

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Politechnika Śląska



Obszerne streszczenie rozprawy doktorskiej

Analiza parametryczna i weryfikacja eksperymentalna numerycznego modelu przepływu wiatru WAsP

Parametric analysis and experimental verification of the numerical wind flow model WAsP

mgr inż. Piotr Gnyp

Promotor: dr hab. inż. Dariusz Heim, prof. PŁ

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska

Katedra Inżynierii Środowiska

Politechnika Łódzka

Gliwice, 2018

Spis treści:

1.	WPROWADZENIE.....	3
2.	SFORMUŁOWANIE PROBLEMU BADAWCZEGO	8
3.	CEL I TEZA ROZPRAWY	10
4.	ZAKRES ROZPRAWY	10
5.	NUMERYCZNY MODEL PRZEPŁYWU WIATRU WASP	11
6.	LOKALIZACJA I OTOCZENIE MASZTÓW POMIAROWYCH.....	14
7.	APARATURA POMIAROWA WYKORZYSTANA W BADANIACH	17
8.	WYNIKI POMIARÓW WIETRZNOŚCI I ICH ANALIZA	21
9.	CYFROWY MODEL WYSOKOŚCIOWY TERENU.....	26
10.	CYFROWY MODEL SZORSTKOŚCI TERENU	28
11.	PROGNOZA WARUNKÓW WIETRZNOŚCI Z WYKORZYSTANIEM NUMERYCZNEGO MODELU PRZEPŁYWU WIATRU WASP	30
12.	WYNIKI OBLICZEŃ.....	33
13.	WSPÓŁCZYNNIK TOPOGRAFICZNY TERENU	34
13.1.	DOPASOWANIE WSPÓŁCZYNNIKA TOPOGRAFICZNEGO TERENU DO MODELU WASP	39
14.	ANALIZA WYNIKÓW OBLICZEŃ	42
15.	PODSUMOWANIE I WNIOSKI	48

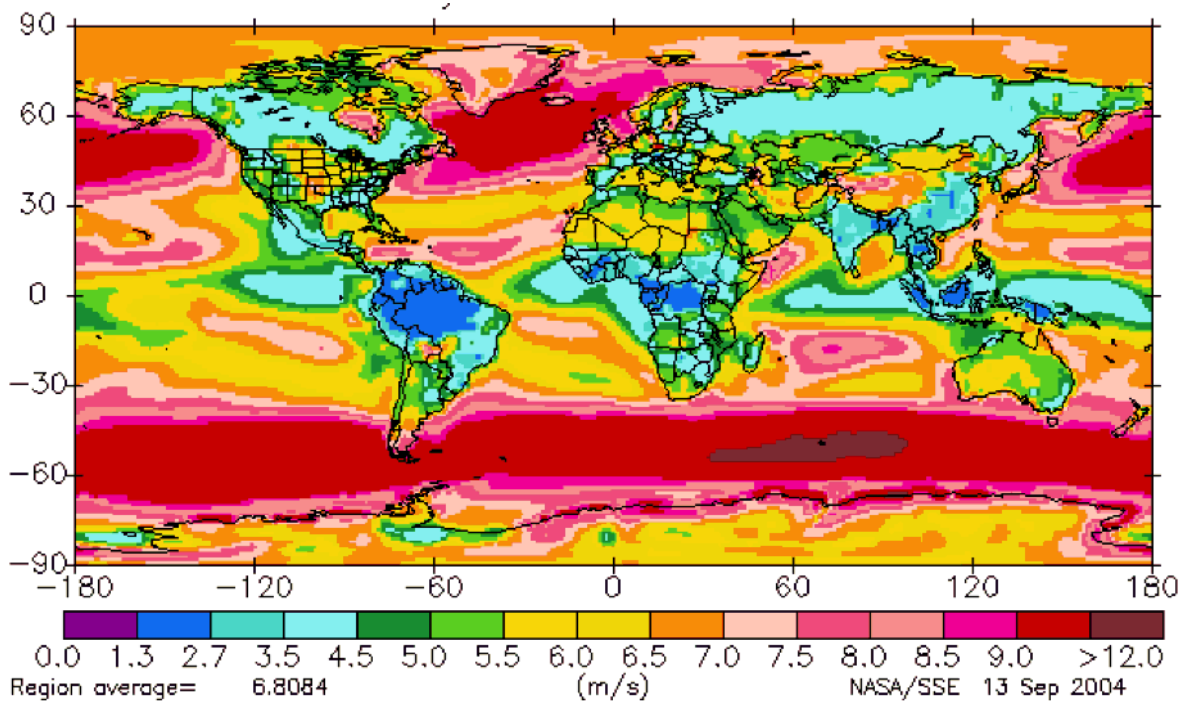
1. Wprowadzenie

Zaspokojenie stale rosnącego zapotrzebowania na energię elektryczną jest jednym z największych wyzwań XXI wieku. Kończące się paliwa kopalne takie jak ropa i węgiel wymuszają rozwój nowych technologii w dziedzinie odnawialnych źródeł energii. Uznaje się, że energia wiatru jest przyszłościowym, niewyczerpalnym i odnawialnym źródłem energii.

Jednym z problemów na etapie projektowania elektrowni wiatrowych jest prawidłowe prognozowanie warunków wietrzności, mające bezpośredni wpływ na ich docelową produktywność energetyczną. Wiatr jest jednym z najbardziej nieprzewidywalnych zjawisk atmosferycznych, co wymusza konieczność opracowywania coraz bardziej zaawansowanych modeli i narzędzi do jego prawidłowej analizy. Obecnie pomiary wietrzności wykonuje się przy użyciu masztów pomiarowych wyposażonych w odpowiednią aparaturę pomiarową. Do pomiaru kierunku wiatru stosuje się wiatrowskazy a do pomiaru prędkości wiatru anemometry. To właśnie informacje dotyczące prędkości wiatru są najważniejszymi danymi poddawanych analizie przy użyciu modeli obliczeniowych. Samo zbieranie danych też musi odbywać się w ściśle określony sposób, polegający na uśrednianiu chwilowych wartości tak aby uchwycić prawidłowości w zachowaniu przepływającego wiatru.

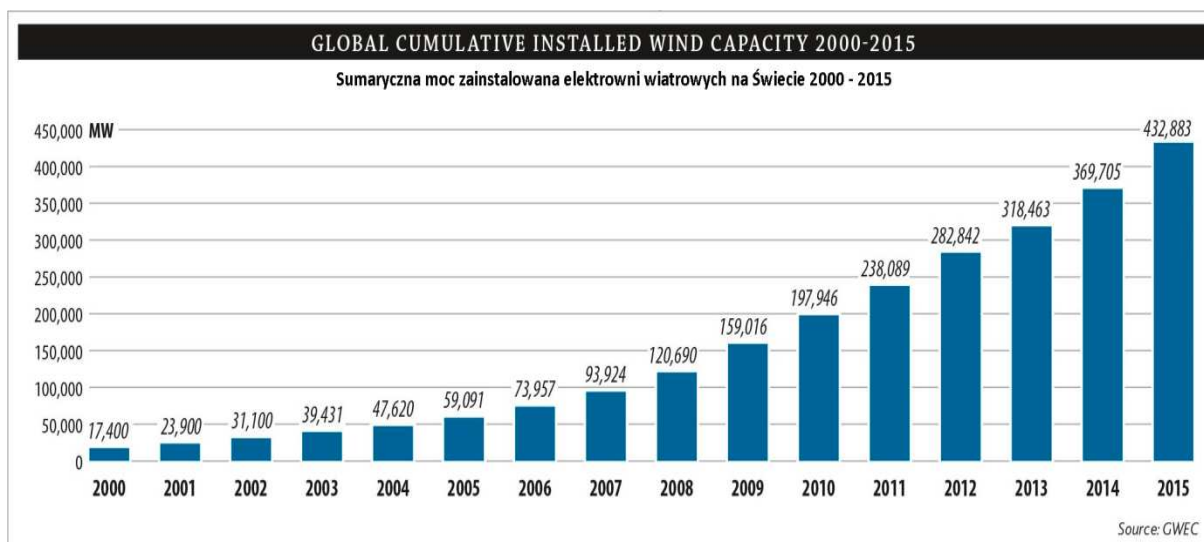
Na rysunku nr 1 przedstawiono średnioroczny rozkład prędkości wiatru na wysokości 50 m n.p.t. Mapa została opracowana na podstawie danych pochodzących z satelity GEOS-1. Obszary, na których średnioroczna prędkość wiatru wynosi ponad 7 m/s są uznawane za atrakcyjne pod względem lokalizowania siłowni wiatrowych. Na mapie można zauważyć miejsca, na których średnioroczna prędkość wiatru wynosi 6 m/s i mniej, co nie wyklucza opłacalności realizacji inwestycji na tych terenach. W wielu częściach Świata średnioroczne prędkości wiatru są o wiele niższe i np. średnioroczna prędkość wiatru w Polsce waha się od 1,16 m/s (Zakopane) do 12,09 m/s (Śnieżka) i średnio wynosi około 3,24 m/s. Najniższe wartości występują w regionie Podgórze Karpackiego (Tarnów) - 1,80 m/s oraz w okolicach Pojezierza Drawskiego (Resko) - 1,92 m/s. Najwyższe średnioroczne prędkości wiatru odnotowuje się w pasmach górskich: Kasprowy Wierch - 6,62 m/s, Śnieżka - 12,09 m/s. Wiatr poniżej średniorocznej prędkości notuje się na wschodniej i zachodniej części kraju, w szczególności na przedgórzach oraz w obrębie kotlin.

Optymalne warunki wietrzności w Polsce, dla których średnioroczna prędkość wiatru wynosi około 5 m/s wyróżnić można na północy kraju, na Wybrzeżu i Mazurach. Odnosząc te wartości do średniorocznych prędkości wiatru dla całego Świata, można zauważyć, że zasoby wiatru w Polsce nie są duże. Badania wietrzności na potrzeby rozprawy doktorskiej wykonano w wybranej części w pasie nadmorskim, na pograniczu województwa zachodniopomorskiego i pomorskiego w okolicach Słupska.



Rys. 1. Średnioroczny rozkład prędkości wiatru na wysokości 50 m [52].

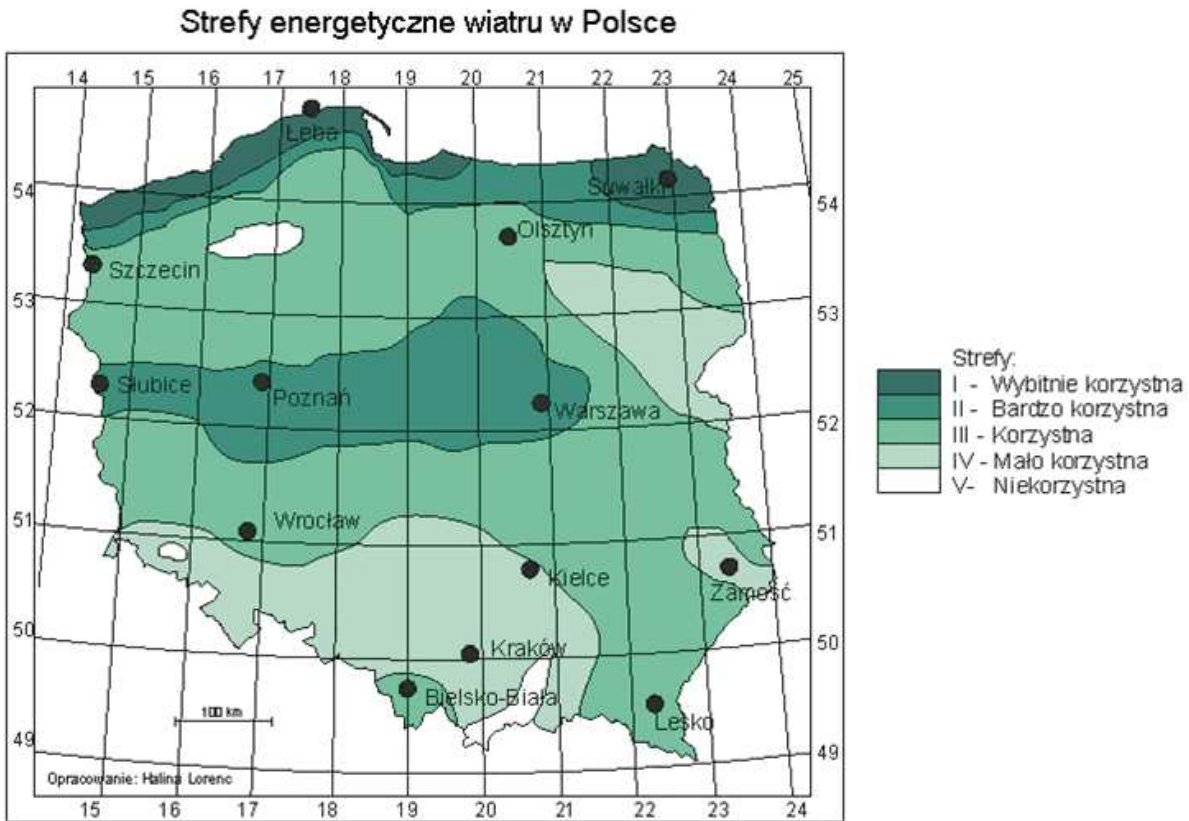
Początek XXI wieku to czas, w którym energetyka wiatrowa zaczęła rozwijać się w tempie wzrostu 20% – 30% rocznie. Moc zainstalowana elektrowni wiatrowych wybudowanych do 2000 roku wynosiła 18 GW. Do 2015 roku zainstalowana moc wzrosła do 432 GW wytwarzając 706 TWh energii, czyli 3% światowego zapotrzebowania na energię elektryczną. Rysunek nr 2 przedstawia sumaryczną moc zainstalowaną elektrowni wiatrowych na Świecie w latach 2000 ÷ 2015, wyrażoną w MW mocy zainstalowanej.



Rys. 2. Sumaryczna moc zainstalowana elektrowni wiatrowych na Świecie w latach 2000 – 2015.

