	2000	2000	2350	2500	2500
16.50	2000	2000	2000	2350	2500	2500
17.50	2000	2000	2000	2350	2500	2500
18.50	2000	2000	2000	2350	2500	2500
19.50	2000	2000	2000	2350	2500	2500
20.50	2000	2000	2000	2350	2500	2500
21.50	2000	2000	1906	2350	2500	2500
22.50	2000	2000	1681	2350	2500	2500

The available wind turbines power depends, among others, on the air density [38,39], which is a function of pressure and temperature—Equation (10).

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (10)$$

Change in the pressure with altitude can be presented with Equation (11).

$$p = 101.29 - 0.011837 \times h + 4.793 \times 10^{-7} \times h^2 \quad (11)$$

Based on the measurement data, it was determined that the temperature gradient in the studied locations is 0.5 K every 100 m, whereas air density in these locations is approximately $\rho = 1.24 \text{ kg/m}^3$. Unfortunately, wind turbine manufacturers rarely provide the performance of their devices for different air density values. Out of the selected range of turbines, only half were provided with such information. In the majority of devices, the power curve for air density $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ is presented. Not willing to restrict the analysis to three devices, further calculations were conducted for air density of $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$.

Considering the Weibull distributions (Figures 2 and 3) and the power curves of the selected turbines listed in Table 3, Figures 4–9 show the distribution of the wind turbine performance in the studied locations for the different k parameters.

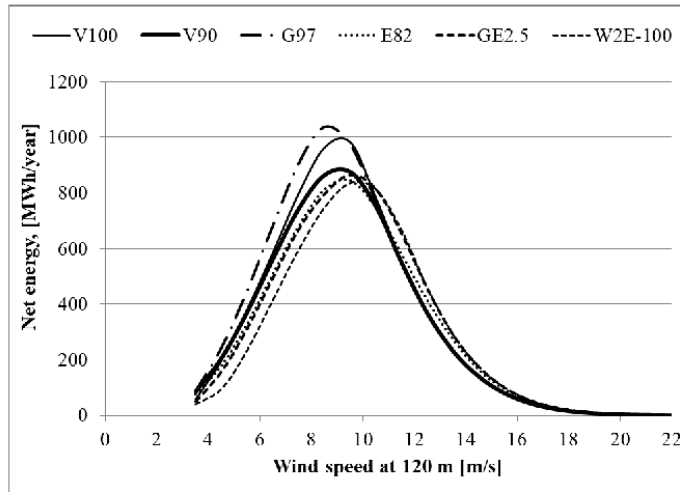


Figure 4. Amount of the energy supplied to the power grid by the wind turbines as a function of the wind speed $k = 2.1$ —farm A.

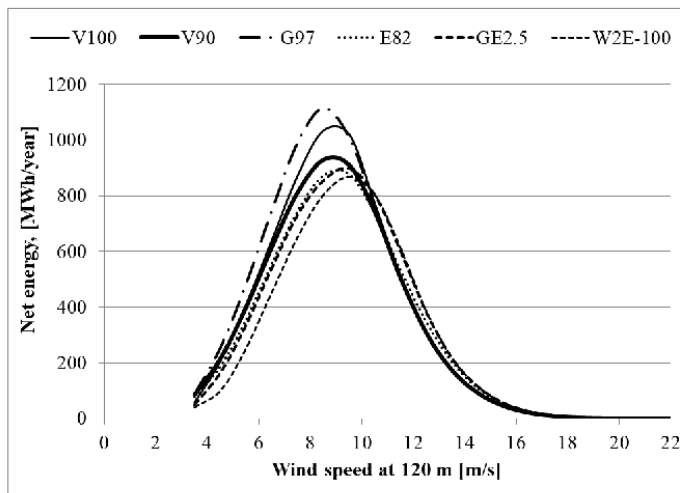


Figure 5. Amount of energy supplied to the power grid by the wind turbines as a function of the wind speed $k = 2.3$ —farm A.