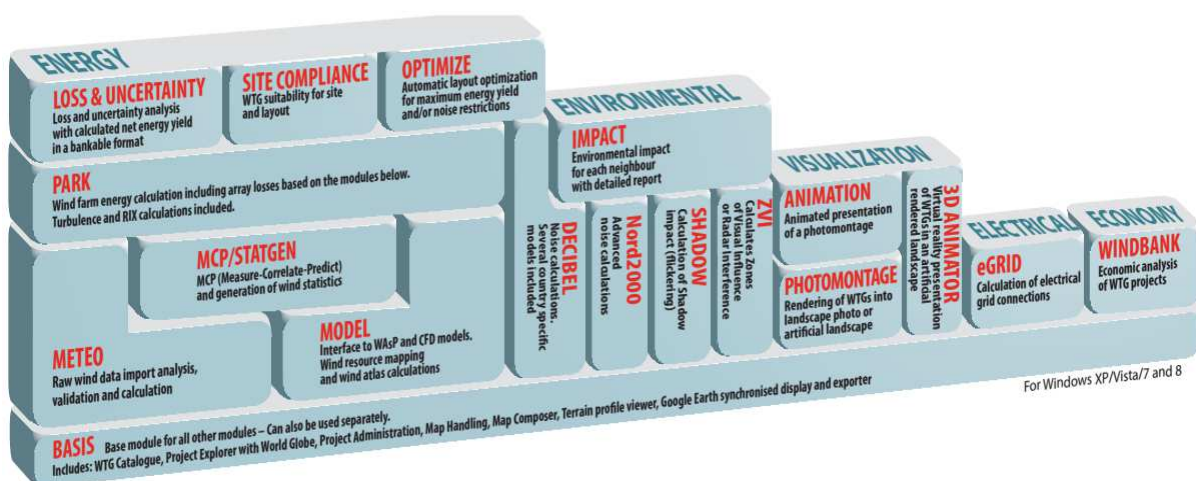
Początek lat 90. XX wieku to czas, w którym w Polsce zaczęła rozwijać się energetyka wiatrowa. Pierwszą siłownię wiatrową oddano do użytku w 1991 roku i znajdowała się ona w pobliżu elektrowni wodnej w Żarnowcu. Obecnie w tym miejscu znajduje się farma wiatrowa Lisewo. Dopiero po roku 2000 można było zaobserwować dynamikę rozwoju energetyki wiatrowej w Polsce. W 2001 roku oddano do użytku pierwszą farmę wiatrową Barzowice, składającą się z sześciu siłowni wiatrowych Vestas V52 o łącznej mocy zainstalowanej 5 MW.

Według Urzędu Regulacji Energetyki w 2015 roku w Polsce znajdowało się 981 instalacji siłowni wiatrowych, których łączna moc zainstalowana wynosiła 4 582,036 MW. Według prognoz rządowych do 2020 roku łączna moc zainstalowana powinna wynieść 6 650 MW. Najwięcej farm wiatrowych lokalizowanych jest w pasie nadmorskim, w strefie najbardziej korzystnej pod względem warunków wietrzności. W tych rejonach odnotowuje się najwyższe średnie prędkości wiatru, które bezpośrednio przekładają się na wysoką docelową produktywność energetyczną farm wiatrowych. Należy zwrócić uwagę, że zbyt duże chwilowe prędkości wiatru są niekorzystne ponieważ nie przekładają się bezpośrednio na wyższą produktywność energetyczną. Rysunek nr 3 przedstawia strefy energetyczne wiatru w Polsce. Mapa została opracowana przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej.



Rys. 3. Strefy energetyczne wiatru w Polsce.

W dobie intensywnego rozwoju energetyki wiatrowej bardzo ważną kwestią staje się określenie docelowej produktywności energetycznej planowanej farmy wiatrowej przy użyciu specjalistycznych programów komputerowych oraz modeli numerycznych. Jednym z tego typu programów komputerowych, wykorzystanych w niniejszej pracy jest oprogramowanie WindPRO. Producentem WindPRO jest duńska firma EMD International A/S. WindPRO jest oprogramowaniem dla systemu operacyjnego Windows, służącym do projektowania, analizowania i oceny projektów farm wiatrowych. WindPRO składa się z wielu modułów, z których każdy ma swoje funkcje i możliwości obliczeniowe. Struktura modułowa WindPRO pozwala łączyć elementy programu w zależności od potrzeby danego projektu. Moduły WindPRO dzielą się na grupy związane z obliczeniami energetycznymi, środowiskowymi, przestrzennymi, elektrycznymi i ekonomicznymi. W rozprawie wykorzystano moduły energetyczne, służące do obliczeń uwzględniających dane o wietrzności i charakterystyki terenu. Rysunek nr 4 przedstawia strukturę modułową oprogramowania WindPRO.



Rys. 4. Struktura modułowa oprogramowania WindPRO.

Poza programem komputerowym WindPRO, w pracy wykorzystano dodatkowe narzędzie analityczne GIS (ang. Geographic Information System) niezbędne do wykonania analiz przestrzennych. Global Mapper łączy zadania związane z GIS, modelowaniem przestrzennym, kartografią i nawigacją GPS. Dla celów związanych z energetyką wiatrową, Global Mapper umożliwia tworzenie, analizę i eksport zaawansowanych cyfrowych modeli wysokościowych terenu, cyfrowych modeli szorstkości terenu oraz map przedstawiających lokalizacje masztów pomiarowych, siłowni wiatrowych oraz innych istotnych obiektów topograficznych. Zaawansowane funkcje analityczne pozwalają na wielowariantową analizę zebranych danych, uwzględniając ich pozyskanie, analizę, modyfikację oraz eksport do wybranego pliku. Dokładne i szczegółowe wykonanie modeli orografii i szorstkości terenu jest niezbędne do prawidłowego wykonania obliczeń z wykorzystaniem numerycznego modelu przepływu wiatru WASP.

W programie komputerowym WindPRO podczas wykonywania obliczeń związanych z predykcją parametrów rozkładu Weibulla oraz prędkości wiatru wykorzystuje się odpowiedni model przepływu wiatru, którym na potrzeby niniejszej pracy jest model WASP. Model WASP stosuje się jedynie dla terenów niezurbanizowanych. Numeryczny model przepływu wiatru WASP opracował i nadal rozwija Duński Ośrodek Naukowy w Risø.

2. Sformułowanie problemu badawczego

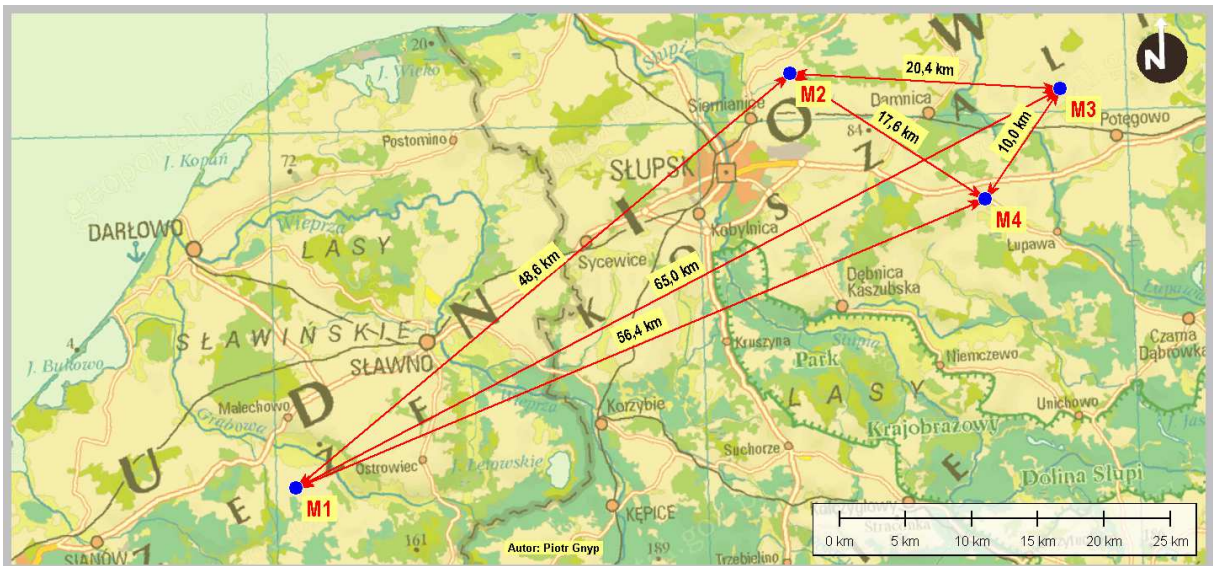
Przed przystąpieniem do realizacji inwestycji mającej na celu wybudowanie siłowni wiatrowych należy przeprowadzić badania wietrzności w wybranym terenie. Badania wietrzności służą zebraniu informacji dotyczących prędkości i kierunku wiatru. W trakcie wykonywania badań wietrzności zostaje zebrana duża ilość danych wymagająca odpowiedniej analizy. Analiza ta polega na określeniu parametrów rozkładu Weibulla oraz średniej prędkości wiatru w miejscu planowanej siłowni wiatrowej. Pomiędzy masztem pomiarowym a planowaną siłownią wiatrową zmieniają się parametry rozkładu Weibulla oraz średnia prędkość wiatru z uwagi na uwarunkowania terenowe. Do wykonania tej analizy niezbędne jest użycie odpowiedniego programu komputerowego dla energetyki wiatrowej, którym na potrzeby niniejszej pracy jest WindPRO. W rozprawie wykorzystano wyniki pomiarów wietrzności pochodzące z 4 masztów pomiarowych. Długość okresu badań wietrzności dla każdego masztu pomiarowego przedstawiała się następująco:

- Maszt pomiarowy **M1**, okres pomiarowy: 31.03.2011 ÷ 30.06.2014
- Maszt pomiarowy **M2**, okres pomiarowy: 11.03.2011 ÷ 30.06.2014
- Maszt pomiarowy **M3**, okres pomiarowy: 18.03.2011 ÷ 30.06.2014
- Maszt pomiarowy **M4**, okres pomiarowy: 14.03.2011 ÷ 30.06.2014

Podczas analizy danych o wietrzności dla całego okresu pomiarowego wyznaczono parametry rozkładu Weibulla, na które składają się parametr kształtu k oraz skali A oraz średnie prędkości wiatru v dla wszystkich wysokości pomiarowych.

Problem badawczy przedstawiony w rozprawie polegał na sprawdzeniu poprawności działania modelu komputerowego wykorzystywanego w energetyce wiatrowej. Parametry rozkładu Weibulla oraz średnia prędkość wiatru zostały poddane ekstrapolacji z lokalizacji jednego masztu pomiarowego do lokalizacji drugiego masztu pomiarowego. Następnie obliczone parametry rozkładu Weibulla oraz średnią prędkość wiatru porównano z wartościami wyznaczonymi na podstawie danych zmierzonych. Cel ten zrealizowano przy użyciu numerycznego modelu przepływu wiatru WAsP.

W rozprawie szczegółowo przeanalizowano zagadnienia związane z opisem warunków terenowych. Dużą uwagę poświęcono zdefiniowaniu i przetworzeniu na obraz cyfrowy ukształtowania i pokrycia terenu. Opracowano cyfrowy model wysokościowy terenu oraz cyfrowy model szorstkości terenu. Przedstawiona w pracy metoda zdefiniowania cyfrowych modeli terenu opiera się na wykorzystaniu danych przestrzennych pochodzących z Narodowej Agencji Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej Stanów Zjednoczonych (NASA) oraz Europejskiej Agencji Środowiska (EAA). Dane przestrzenne zostały poddane analizie w programie komputerowym GIS, Global Mapper. Ukształtowanie i pokrycie terenu, na które składają się orografia i szorstkość terenu mają istotny wpływ na obliczenia wykonywane w modelu WAsP. Rysunek 5 przedstawia odległości pomiędzy masztami pomiarowymi M1, M2, M3 i M4.



Rys. 5. Odległości pomiędzy masztami pomiarowymi.

3. Cel i teza rozprawy

Celem rozprawy doktorskiej jest weryfikacja eksperymentalna numerycznego modelu przepływu wiatru WAsP na podstawie danych o wietrzności, zmierzonych w czterech lokalizacjach. Analiza wyników pomiarów z oddalonych od siebie lokalizacji pozwoliła sprawdzić czy model obliczeniowy WAsP jest odpowiedni dla danej lokalizacji i różnych warunków terenowych oraz pomogła określić ograniczenia w jego stosowaniu. Celem pośrednim pracy jest wykonanie szczegółowej analizy terenu uwzględniającej orografię i szorstkość terenu. Do zrealizowania tego celu opracowano cyfrowy model wysokościowy terenu oraz cyfrowy model szorstkości terenu. Przedstawiony w pracy sposób wykonanej analizy zmierza do wykazania następującej tezy:

Użycie numerycznego modelu przepływu wiatru WAsP pozwala prawidłowo prognozować warunki wietrzności w sąsiednich lokalizacjach przy założeniach, że w bliskim otoczeniu masztu pomiarowego nie występują obszary o wysokich wartościach szorstkości terenu w szczególności na dominującym kierunku wiatru, a różnice w rzędnych terenu, klasyfikują obszar jako równinny.

4. Zakres rozprawy

Rozprawa doktorska składa się z sześciu rozdziałów, została podzielona na dwie części: teoretyczną i eksperymentalną. Część teoretyczna obejmuje rozdziały 1 i 2, zawierające wprowadzenie oraz przegląd literatury dotyczący metod pomiaru i oceny zasobów wiatru. W części teoretycznej dużą uwagę poświęcono zagadnieniom związanym z statystyczną oceną warunków wietrzności oraz modelowaniem przepływu wiatru z użyciem modeli numerycznych.

Część eksperymentalną obejmują rozdziały od 3 do 6. Opis wykorzystanej aparatury pomiarowej zainstalowanej na masztach pomiarowych oraz zagadnienia związane z analizą zmierzonych warunków wietrzności i przedstawieniem ich głównych parametrów zawarte są w rozdziale 3. Rozdział 4, porusza zagadnienia związane z cyfrowymi modelami analizowanego terenu, gdzie szczegółowej analizie zostały poddane problemy związane

z opisem orografii i szorstkości terenu. Rozdział 5 dotyczy weryfikacji eksperymentalnej numerycznego modelu przepływu wiatru WAsP. Obliczone parametry rozkładu wiatru zostały porównane z parametrami zmierzonymi. W rozdziale 6 określono współczynniki topograficzne terenu oraz wyznaczono współczynniki determinacji R^2 określające stopień dopasowania modelu WAsP do panujących warunków topograficznych. Obliczono błąd procentowy PE dla średnich wartości prędkości wiatru na poszczególnych wysokościach pomiarowych dla wszystkich masztów pomiarowych. Rozdział 7 stanowi podsumowanie rozprawy, zestawienie wyników obliczeń i sformułowanie wniosków z przeprowadzonej analizy.

5. Numeryczny model przepływu wiatru WAsP

Podczas analizy wietrzności i próby ekstrapolowania wyników pomiarów na tereny przyległe, niezbędne staje się użycie zaawansowanych modeli obliczeniowych uwzględniających wiele zmiennych określanych na podstawie danych pomiarowych i charakterystyki terenu (wielkości wejściowe). Proste podejście w ekstrapolowaniu wyników pomiarów wietrzności, bez uwzględnienia topografii terenu może okazać się nie wystarczające i obarczone dużą niepewnością. W rezultacie, prognozowane produktywności energetyczne siłowni wiatrowych mogą różnić do przyszłych rzeczywistych wartości uzyskanych podczas ich pracy, zaś opłacalność danej inwestycji może być błędnie oszacowana. Metody numeryczne, pozwalają wykonać obliczenia obarczone możliwie małym błędem pod warunkiem, że dany problem zostanie zdefiniowany w sposób prawidłowy zaś dane do obliczeń będą wiarygodne. Oszacowanie potencjału energetycznego danej lokalizacji, na podstawie zebranych danych o wietrzności na obszarach sąsiednich jest zadaniem skomplikowanym, wymagającym zastosowania odpowiednich modeli takich jak np. numeryczny model przepływu wiatru WAsP.

Numeryczny model przepływu wiatru WAsP został opracowany w 1987 roku w laboratorium Risø w Danii. Już wtedy, było to najbardziej rozbudowane i innowacyjne narzędzie do analizy parametrów wiatru. Pozwalało tworzyć atlas wiatru, szacować jego zasoby energetyczne, modelować pracę siłowni wiatrowych wraz z ich optymalnymi lokalizacjami. Kolejne lata, proporcjonalnie do rozwoju technologii IT, pozwoliły wypracować kolejne wersje modelu WAsP. Coraz szybsze komputery i ich większa dostępność, sprawiły że model WAsP zyskał na popularności. Obecnie jest powszechnie wykorzystywany w zawodowej energetyce wiatrowej i stał się podstawowym narzędziem w ocenie zasobów wiatru oraz lokalizacji siłowni wiatrowych. Model WAsP stosuje się w wielu krajach na świecie. Nad modelem od momentu wprowadzenia go na rynek, pracuje ten sam zespół specjalistów, który wykonał m.in. Atlas Wiatru Danii, Europejski Atlas Wiatru oraz poprzednie wersje modelu WAsP.

Na przepływ wiatru w pobliżu powierzchni terenu istotny wpływ ma jego charakterystyka (orografia i szorstkość terenu oraz informacje nt. przeszkód terenowych), która wywołuje zmianę jego prędkości i kierunku. Numeryczny model przepływu wiatru WAsP umożliwia analizowanie danych o wietrzności, pionową i poziomą ekstrapolację prędkości wiatru z wykorzystaniem informacji dotyczących orografii i szorstkości terenu. WAsP pozwala określać optymalne lokalizacje siłowni wiatrowych oraz wykonywać obliczenia średniorocznych planowanych produktywności energetycznych siłowni wiatrowych. Generuje regionalne statystyki wiatrowe dla obszaru w mikroskali dla miejsc, którymi mogą być przyszłe lokalizacje siłowni wiatrowych. W niniejszej pracy są to każdorazowo lokalizacje masztów pomiarowych, z których wielkości zmierzone posłużyły do weryfikacji wyników obliczeń. Regionalne statystyki wiatrowe utworzone w modelu WAsP dla dwóch miejsc zakładają pewne parametry rozkładu Weibulla a różnice między nimi spowodowane są zmianami szorstkości i orografii terenu. Jest to zasada działania modelu WAsP, w wyniku której istnieje związek pomiędzy prędkością wiatru a odległością pomiędzy dwiema lokalizacjami. Do określenia parametrów rozkładu Weibulla i średniej prędkości wiatru dla dowolnej lokalizacji, mieszczącej się w obrębie regionalnych statystyk wiatrowych model WAsP uwzględnia dane dotyczące orografii i szorstkości terenu oraz informacje o przeszkodach terenowych (o ile występują). W modelu WAsP za przeszkodę terenową uważa się obiekt zlokalizowany w promieniu do 1 km od lokalizacji, dla której mają zostać wyznaczone parametry rozkładu wiatru. Mogą nimi być: wysokie budynki, linie

elektroenergetyczne, maszty łączności GSM. Proces obliczeniowy zachodzący w modelu WASP podczas wyznaczania parametrów rozkładu wiatru dla danej lokalizacji, można zapisać matematycznie, w sposób uproszczony, przy pomocy poniższej zależności [9] [50]:

$$P_{obl} = W_{reg} \pm OBS_A \pm ROU_A \pm ORO_A \quad (13)$$

gdzie: P_{obl} – obliczone parametry wietrzności dla lokalizacji A, W_{reg} – wspólne regionalne statystyki wietrzności dla obszaru w mikroskali wyznaczone na podstawie danych zmierzonych, OBS_A – określa wpływ przeszkód terenowych na przepływ wiatru w pobliżu lokalizacji A, ROU_A – określa wpływ szorstkości terenu w pobliżu lokalizacji A, ORO_A – określa wpływ orografii w pobliżu lokalizacji A.

Powyższą zależność należy rozumieć jako duże uproszczenie, mówiące, że specyficzne warunki wietrzności dla danej lokalizacji wyznacza się na podstawie uwzględnienia oddziaływania szorstkości i orografii terenu przepływ wiatru dla analizowanego obszaru. Szorstkość terenu, orografia i przeszkody terenowe mogą modyfikować parametry rozkładu Weibulla oraz zmniejszać lub zwiększać prędkość wiatru w danej lokalizacji. WASP zakłada przepływ masy powietrza w stanie ustalonym czyli ciśnienie powietrza w każdym punkcie nie zmienia się w czasie. Zakłada stabilny model atmosfery i równowagę pomiędzy przepływem masy powietrza a siłą nacisku i siłą Coriolisa. Szczegóły dotyczące równań ruchu na których bazuje model WASP znajdują się w podpunkcie 2.7.1.

W modelu WASP obliczenia wykonywane są w etapach:

- analiza danych o wietrzności z uwzględnieniem lokalizacji masztów pomiarowych,
- analiza charakterystyki terenu (przeszkody terenowe, szorstkość, orografia),
- określenie wielkości obszaru obliczeniowego,
- generowanie lokalnych statystyk wiatrowych,
- obliczanie parametrów rozkładu Weibulla dla danej lokalizacji,
- obliczanie średnich prędkości wiatru dla danej lokalizacji,
- tworzenie map zasobów wietrzności dla danej lokalizacji.

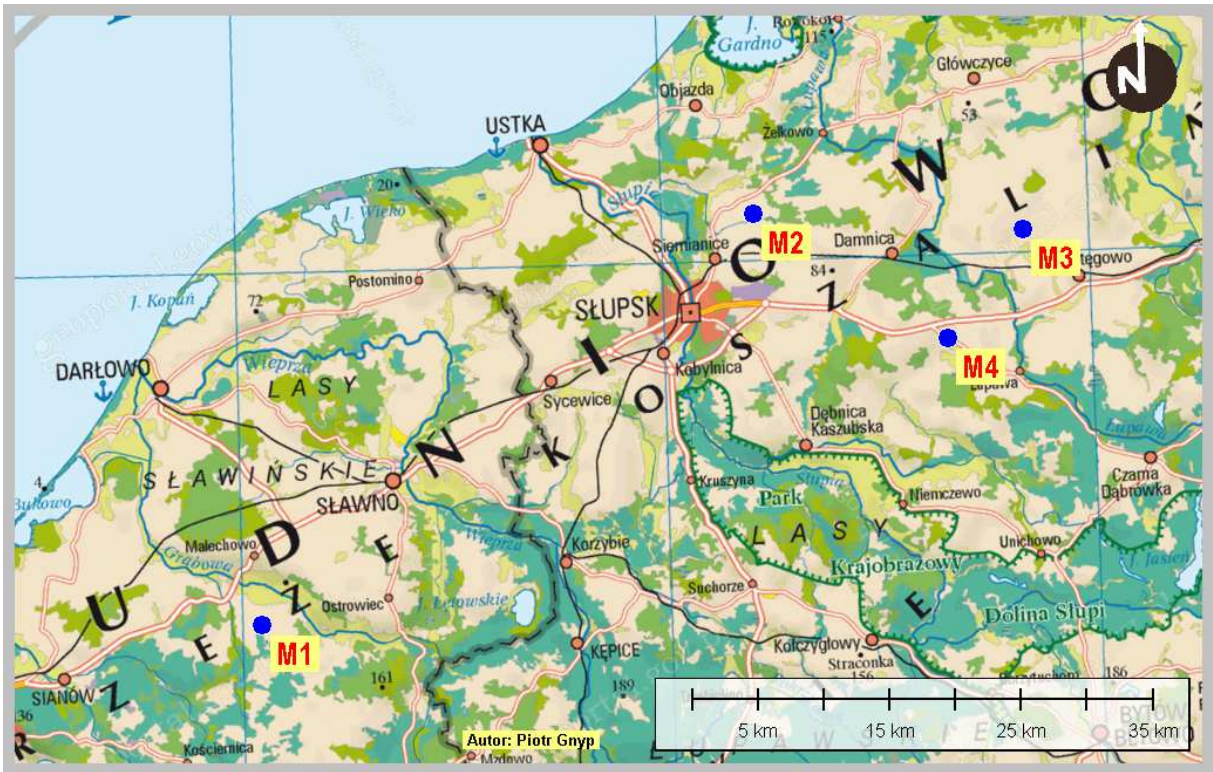
6. Lokalizacja i otoczenie masztów pomiarowych

Do monitorowania informacji dotyczących warunków wietrzności posłużyły cztery maszty pomiarowe, wyposażone w aparaturę pomiarową oraz rejestrującą. Maszty pomiarowe znajdowały się w północnej części Polski, w pasie nadmorskim województw pomorskiego i zachodniopomorskiego (okolice miasta Słupsk). Teren wokół masztów pomiarowych można zakwalifikować jako równiny, w większości uprawiany rolniczo z dużymi zwartymi kompleksami leśnymi. Przeważający typ zabudowy to zabudowa zagrodowa. Jedynie w otoczeniu masztu pomiarowego Wrzeście znajduje się obszar gęstej zabudowy – miasto Słupsk. W otoczeniu pozostałych masztów pomiarowych nie występują obiekty, które można zakwalifikować jako duże przeszkody terenowe dla napływających mas powietrza (brak wysokich budynków, kominów i innych konstrukcji budowlanych oraz znaczących naturalnych przeszkód terenowych). Rzędne posadowienia masztów pomiarowych mają wartości od 50 m do 76 m n.p.m.

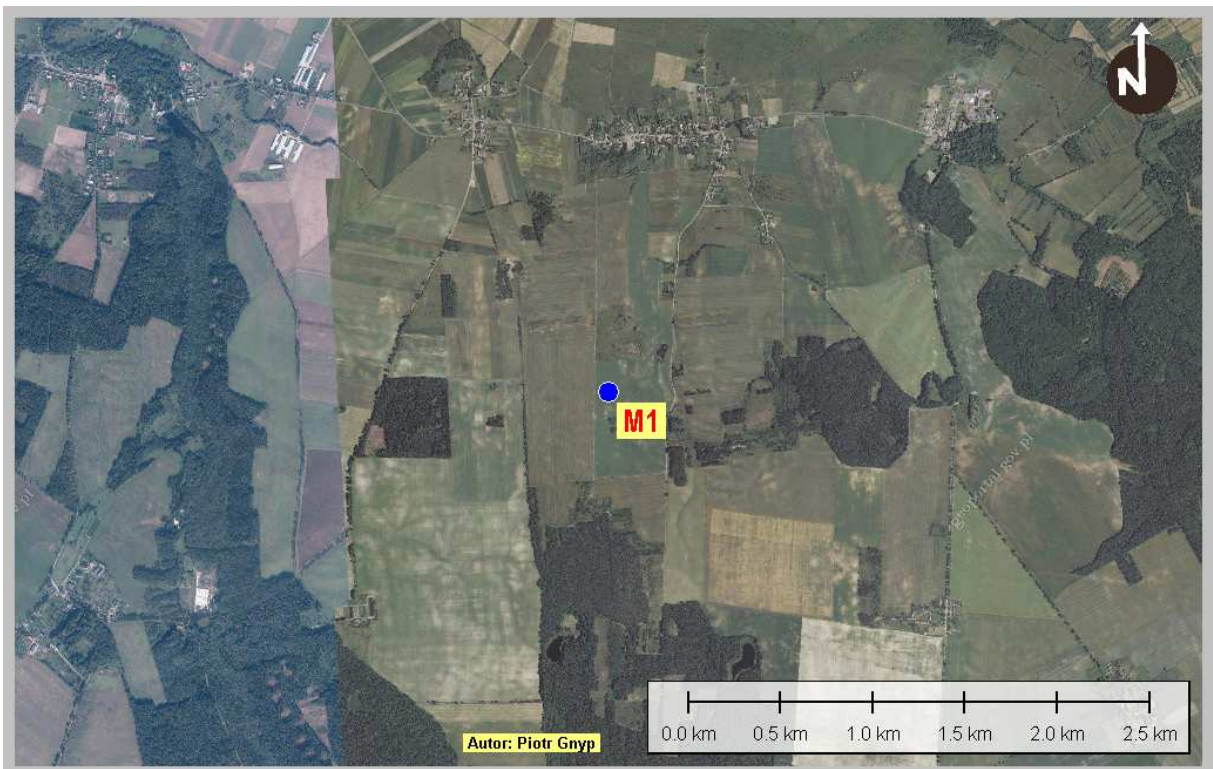
Położenie masztów pomiarowych na mapie topograficznej przedstawia rysunek 6. Współrzędne lokalizacji masztów pomiarowych wraz z ich rzędnymi posadowienia przedstawia tabela 1. Rysunki 7 ÷ 10 ilustrują szczegółowy obraz otoczenia wokół masztów pomiarowych naniesionych na mapy lotnicze.