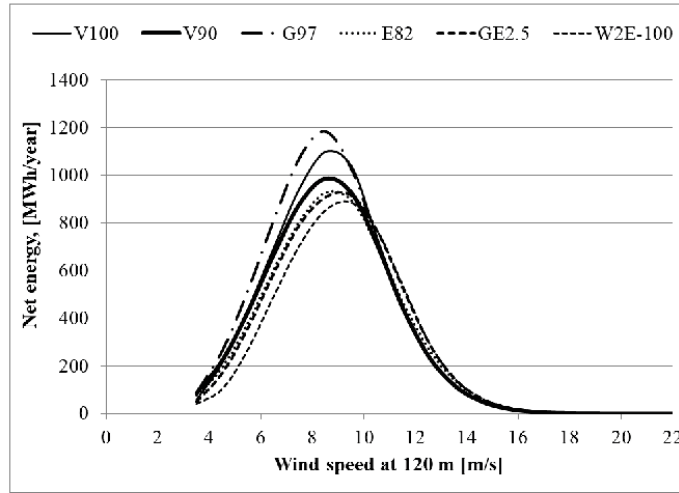


Figure 6. Amount of energy supplied to the power grid by the wind turbines as a function of the wind speed $k = 2.5$ —farm A.

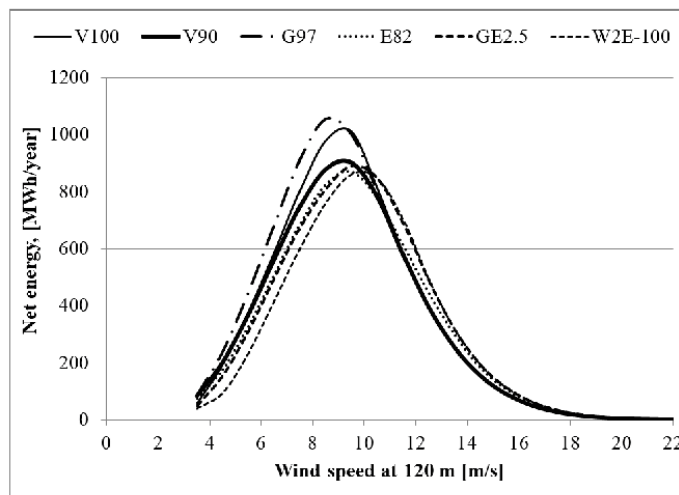


Figure 7. Amount of energy supplied to the power grid by the wind turbines as a function of the wind speed $k = 2.1$ —farm B.

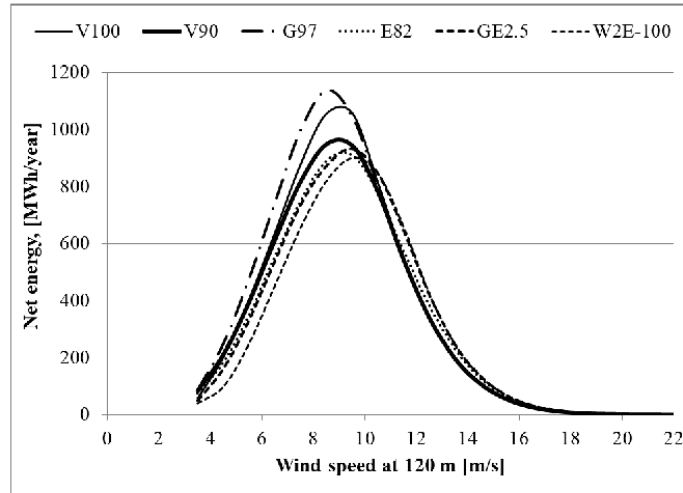


Figure 8. Amount of energy supplied to the power grid by the wind turbines as a function of the wind speed $k = 2.3$ —farm B.