Tabela 1. Lokalizacje masztów pomiarowych M1 ÷ M4.

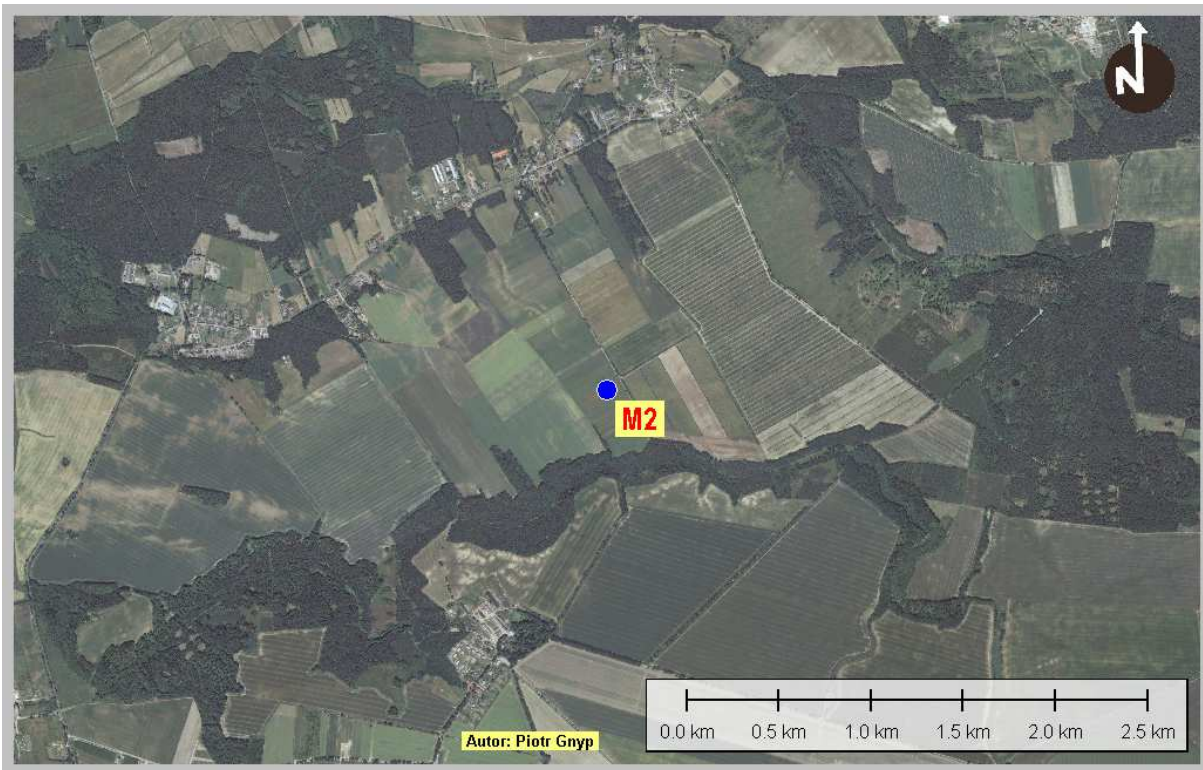
Maszt pomiarowy		Lokalizacja		Współrzędne lokalizacji GEO WGS84	Rzędne posadowienia masztów
		Gmina	Województwo		
M1	Sulechowo	Malechowo	Zachodniopomorskie	16° 31' 19,00" E 54° 15' 46,40" N	50 m n. p. m.
M2	Wrzeście	Potęgowo	Pomorskie	17° 06' 27,20" E 54° 31' 56,00" N	68 m n. p. m.
M3	Grapice	Potęgowo	Pomorskie	17° 25' 19,70" E 54° 30' 57,20" N	73 m n. p. m.
M4	Nowa Dąbrowa	Potęgowo	Pomorskie	17° 19' 50,60" E 54° 26' 34,40" N	76 m n. p. m.



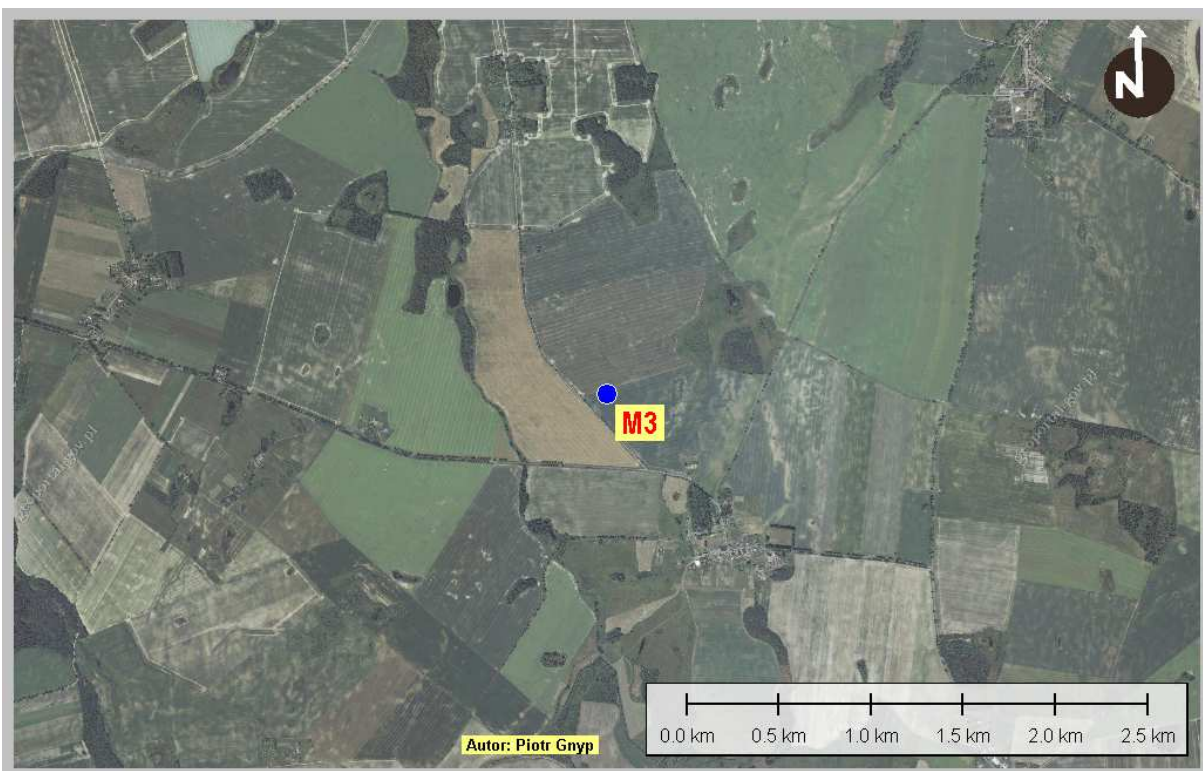
Rys. 6. Położenie masztów pomiarowych M1 – M4.



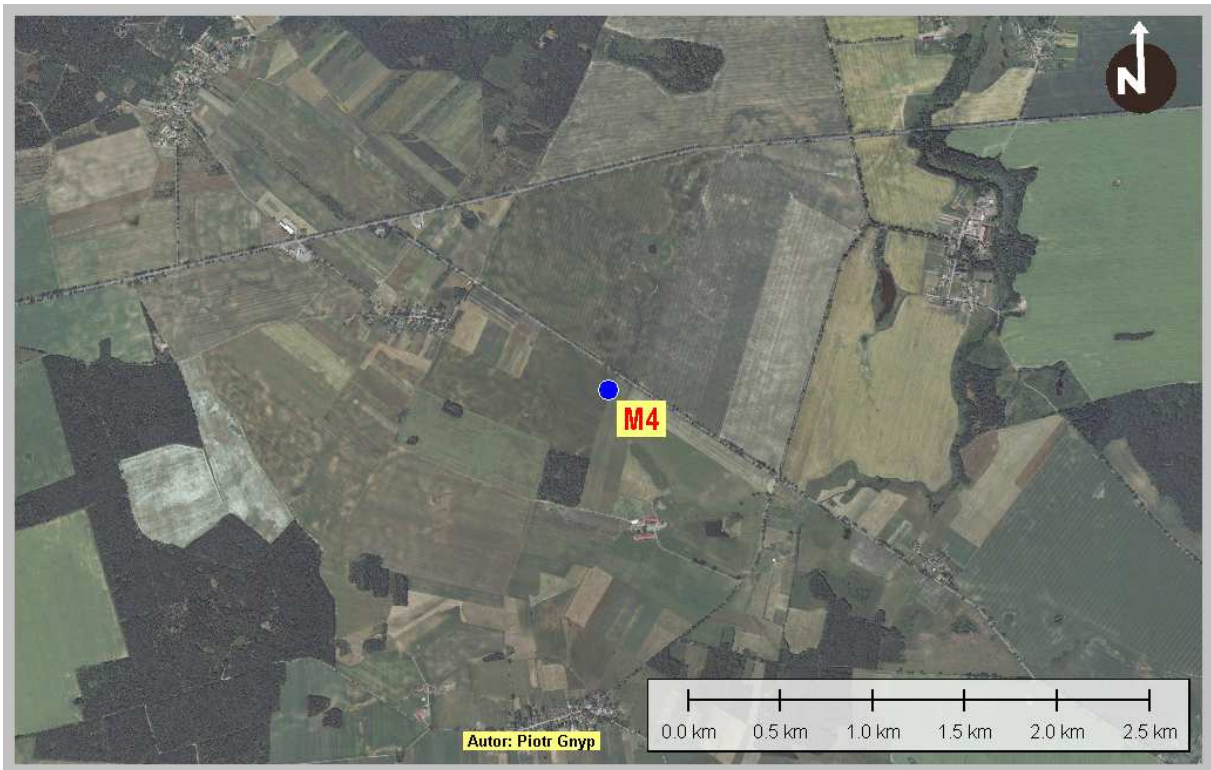
Rys. 7. Szczegółowy obraz otoczenia wokół masztu pomiarowego M1.



Rys. 8. Szczegółowy obraz otoczenia wokół masztu pomiarowego M2.



Rys. 9. Szczegółowy obraz otoczenia wokół masztu pomiarowego M3.



Rys. 10. Szczegółowy obraz otoczenia wokół masztu pomiarowego M4.

7. Aparatura pomiarowa wykorzystana w badaniach

Do pomiarów wietrzności zastosowano cztery teleskopowe maszty rurowe wysokości 100 metrów każdy. Aparatura pomiarowa pracowała i zbierała dane od marca 2011 roku do czerwca 2014 roku. Na rysunkach 11 i 12 przedstawiono zdjęcia masztów pomiarowych M1 ÷ M4 po wykonaniu ich montażu. Maszty, w zależności od konfiguracji, zostały wyposażone w następujące urządzenia:

- anemometry Thies First Class,
- anemometry NRG #40C,
- wiatrowskazy Thies Compact,
- urządzenia rejestrujące Ammonit METEO-32,
- akumulatory i panele PV.

Maszty pomiarowe M1, M3 i M4 zostały wyposażone w 4 anemometry Thies First Class, natomiast maszt M2 został wyposażony w 3 anemometry Thies First Class oraz w 3 anemometry NRG #40C. W obliczeniach, anemometry NRG #40C zostały pominięte z uwagi na malejącą z czasem dokładność pomiaru w odniesieniu do anemometrów Thies First Class. Pomiary trwały ponad 3 lata co nie pozwala brać do obliczeń danych pochodzących z anemometrów o różnych klasach dokładności. Anemometry Thies First Class posiadają zdolność do rejestracji prędkości wiatru w zakresie od 0,3 m/s do 50 m/s przy błędzie pomiaru wynoszącym 1%. W przedziale od 4 m/s do 20 m/s liniowość pomiaru wynosi $r > 0,999$. Wielkość r oznacza przedział prędkości wiatru, w którym najczęściej pracują siłownie wiatrowe. Anemometry mogą mierzyć prędkości wiatru powyżej 50 m/s aż do 75 m/s ale brak jest informacji o dokładności pomiaru w tym zakresie. Są w stanie wytrzymać podmuchy wiatru do 80 m/s przez 30 minut. Anemometry NRG #40C zaczynają mierzyć prędkość wiatru gdy przekracza ona 1 m/s. Z uwagi na mniejsze rozmiary niż anemometry Thies First Class są w stanie wytrzymać konstrukcyjnie prędkości wiatru dochodzące do 96 m/s. W przedziale prędkości wiatru od 5 m/s do 25 m/s dokładność pomiaru wynosi 0,1 m/s. Odnosząc dokładność anemometrów NRG #40C do anemometrów Thies First Class, w przedziale do 5 m/s, anemometry Thies First Class cechują się zdecydowanie większą precyzją wykonywanych pomiarów. Anemometry NRG #40C po rocznym okresie pomiarowym wymagają demontażu i przeprowadzenia kalibracji w tunelu wzorcowym z uwagi na zastosowane w nich łożyska ślizgowe. Wszystkie maszty zostały wyposażone w 2 wiatrowskazy Thies Compact o dokładności pomiaru do 1° , urządzenie rejestrujące Ammonit METEO-32 wraz z akumulatorem i panelem PV. Okresy pomiarowe dla każdego z masztów pomiarowych przedstawiały się następująco:

- Maszt pomiarowy **M1**, okres pomiarowy: 31.03.2011 ÷ 30.06.2014
- Maszt pomiarowy **M2**, okres pomiarowy: 11.03.2011 ÷ 30.06.2014
- Maszt pomiarowy **M3**, okres pomiarowy: 18.03.2011 ÷ 30.06.2014
- Maszt pomiarowy **M4**, okres pomiarowy: 14.03.2011 ÷ 30.06.2014

W tabeli 2 zestawiono wysokości instalacji poszczególnych elementów aparatury pomiarowej, rejestrującej i pomocniczej na masztach pomiarowych. Na rysunkach 13 i 14 przedstawiono wygląd masztów pomiarowych i zainstalowanej na nich aparatury pomiarowej.