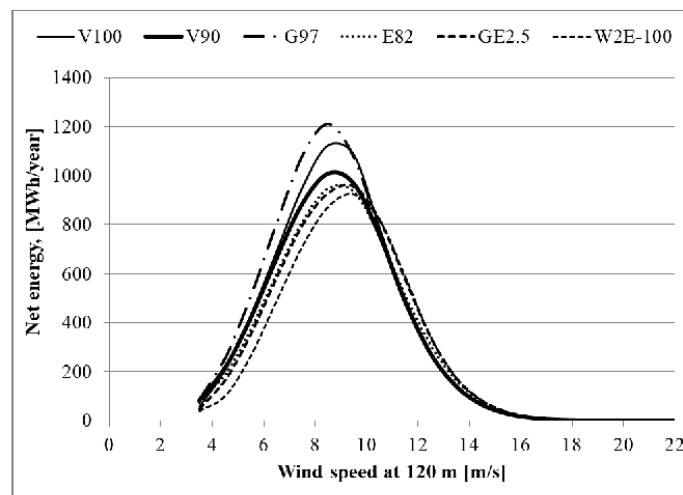


Figure 9. Amount of energy supplied to the power grid by the wind turbines as a function of the wind speed $k = 2.5$ —farm B.

Figures 10 and 11 list annual turbine performance for each location depending on k parameter value.

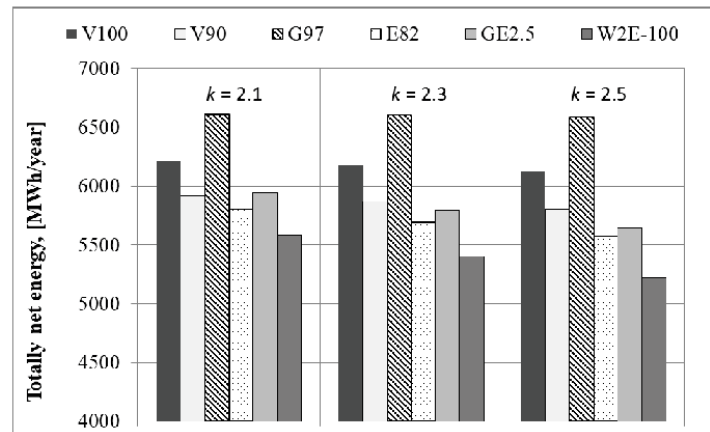


Figure 10. Amount of energy supplied to the power grid by the wind turbine—farm A.

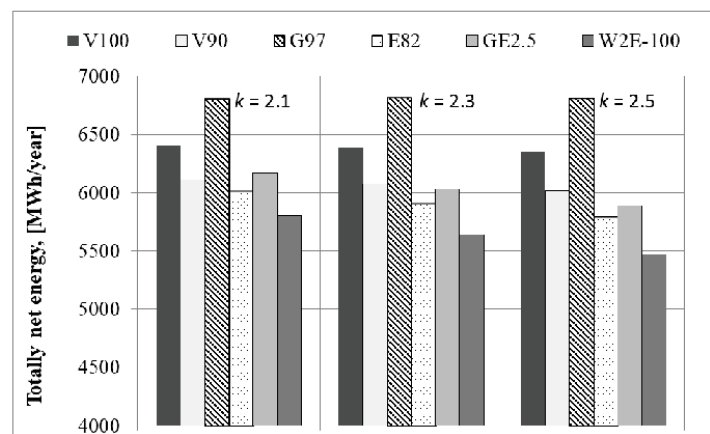


Figure 11. Amount of energy supplied to the power grid by the wind turbine—farm B.

4. Results and Discussion

Analyses discussed in the Section 3 allowed obtaining data concerning the performance of the selected wind turbines. The G97 turbine turned out to be a clear leader in the studied locations. It generated the highest amount of energy that was supplied to the power grid, independently of the shape parameter k . The lowest productivity in the tested locations was demonstrated by the W2E-100 turbine. Figures 12 and 13 demonstrate Weibull distribution and power production distribution, as well as power curves for the G97 and W2E-100 turbine. Data analysis indicates that the W2E-100 turbine attains its maximum power output at 13 m/s wind speed. This is considerably beyond the maximum power production capacity in the selected locations. The G97 attains the maximum power output for the wind speed of 11 m/s, which enables it to achieve higher performance.