Tabela 2. Zestawienie wysokości instalacji poszczególnych elementów aparatury pomiarowej, rejestrującej i pomocniczej na masztach pomiarowych.

Maszt pomiarowy	Anemometry	Wiatrowskazy	Urządzenie rejestrujące	Panel PV
	Wysokość instalacji nad poziomem terenu [m]			
M1	100,0 98,5 74,0 40,0	98,5 40,0	5,5	12,0
M2	100,0 98,5 74,0 50,0* 40,0* 30,0*	98,4 40,2	5,5	13,0
M3	100,0 98,3 74,0 39,8	98,5 40,0	5,5	12,0
M4	100,0 98,5 74,0 40,0	98,4 39,9	5,5	13,0

* - anemometry NRG #40C



Rys. 11. Maszty pomiarowe M1 ÷ M2.



Rys. 12. Maszty pomiarowe M3 ÷ M4.



Rys. 13. Aparatura pomiarowa na masztach M1 ÷ M2.



Rys. 14. Aparatura pomiarowa na masztach M3 ÷ M4.

8. Wyniki pomiarów wietrzności i ich analiza

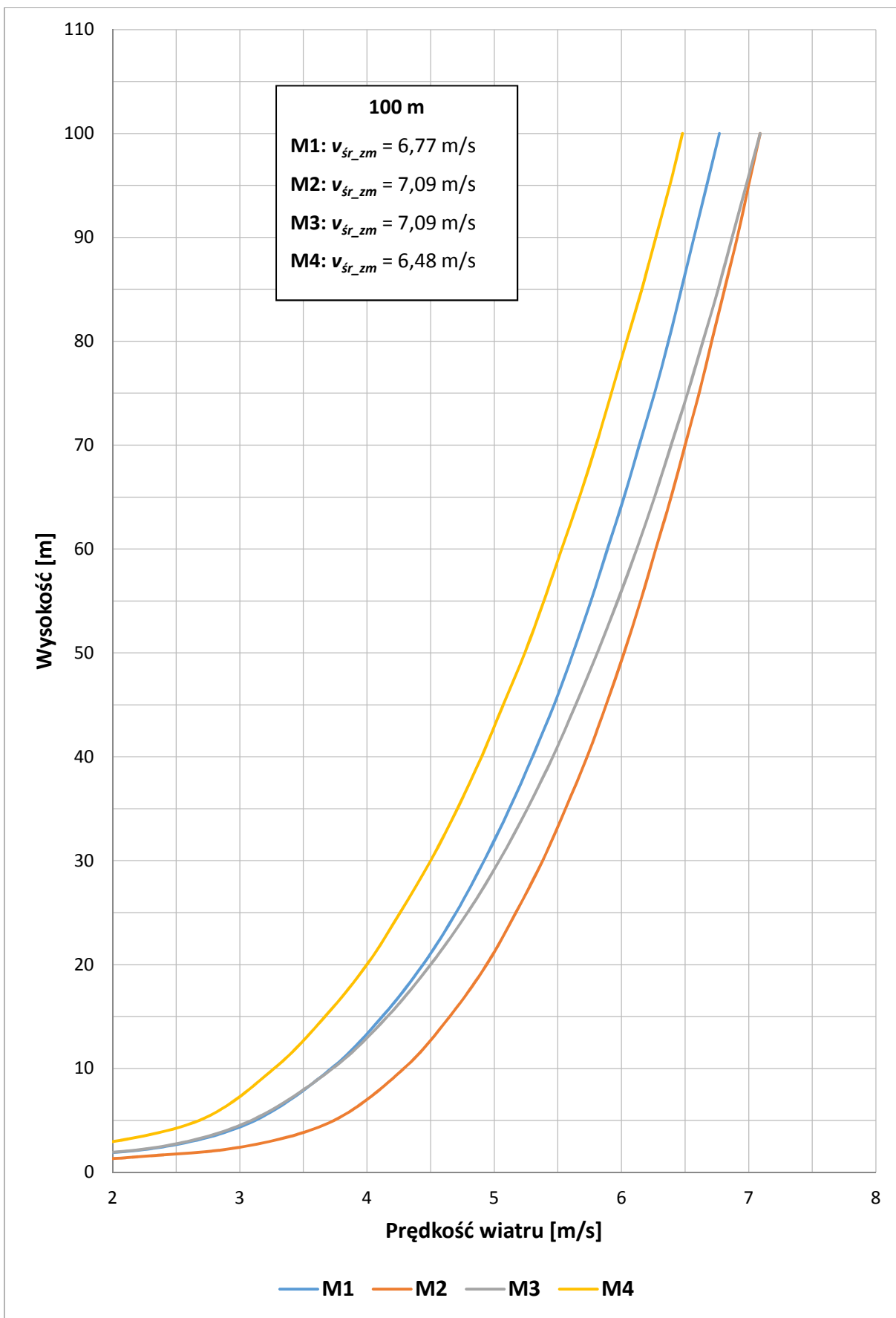
Na podstawie zebranych danych pomiarowych, w programie komputerowym WindPRO, w module obliczeniowym METEO została wykonana szczegółowa analiza wyników. Dane pomiarowe zostały przeanalizowane pod kątem identyfikacji okresów, w których wyniki pomiarów wietrzności obarczone są błędami spowodowanymi uszkodzeniem czujników, ich oblodzeniem lub nieprawidłowo działającą aparaturą rejestrującą.

W wyniku przeprowadzonej analizy wyników pomiarów wietrzności, zostały wyznaczone:

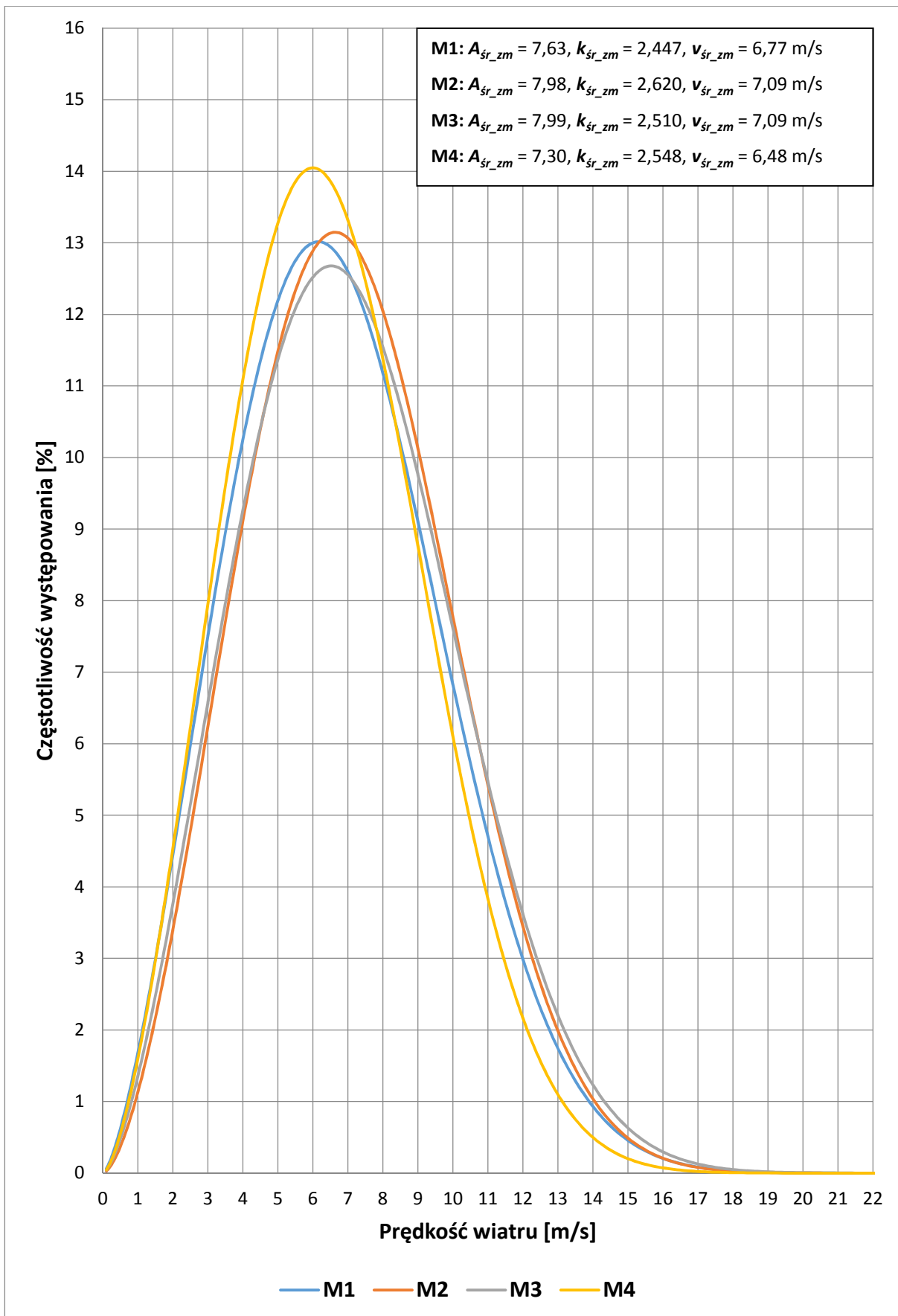
- profile wiatru na podstawie danych pochodzących z anemometrów dla wszystkich wysokości pomiarowych;
- rozkłady Weibulla dla sektorów kierunkowych przedstawiające wartości parametrów A i k , średniej zmierzonej prędkości wiatru v_{sr_zm} i częstość jej występowania f ;
- częstość występowania wiatru w poszczególnych sektorach kierunkowych dla każdego z masztów pomiarowych z uwzględnieniem dominującego kierunku wiatru d_{sr_zm} .

Profile wiatru zostały wyznaczone na podstawie średnich wartości prędkości wiatru z poszczególnych wysokości pomiarowych ze wszystkich masztów pomiarowych. Dane dotyczące prędkości wiatru z poszczególnych anemometrów zostały uśrednione do 10 min. Dzięki zwiększeniu czasu uśredniania do 10 min. (próbki anemometru wynosi 1 s) można było znaleźć prawidłowości w przebiegu profilu wiatru. Przy krótkim czasie uśredniania nie można by było prawidłowo określić warunków brzegowych na powierzchni napływu dla numerycznego modelu przepływu wiatru WAsP. Podczas analizy rzeczywistych wyników pomiarów zauważono, że charakter wietrzności w przypadku lokalizacji masztów pomiarowych M1 i M3 jest podobny, zaś parametr kształtu k rozkładu Weibulla mieści się przedziale $2,447 \div 2,510$. Parametr kształtu k rozkładu Weibulla dla masztu pomiarowego M2 wyniósł 2,620 a dla masztu pomiarowego M4 – 2,548. Parametr skali A dla masztów pomiarowych M2 i M3 wyniósł 7,98, spowodowane jest to tym, że dla obu masztów pomiarowych średnia zmierzona prędkość wiatru jest taka sama. Dla masztów Pomiarowych M1 i M4 wartość parametru skali A wyniosła odpowiednio 7,63 i 7,30. Zestawienie przebiegów profili wiatru dla poszczególnych masztów pomiarowych przedstawiono na rysunku 15.

Najniższe wartości prędkości wiatru odnotowano dla lokalizacji masztu pomiarowego M4, średnia prędkość wiatru dla najwyższego anemometru (100 m) wyniosła 6,48 m/s. Takie same prędkości wiatru dla najwyższych anemometrów (100 m) odnotowano dla masztów pomiarowych M2 i M4, gdzie średnia prędkość wiatru wyniosła 7,09 m/s. Mimo identycznych rezultatów dla najwyższych anemometrów, przebieg profilu wiatru dla masztów pomiarowych M3 i M4 był odmienny. Na wysokości 74 m wyższe prędkości wiatru odnotowano dla masztu pomiarowego M3 – 6,41 m/s (M2 – 6,34 m/s). Na wysokości 40 m nie było możliwe porównanie prędkości wiatru, ponieważ na maszcie pomiarowym M2 nie uwzględniono wskazań anemometrów z uwagi na niższą klasę dokładności pomiaru. Dla masztu pomiarowego M3 średnia prędkość wiatru na wysokości 40 m wyniosła 5,49 m/s. Początkowy przebieg profilu wiatru dla masztu pomiarowego M2 wskazuje na znacznie niższe wartości prędkości wiatru spośród wszystkich masztów. Różnice w przebiegu profilu wiatru najprawdopodobniej spowodowane są dużymi zmianami ukształtowania (orografia terenu) i pokrycia terenu (szorstkość terenu) wokół masztu pomiarowego M2.



Rys. 15. Zestawienie profili wiatru dla masztów pomiarowych M1 ÷ M4.



Rys. 16. Średnie rozkłady Weibulla dla wszystkich masztów pomiarowych dla wszystkich kierunków.

Dodatkowo podczas analizy danych o wietrzności z masztów pomiarowych M1, M2, M3 i M4 uzyskanych z anemometrów i wiatrowskazów wyznaczono częstości występowania wiatru z danego kierunku. Kierunki wiatru podzielono na 12 sektorów z odstępem co 30°. Najczęstszym kierunkiem występowania wiatru dla wszystkich masztów pomiarowych był kierunek południowo-zachodni odpowiadający sektorom SSW-WSW. Średni dominujący kierunek wiatru dla poszczególnych masztów pomiarowych mieścił się w przedziale 221,7 ÷ 228,9°. Zestawienie parametrów rozkładu Weibulla, średnich wartości prędkości wiatru oraz dominującego kierunku wiatru przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Średnie parametry rozkładu wiatru dla masztów pomiarowych M1 ÷ M4.

Maszt pomiarowy	Parametry rozkładu Weibulla		Średnia prędkość wiatru v_{sr_zm} [m/s]	Dominujący kierunek wiatru d_{sr_zm} [°]
	A_{sr_zm} [-]	k_{sr_zm} [-]		
M1	7,63	2,447	6,77	221,7
M2	7,98	2,620	7,09	228,1
M3	7,99	2,510	7,09	228,9
M4	7,30	2,548	6,48	226,1

Analizując częstości występowania wiatru we wszystkich sektorach kierunkowych, można zauważyć, że najrzadziej występującymi są wiatry północne i wschodnie a ich częstość występowania nie przekracza 5% dla prędkości wiatru mieszczącej się w przedziale 5 ÷ 10 m/s. Nieznacznie większy udział zaobserwowano z kierunków północno-wschodnich, gdzie częstość występowania wiatru przekracza 5% dla przedziału prędkości wiatru 5 ÷ 10 m/s. Prędkości wiatru do 5 m/s występują z podobną częstością we wszystkich kierunkach nie przekraczającą przedziału 3 ÷ 4%.

Największy udział częstości występowania wiatrów w przedziale 10 ÷ 15 m/s jest w sektorach SSW ÷ W i wynosi 12,5 ÷ 15,0%. Są to sektory odpowiadające dominującemu kierunkowi wiatru. Podczas analizy częstości występowania wiatru w poszczególnych sektorach kierunkowych zaobserwowano występowanie prędkości wiatru przekraczającej 15 m/s dla kierunku zachodniego odpowiadającemu sektorowi W. Udział tych wiatrów dla masztów pomiarowych M2, M3 i M4 przekracza 15,0% a dla masztu pomiarowego M1 – 12,5%.

9. Cyfrowy model wysokościowy terenu

Cyfrowy model wysokościowy terenu na potrzeby wykonania analizy parametrycznej i weryfikacji eksperymentalnej numerycznego modelu przepływu wiatru WASP został określony za pomocą danych pochodzących z misji SRTM-3 (Shuttle Radar Topography Mission), przeprowadzonej przez Narodową Agencję Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej Stanów Zjednoczonych (NASA). Celem misji było zebranie danych wysokościowych przy użyciu aparatury pomiarowej zainstalowanej na pokładzie promu kosmicznego Endeavour danych wysokościowych. Zbieranie danych odbyło się za pomocą metody SAR (ang. Synthetic Aperture Radar), wykorzystującej radar do uzyskiwania obrazów obiektów nieruchomych o wysokiej rozdzielności.

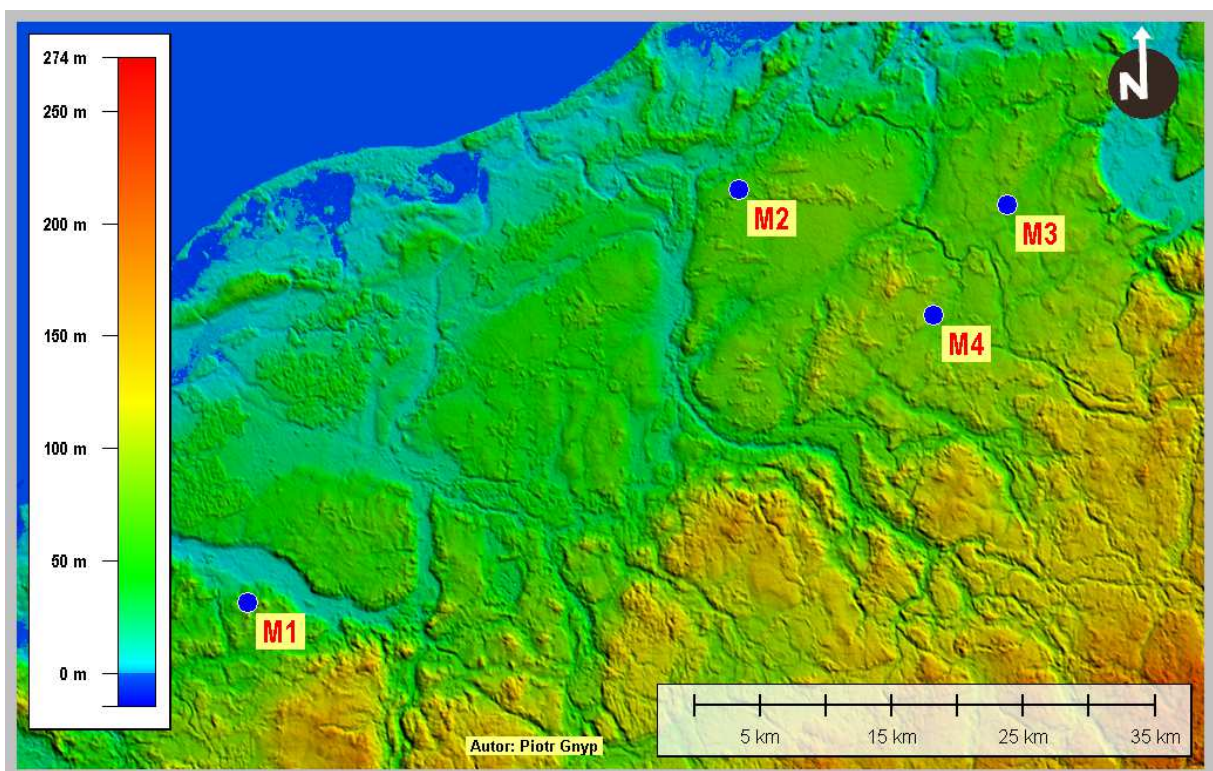
Dane mają rozdzielczość trzech sekund długości i szerokości geograficznej (co odpowiada obszarowi $90\text{ m} \times 90\text{ m}$ w okolicach równika), w przybliżeniu szczegółowość modelu odpowiada skali $1 : 200\,000$. Dla szerokości geograficznej odpowiadającej położeniu Polski rozdzielczość danych wynosi $60\text{ m} \times 90\text{ m}$, przy dokładności $\pm 3,7\text{ m}$. Błąd zależy głównie od proporcjonalności spadku i ekspozycji terenu. Dane SRTM-3 są ogólnie dostępne i zawierają informacje dotyczące pokrycia 80% powierzchni Ziemi dla obszaru znajdującego się pomiędzy 60° szerokości geograficznej północnej a 56° szerokości geograficznej południowej. Dane dostępne są w formacie plików HGT, które można pobrać z serwerów konsorcjum CGIAR-CSI (Consortium for Spatial Information), które zajęło się ich przetworzeniem (<http://srtm.csi.cgiar.org/>). Dane mają strukturę regularnej matrycy, każdy plik posiada określone współrzędne x i y oraz dokładnie określoną uśrednioną wartość wysokości, czyli współrzędną z .

Na podstawie surowych danych (pliki w formacie HGT, bezpośrednio pobrane z serwerów CGIAR-CSI), poddanych korekcie zostały wygenerowane punkty, a następnie poziomicę łączące punkty o takich samych wysokościach, które posłużyły do wygenerowania i wyeksportowania cyfrowego modelu wysokościowego terenu w formacie pliku SHP do oprogramowania WindPRO.

Zgodnie z zaleceniami Measnet i DTU, z punktu widzenia energetyki wiatrowej i modelowania przepływu wiatru, orografia terenu ma istotny wpływ w zasięgu do 5 km od punktu, dla którego oblicza się parametry wiatru. Powyżej 5 km orografia ma nadal wpływ na

zachowanie się przepływającej masy powietrza ale dla obliczeń z użyciem numerycznego modelu przepływu wiatru WASP jej wpływ na uzyskany wyniki ma mniejsze znaczenie.

Rysunek 17 przedstawia fragment cyfrowego modelu wysokościowego terenu wraz z naniesionymi lokalizacjami masztów pomiarowych opracowanego na podstawie danych SRTM-3. Użyty model terenu swoim zasięgiem obejmuje obszar o powierzchni ok. 3800 km², czyli zgodnie z zaleceniami Measnet i DTU. Dopiero po przeprowadzeniu analizy ukształtowania terenu i utworzeniu szczegółowego cyfrowego modelu wysokościowego terenu, można przystąpić do analizy szorstkości terenu.



Rys. 17. Fragment mapy z pokazaniem cyfrowego modelu wysokościowego terenu opracowanego na podstawie danych SRTM-3.

10. Cyfrowy model szorstkości terenu

Dla potrzeby wykonania weryfikacji eksperymentalnej numerycznego modelu przepływu wiatru WAsP opracowano cyfrowy model szorstkości terenu. Wykonanie obliczeń z uwzględnieniem szorstkości terenu pokazało jak ważnym parametrem jest szorstkość terenu w odniesieniu do predykcji parametrów wiatru dla danej lokalizacji (parametry rozkładu Weibulla). Na potrzeby utworzenia numerycznego modelu szorstkości terenu, wykorzystano dane Corine Land Cover 2012 dotyczące pokrycia terenu, pochodzące z serwerów Europejskiej Agencji Środowiska (EEA) (<http://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012>). Jest to nowe podejście zaprezentowane w pracy, pokazujące jak przy wykorzystaniu dostępnych danych można szczegółowo określić szorstkość terenu na cele związane z energetyką wiatrową.

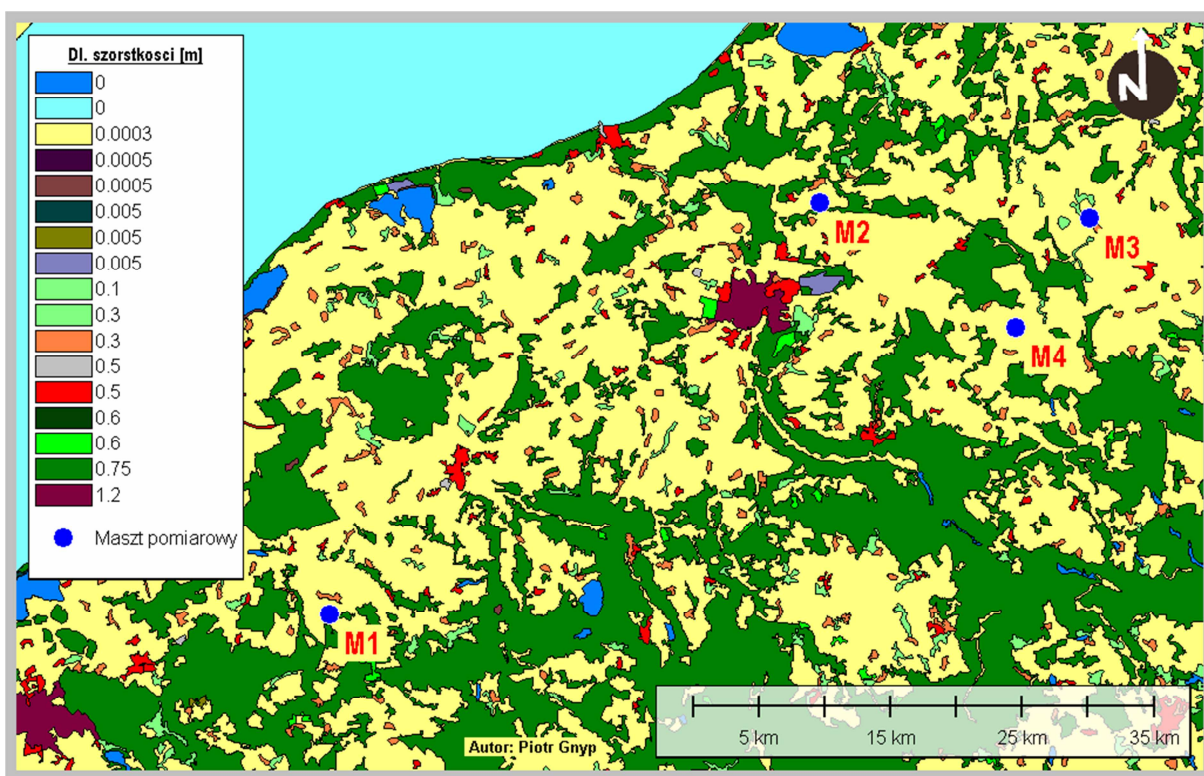
Dane Corine Land Cover 2012 zawierają informację o zmianach w pokryciu terenu Europy na przestrzeni lat. Są kontynuacją projektów Corine Land Cover 1990, 2000 i 2006. Celem projektu Corine Land Cover jest m.in. pokazanie wpływu działalności człowieka, rozwoju przemysłu i transportu, zmian w zagospodarowaniu terenów zurbanizowanych, rolniczych i leśnych na środowisko naturalne. Dane Corine Land Cover są zorganizowane w trzech poziomach. Pierwszy poziom obejmuje pięć głównych obszarów: tereny antropogeniczne, obszary rolnicze, lasy i inne ekosystemy, obszary podmokłe i wody. Drugi poziom wyróżnia 15 form pokrycia terenu, a poziom trzeci – 44. Trzeci, najwyższy poziom szczegółowości został zastosowany w opracowaniu cyfrowego modelu szorstkości terenu wykorzystanego w pracy. W Polsce występuje 31 klas pokrycia terenu. Każdy obszar posiada swój unikalny kod, któremu dodano dodatkowy atrybut w postaci informacji o długości szorstkości.

Tak jak w przypadku cyfrowego modelu wysokościowego terenu, istnieją zalecenia co do wielkości domeny. Zgodnie z zaleceniami Measnet i DTU, szorstkość terenu powinno określić się dla takiego samego obszaru dla którego określono cyfrowy model wysokościowy terenu.

Dane CLC 2012 zostały przeanalizowane w programie komputerowym Global Mapper z ukierunkowaniem na identyfikację obszarów odpowiadającym pokryciu badanego obszaru i mających istotny wpływ na zmiany w przepływie powietrza. Po szczegółowej analizie i przyporządkowaniu danym obszarom informacji o długości szorstkości terenu został opracowany cyfrowy model szorstkości terenu. Dane były wielokrotnie modyfikowane tak aby stworzyć najdokładniejszy obraz odwzorowujący pokrycie terenu, dane CLC 2012 zostały

poddane korekcie w oparciu o mapy lotnicze i topograficzne. Użyty cyfrowy model szorstkości terenu swoim zasięgiem obejmuje obszar o powierzchni ok. 3800 km², jest to obszar o takiej samej domenie jaką określono dla cyfrowego modelu wysokościowego terenu.