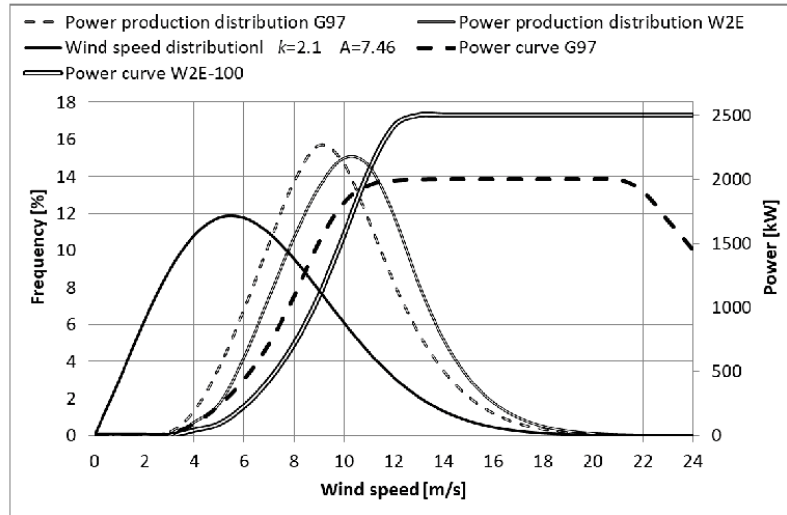


Figure 12. The power production distribution and the wind turbine power curves—farm A.

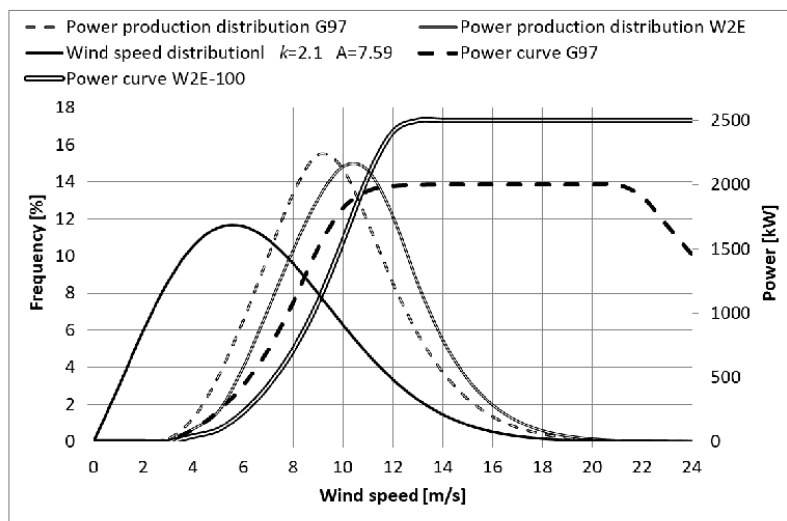


Figure 13. Power production distribution and wind turbine power curves—farm B.

Table 4 lists performance coefficients of the analyzed wind turbines depending on the assumed k shape coefficient. The energy performance coefficient is the quotient of the actual annual production and the technically possible maximum energy production of a wind turbine. It should be noted that the wind turbines are not designed to maximize the energy performance coefficient, but rather to generate the highest possible power at determined wind speeds. Performance coefficients of 30–40% are considered very high in coastal areas.

Table 4. Energy performance coefficients.

Location	Performance Coefficient, [%]					
	V100	V90	G97	E82	GE2.5	W2E-100/2.55
<i>k</i> = 2.1						
Farm A	39.5	34.1	38.3	28.7	27.1	25.5
Farm B	40.4	35.0	39.2	29.5	28.2	26.5
<i>k</i> = 2.3						
Farm A	39.6	33.9	38.3	28.1	26.5	24.7
Farm B	40.8	35.0	39.4	29.2	27.5	25.7
<i>k</i> = 2.5						
Farm A	39.6	33.5	38.2	27.6	25.7	23.8
Farm B	40.8	34.7	39.4	28.6	26.9	25.0

The average cost of energy production for land wind turbines in 2017 was 60 \$/MWh [2]. Table 5 lists annual income from energy production of the presented turbines depending on the assumed *k* shape coefficient.

Table 5. Income generated by wind turbines.

Location	Income, [Thousand \$]					
	V100	V90	G97	E82	GE2.5	W2E-100/2.55
<i>k</i> = 2.1						
Farm A	372	355	397	349	356	335
Farm B	384	367	408	348	370	348
<i>k</i> = 2.3						
Farm A	371	352	397	342	348	324
Farm B	383	364	409	355	362	338
<i>k</i> = 2.5						
Farm A	367	348	395	334	338	313
Farm B	381	361	409	348	353	328

The maximum difference between financial profit from G97, and W2E-100 amounted to 82,000\$ per year. The difference in financial profit gained from energy production by these two wind turbines will reach 1,640,000\$, while 20 years of their functioning.

And the maximum difference between financial profit from G97 and V100 is 28,000\$ per year. In the period of 20 years, the income from the G97 turbine will increase by 560,000\$. In this case, the winner is not as obvious. Purchase cost as well as service costs may be of significance when selecting the device.

The necessary specifications of the analyzed wind turbines were obtained from manufacturer technical specifications [40–45].

5. Conclusions

The present study demonstrated the manner in which wind turbine is selected on the basis of recorded annual wind measurements, with the emphasis on the obtaining the maximum financial benefits. The wind measurements demonstrated applicability of the tested locations in terms of their use as the construction site of a wind farm. Six types of wind turbines with different power outputs were tested. Turbines ensuring best usage of the wind energy resources in the studied locations have been indicated. Considering the hourly distribution of individual wind speeds, 2 MW turbines turned out to be the most energy efficient. The turbines with nominal power output of 2.3–2.5 MW demonstrated poorest performance in the tested locations.

The wind characteristics shall be analyzed for the site, where the wind turbine is to be located. Possible errors of performance estimation may stem from inaccurate prediction of the processed energy. In general, the wind measurements are performed at several heights, but typically below the height of the wind turbine boss. The calculation of the average wind speed value to a different height requires a precise analysis of the land topography. An incorrect assumption of the roughness index may result in overestimation or underestimation of the future wind farm performance.

The k Weibull shape coefficient has less pronounced impact on the distribution of individual wind speeds. At the same time, it has been demonstrated that a well selected wind turbine can be less sensitive to changes of the k coefficient. The analysis was performed on the basis of a one-year distribution of wind speed. It is a known fact that wind distribution will vary in time of wind turbines operation, and that it will oscillate around the multi-annual average value.

Author Contributions: Conceptualization, W.K., K.W. and H.C.; methodology, H.C.; software, K.W.; validation, W.K. and K.W.; formal analysis, W.K. and K.W.; resources, K.W.; data curation, K.W.; writing—original draft preparation, W.K. and K.W.; writing—review and editing, K.W.; visualization, K.W.; supervision, W.K.; project administration, H.C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Data available on the request.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Nomenclature

A_f	area of air flow, m^2
A	Weibull scale parameter, m/s
$E_{we,i}$	wind energy for the i -th speed range, Wh
E_{we}	total wind energy, Wh
P_w	wind power, W
$P_{we,i}$	unit wind power obtained in the i -th speed range, W/m^2
p	air pressure change, kPa
R	gas constant 287.03, $J/(kg\ K)$
T	one year expressed in hours, 8760 h
f_i	frequency of wind speed falling within the i -th range
h	height, m
h_{ref}	height of wind measurement, m
k	Weibull shape factor,
v_{av}	average wind speed range, m/s
v_i	i -th wind speed range, m/s
v	wind speed, m/s
v_1	wind speed at height h , m/s
v_{ref}	mean wind speed at height h_{ref} , m/s
z_0	terrain roughness parameter
Greek symbols	
Γ	the Gamma function,
α	time exponent, parameter that depends on the terrain type,
ρ	air density, m^3/kg