Prezentowany cyfrowy model szorstkości terenu, opracowany na potrzeby niniejszej pracy jest bardzo szczegółowym modelem z uwagi na połączenie kilku źródeł danych, takich dane CLC 2012, mapy lotnicze, topograficzne oraz wizje lokalne w terenie. Rysunek 18 przedstawia cyfrowy model szorstkości terenu opracowany na podstawie danych CLC 2012 wraz z naniesionymi lokalizacjami masztów pomiarowych M1, M2, M2 i M4.



Rys. 18. Cyfrowy model szorstkości terenu opracowany na podstawie danych CLC 2012.

11. Prognoza warunków wietrzności z wykorzystaniem numerycznego modelu przepływu wiatru WAsP

Obliczenia mające na celu weryfikację działania numerycznego modelu przepływu wiatru WAsP podano dla 4 wariantów odpowiadających poszczególnym lokalizacją od M1 do M4. Jako źródła danych nt. wietrzności wykorzystano wyniki pomiarów z 3 pozostałych masztów pomiarowych:

- **Wariant 1** – obliczenia dla lokalizacji masztu pomiarowego **M1** na podstawie danych o wietrzności z masztów pomiarowych M2, M3 i M4,
- **Wariant 2** – obliczenia dla lokalizacji masztu pomiarowego **M2** na podstawie danych o wietrzności z masztów pomiarowych M1, M3 i M4.
- **Wariant 3** – obliczenia dla lokalizacji masztu pomiarowego **M3** na podstawie danych o wietrzności z masztów pomiarowych M1, M2 i M4.
- **Wariant 4** – obliczenia dla lokalizacji masztu pomiarowego **M4** na podstawie danych o wietrzności z masztów pomiarowych M1, M2 i M3.

Na rysunkach 19 ÷ 22 przedstawiono poszczególne warianty obliczeniowe dla lokalizacji masztów pomiarowych M1, M2, M3 i M4 z zaznaczeniem kierunku obliczeń. W tabeli 4 podano odległości.

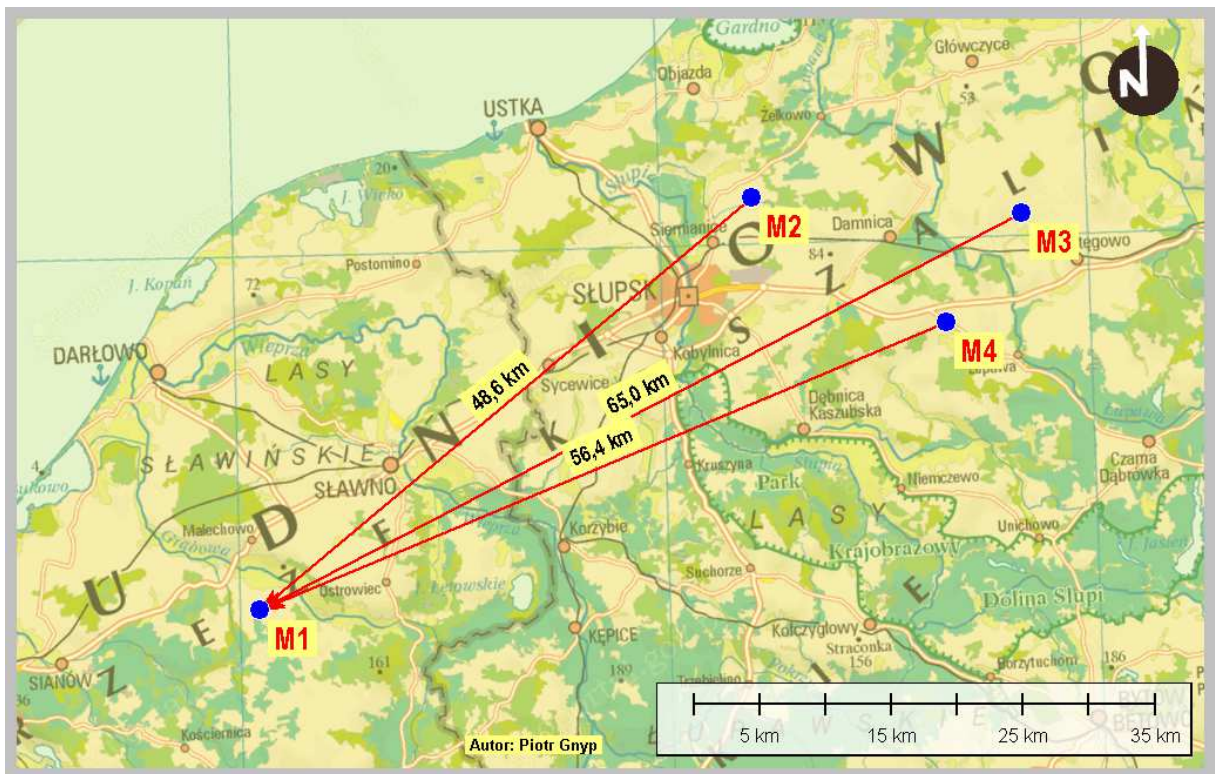
Na prognozowane warunki wietrzności w każdym z wariantów obliczeniowych składała się analiza danych wejściowych o wietrzności oraz danych dotyczących topografii terenu. W wyniku obliczeń dla lokalizacji masztów pomiarowych M1, M2, M3 i M4 wyznaczono profile wiatru, parametry rozkładu Weibulla i średnią prędkość wiatru. Zestawienie wariantów obliczeniowych wraz zaznaczeniem kierunku obliczeń przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 4. Odległości pomiędzy masztami M1, M2, M3 i M4.

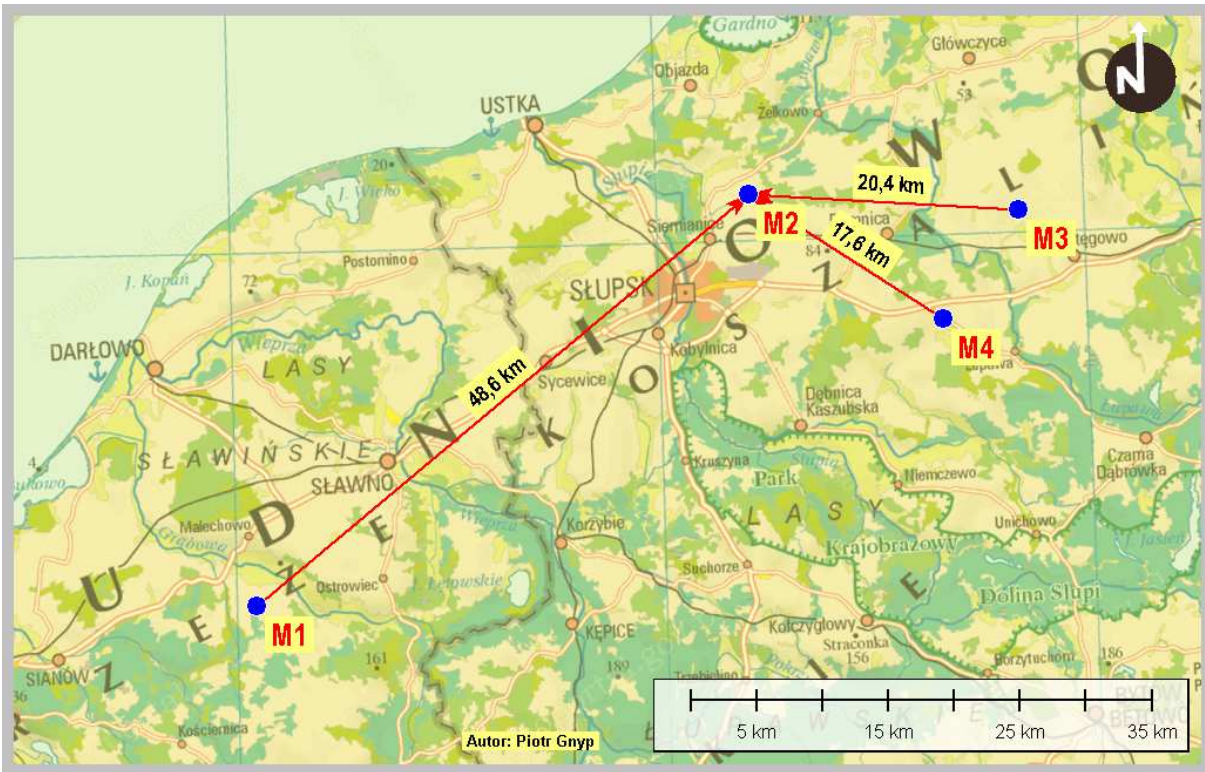
Masz pomiarowy	M1	M2	M3	M4
	Odległość [km]			
M1	-	48,6	65,0	56,4
M2	48,6	-	20,4	17,6
M3	65,0	20,4	-	10,0
M4	56,4	17,6	10,0	-

Tabela 5. Warianty obliczeniowe wraz z kierunkiem wykonywanych obliczeń.

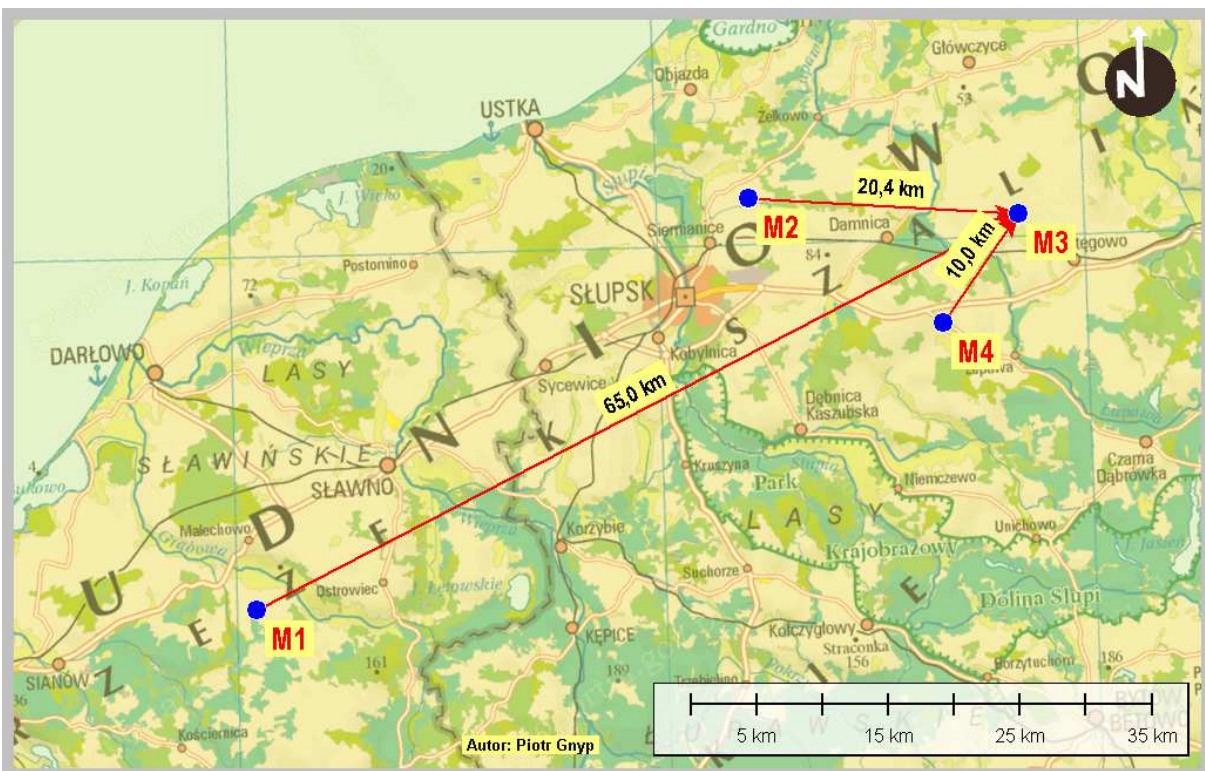
Wariant obliczeniowy	Lokalizacja masztu pomiarowego	Kierunek obliczeń		
Wariant 1	M1	M2→M1	M3→M1	M4→M1
Wariant 2	M2	M1→M2	M3→M2	M4→M2
Wariant 3	M3	M1→M2	M2→M3	M4→M3
Wariant 4	M4	M1→M4	M2→M4	M3→M4



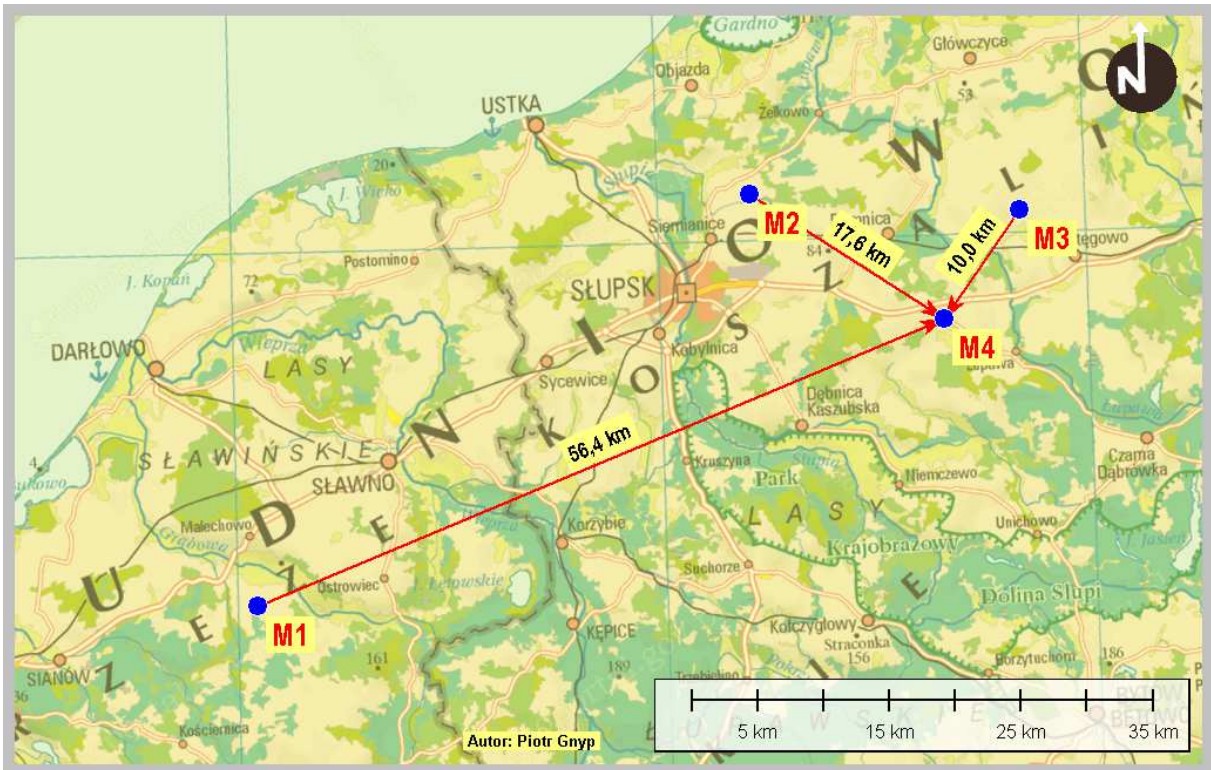
Rys. 19. Wariant 1 – obliczenia dla lokalizacji masztu pomiarowego M1.