References

1. ECA. *Wind and Solar Power for Electricity Generation: Significant Action Needed If EU Targets to be Met. Special Report No 08/2019*; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2019.
2. Kuang, Y.; Zhang, Y.; Zhou, B.; Li, C.; Cao, Y.; Li, L.; Zeng, L. A review of renewable energy utilization in islands. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2016**, *59*, 504–513. [CrossRef]
3. Boczar, T. *Wind Power. Current Potential*; Measurement Automation and Monitoring: Gliwice, Poland, 2008.
4. U.S. EIA. *International Energy Outlook 2019 with Projections to 2050*; Office of Energy Analysis U.S. Department of Energy: Washington, DC, USA, 2019.
5. BP. *BP Statistical Review of World Energy 2019*, 68th ed.; Pureprint Group Limited: London, UK, 2019.
6. GWEC. *Global Wind Statistics 2017*; Global Wind Energy Council: Brussels, Belgium, 2018.
7. Kurpas, D.; Mroczek, B.; Karakiewicz, B.; Kassolik, K.; Andrzejewski, W. Health impact of wind farms. *Ann. Agric. Environ. Med.* **2013**, *20*, 595–605.
8. Letcher, T.M. *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*, 1st ed.; Academic Press: Cambridge, MA, USA; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2017.
9. Ehrlich, R.; Geller, H.A. *Renewable Energy: A First Course*, 2nd ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2018.
10. Drewitt, A.L.; Langston, R.H.W. Assessing the impact of wind farms on birds. *Int. J. Avian Sci.* **2006**, *148*, 29–42. [CrossRef]
11. Zagubień, A.; Ingielewicz, R. The analysis of similarity of calculation results and local measurements of wind farm noise. *Measurement* **2017**, *106*, 211–220. [CrossRef]
12. Zagubień, A.; Wolniewicz, K. The impact of supporting tower on wind turbine noise emission. *Appl. Acoust.* **2019**, *5*, 260–270. [CrossRef]
13. Liu, W.Y. A review on wind turbine noise mechanism and de-noising techniques. *Renew. Energy* **2017**, *108*, 311–320. [CrossRef]
14. Zagubień, A. Analysis of acoustic pressure fluctuation around wind farms. *Pol. J. Environ. Stud.* **2018**, *27*, 2843–2849. [CrossRef]
15. Celik, A. Energy output estimation for small scale wind power generators using Weibull representative wind data. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* **2003**, *91*, 693–707. [CrossRef]
16. Wais, P. Two and three-parameter Weibull distribution in available wind power analysis. *Renew. Energy* **2017**, *103*, 15–29. [CrossRef]
17. World-Wind-Atlas: 60+ Years Wind Data. Available online: <https://sander-partner.com/en/products/wwa.html> (accessed on 20 May 2021).
18. Jakubowski, M.; Mech, Ł.; Wolniewicz, K. A methodology of wind turbines selection for the given wind conditions. *J. Mech. Energy Eng.* **2017**, *1*, 171–178.
19. Emeksiz, C.; Cetin, T. In case study: Investigation of tower shadow disturbance and wind shear variations effects on energy production, wind speed and power characteristics. *Sustain. Energy Technol. Assess.* **2019**, *35*, 148–159. [CrossRef]
20. Wolniewicz, K.; Kuczyński, W.; Zagubień, A. Method for wind turbine selection basing on in-field measurements. *J. Mech. Energy Eng.* **2019**, *3*, 77–84. [CrossRef]
21. Wharton, S.; Lundquist, J.K. Assessing atmospheric stability and its impacts on rotor-disk wind characteristics at an onshore wind farm. *Wind Energy* **2012**, *15*, 525–546. [CrossRef]
22. IEC 61400-12-1:2005. *Wind Turbines: Part 21-1: Power Performance of Electricity Producing Wind Turbines*; IEC: Geneva, Switzerland, 2005.
23. Sanchez Gomez, M.; Lundquist, J. The effect of wind direction shear on turbine performance in a wind farm in central Iowa. *Wind Energy Sci. Discuss.* **2020**, *5*, 125–139. [CrossRef]
24. Jimoh, A.G.; Munda, J.L.; Agee, J. Wind distribution and capacity factor estimation for wind turbines in the coastal region of South Africa. *Energy Convers. Manag.* **2012**, *64*, 614–625. [CrossRef]
25. Adaramola, M.S.; Agelin-Chaab, M.; Paul, S.S. Assessment of wind power generation along the coast of Ghana. *Energy Convers. Manag.* **2014**, *77*, 61–69. [CrossRef]
26. Quan, P.; Thananchai, L. Assessment of wind energy potential for selecting wind turbines: An application to Thailand. *Sustain. Energy Technol. Assess.* **2015**, *11*, 17–26. [CrossRef]
27. Solangi, Y.; Tan, Q.; Waris, M.; Mirjat, N.; Ahmad, I. The Selection of Wind Power Project Location in the Southeastern Corridor of Pakistan: A Factor Analysis, AHP, and Fuzzy-TOPSIS Application. *Energies* **2018**, *11*, 1940. [CrossRef]
28. Zalewska, J.; Damaziak, K.; Malachowski, J. An Energy Efficiency Estimation Procedure for Small Wind Turbines at Chosen Locations in Poland. *Energies* **2021**, *14*, 3706. [CrossRef]
29. Yang, K. Geometry Design Optimization of a Wind Turbine Blade Considering Effects on Aerodynamic Performance by Linearization. *Energies* **2020**, *13*, 2320. [CrossRef]
30. Wolniewicz, K.; Zagubień, A.; Wesolowski, M. Energy and Acoustic Environmental Effective Approach for a Wind Farm Location. *Energies* **2021**, *14*, 7290. [CrossRef]
31. WWW.dtu.dk. Available online: <https://windenergy.dtu.dk/english/research/publicationslist?dtulistcode=ISTLIST46&fr=1&mr=100&pptype=all&q=DtuPublicationQuery> (accessed on 27 October 2021).
32. Sedaghat, A.; Alkhatib, F.; Eilaghi, A.; Sabati, M.; Borvayeh, L.; Mostafaiepour, A. A new strategy for wind turbine selection using optimization based on rated wind speed. *Energy Procedia* **2019**, *160*, 582–589. [CrossRef]

33. Burton, T.; Sharoe, D.; Jenkins, N.; Bossanyi, E. *Wind Energy Handbook*; John Wiley & Sons Ltd.: Hoboken, NJ, USA, 2001. [[CrossRef](#)]
34. Manwell, J.F.; McGowan, J.G.; Rogers, A.L. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2009.
35. Wais, P. Wind Energy and Wind Turbine Selection. In *Energy Science and Technology*; Wind Energy; Studium Press LLC: Houston, TX, USA, 2015; Volume 8, pp. 168–193.
36. Bianchi, F.D.; de Battista, H.; Mantz, R.J. *Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design*; Springer: London, UK, 2007.
37. Wu, X.; Hu, W.; Huang, Q.; Chen, C.; Chen, Z.; Blaabjerg, F. Optimized Placement of Onshore Wind Farms Considering Topography. *Energies* **2019**, *12*, 2944. [[CrossRef](#)]
38. Wais, P. A review of Weibull functions in wind sector. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2017**, *70*, 1099–1107. [[CrossRef](#)]
39. Jain, P. *Wind Energy Engineering*; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 2010.
40. Vestas. *Document No. 0062-4192 V01*; VESTAS: Copenhagen, Denmark, 2018.
41. Vestas. *Document No. 0062-4191 V04*; VESTAS: Copenhagen, Denmark, 2017.
42. GE. *Commercial Documentation Wind Turbine Generator Systems GE 2.5–100 m rotor 50 Hz & 60 Hz*; GE: Fairfield, CT, USA, 2010.
43. W2E. *General Description W2E-100/2.5*; W2E: Rostock, German, 2008.
44. Enercon. *Document No. SIAS-04-SPL E-82 E2 OM I 2.3 MW*; Enercon: Berlin, German, 2010.
45. Gamesa. *Document No. GD086484*; Gamesa: Zamudio, Spain, 2010.