Rys. 20. Wariant 2 – obliczenia dla lokalizacji masztu pomiarowego M2.



Rys. 21. Wariant 3 – obliczenia dla lokalizacji masztu pomiarowego M3.



Rys. 22. Wariant 4 – obliczenia dla lokalizacji masztu pomiarowego M4.

12. Wyniki obliczeń

Podczas obliczeń dla wszystkich wariantów obliczeniowych, zauważono, że w przypadku obliczeń z wykorzystaniem danych z masztu pomiarowego M2, wyniki obliczeń istotnie odbiegały od danych zmierzonych. Różnice w obliczonych parametrach rozkładu Weibulla (parametr A i k) oraz średniej obliczonej prędkości wiatru, zestawiono w tabeli 6. Największe różnice wystąpiły w przypadku obliczeń z masztu M2 w kierunku masztu M4 (wariant 4), parametr skali A rozkładu Weibulla był wyższy o 1,44 od parametru zmierzonego, natomiast średnia obliczona prędkość wiatru była wyższa o 1,27 m/s od wartości zmierzonej. Dla wariantu 1 i 2, parametr skali A był wyższy odpowiednio o 1,05 i 1,11 od parametru zmierzonego. Średnia obliczona prędkość wiatru była wyższa o 0,93 m/s i 0,98 m/s od wartości zmierzonej.

Tabela 6. Różnice w obliczonych parametrach rozkładu Weibulla oraz średniej prędkości wiatru dla wszystkich wariantów obliczeniowych.

Wariant obliczeniowy	Kierunek obliczeń	Parametr A rozkładu Weibulla $A_{obl} [-]$	Parametr k rozkładu Weibulla $k_{obl} [-]$	Śr. obliczona prędkość wiatru $v_{śr_obl} [m/s]$
Wariant 1	M2→M1	8,68 (+1,05)	2,479 (+0,032)	7,70 (+0,93)
	M3→M1	8,00 (+0,37)	2,393 (-0,054)	7,09 (+0,32)
	M4→M1	7,49 (-0,14)	2,393 (-0,054)	6,64 (-0,13)
Wariant 2	M1→M2	7,83 (-0,15)	2,307 (-0,313)	6,93 (-0,16)
	M3→M2	8,12 (+0,14)	2,365 (-0,255)	7,19 (+0,10)
	M4→M2	7,58 (-0,40)	2,381 (-0,239)	6,72 (-0,37)
Wariant 3	M1→M3	8,05 (+0,06)	2,322 (-0,188)	7,14 (+0,05)
	M2→M3	9,10 (+1,11)	2,436 (-0,074)	8,07 (+0,98)
	M4→M3	7,83 (-0,16)	2,350 (-0,160)	6,94 (-0,15)
Wariant 4	M1→M4	7,77 (+0,47)	2,350 (-0,198)	6,89 (+0,41)
	M2→M4	8,74 (1,44)	2,471 (-0,077)	7,75 (+1,27)
	M3→M4	8,07 (+0,77)	2,381 (-0,167)	7,15 (+0,67)

13. Współczynnik topograficzny terenu

Analizując uzyskane wyniki obliczeń z wykorzystaniem numerycznego modelu przepływu wiatru WASP, określające charakter wietrzności danej lokalizacji opracowano współczynnik topograficzny terenu. Jest to autorskie podejście pozwalające w szybki sposób dokonać analizy danej lokalizacji przed przystąpieniem do obliczeń z użyciem modelu WASP. Obliczenie współczynnika topograficznego terenu pozwala sprawdzić czy model WASP jest odpowiedni do danej lokalizacji. Może być on także źródłem informacji czy otrzymane w wyniku obliczeń parametry rozkładu Weibulla i średnia prędkość wiatru są wyznaczone z zadawalającą dokładnością. Obliczenie współczynnika topograficznego terenu w znacznym stopniu skraca czas niezbędny do wykonania pełnych analiz z wykorzystaniem modelu WASP, w przypadkach gdy wyniki w trakcie obliczeń będą mało precyzyjne.

Zależność określająca współczynnik topograficzny terenu została opracowana doświadczalnie, przez analizę wyników obliczeń wykonanych z użyciem numerycznego

modelu przepływu wiatru WASP oraz analizę cyfrowych modeli wysokościowych i szorstkości terenu. Podczas prób wyznaczenia zależności pomiędzy obliczonymi parametrami rozkładu Weibulla (parametr A i k) a orografią i szorstkością terenu zauważono, że można dokonać szybkiej weryfikacji działania modelu WASP na podstawie cyfrowych modeli: wysokościowego i szorstkości terenu. W tym celu, w programie komputerowym Global Mapper profile wysokościowe terenu, pomiędzy masztami pomiarowymi przekształcono na zbiory punktów dzięki, którym można było wyznaczyć współczynniki wysokości wsp_h . Współczynnik wysokości obliczono dzięki wyznaczeniu najwyższego punktu w przebiegu profilu wysokościowego terenu h_{max} oraz wartości średniej pomiędzy lokalizacjami dwóch masztów pomiarowych $h_{\dot{s}r}$. Współczynnik wysokości określono na podstawie zależności:

$$wsp_h = \frac{h_{max}}{h_{\dot{s}r}} \quad (47)$$

gdzie: wsp_h – współczynnik wysokości, h_{max} – maksymalna wysokość w przebiegu profilu wysokościowego, $h_{\dot{s}r}$ – średnia wysokość w całym profilu wysokościowym.

Drugim parametrem, niezbędnym do wyznaczenia współczynnika topograficznego terenu jest współczynnik szorstkości wsp_{SZ} . Jego obliczenie jest bardziej skomplikowane niż w przypadku współczynnika wysokości wsp_h z uwagi na obliczenie pól powierzchni powyżej i poniżej średniej wartości szorstkości terenu pomiędzy lokalizacjami dwóch masztów pomiarowych. W tym celu, w programie komputerowym Global Mapper, przekształcono profil szorstkości terenu na zbiór punktów i odpowiadające im wartości długości szorstkości w granicach przyjętej domeny obliczeniowej modelu WASP. Wyznaczono maksymalną wartość szorstkości terenu SZ_{max} oraz jej wartość średnią $SZ_{\dot{s}r}$. Obliczono pole powierzchni szorstkości poniżej wartości średniej P_{pon} i powyżej tej wartości P_{pow} . Współczynnik szorstkości wsp_{SZ} określono na podstawie zależności:

$$wsp_{SZ} = \frac{P_{pow} \cdot SZ_{max}}{P_{pon} \cdot SZ_{\dot{s}r}} \quad (48)$$

gdzie: wsp_{SZ} – współczynnik szorstkości, P_{pow} – pole powierzchni szorstkości terenu powyżej średniej wartości, P_{pon} – pole powierzchni szorstkości terenu poniżej średniej wartości, SZ_{max} – maksymalna wartość szorstkości terenu, $SZ_{\dot{s}r}$ – średnia wartość szorstkości terenu.

Obliczenie współczynnika topograficznego terenu wsp_{top} opiera się na analizie przebiegu profilu wysokościowego oraz szorstkości terenu na odcinku pomiędzy lokalizacją masztu pomiarowego a lokalizacją, dla której mają zostać wyznaczone główne parametry rozkładu wiatru. Posiadając wartości współczynników wysokości wsp_h i szorstkości wsp_{SZ} można przystąpić do obliczenia współczynnika topograficznego terenu. Współczynnik topograficzny terenu oblicza się jako sumę współczynników wysokości wsp_h i szorstkości wsp_{SZ} zgodnie z zależnością:

$$wsp_{top} = wsp_h + wsp_{SZ} \quad (49)$$

gdzie: wsp_{top} – współczynnik topograficzny, wsp_h – współczynnik wysokości, wsp_{SZ} – współczynnik szorstkości.

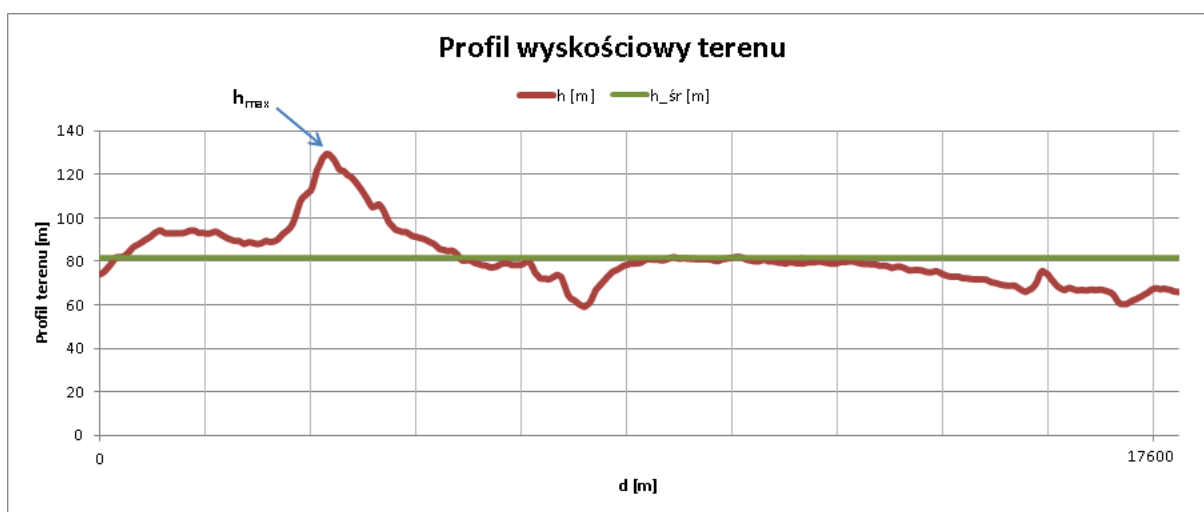
Sposób określenia współczynnika topograficznego terenu oraz współczynników wysokości i szorstkości jest nowym, oryginalnym podejściem, zaproponowanym w pracy. Zależność została opracowana na podstawie analizy wyników obliczeń z użyciem modelu WAsP oraz orografii i szorstkości terenu. Przy opracowaniu zależności łączącej orografię i szorstkość terenu jako parametru służącemu ocenie działania modelu WAsP wykorzystano również autorskie podejście dotyczące wykorzystania dostępnych źródeł danych do określenia cyfrowych modeli terenu.

Na podstawie analizy różnych profili wysokościowych i szorstkości terenu pomiędzy lokalizacjami masztów pomiarowych, zaproponowano zakresy współczynnika topograficznego terenu decydujące o przydatności numerycznego modelu WAsP oraz dokładności wyników obliczeń uzyskanych dla danej lokalizacji. W tabeli 7 zestawiono zakresy współczynnika topograficznego terenu w odniesieniu do precyzji działania modelu WAsP.

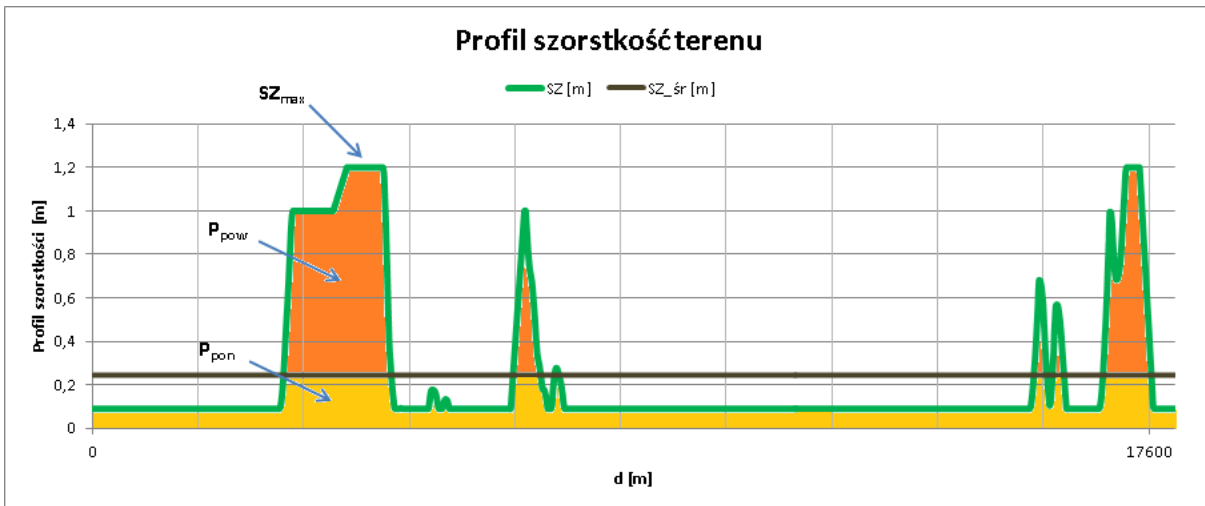
Tabela 7. Zakresy współczynnika topograficznego terenu.

Współczynnik topograficzny terenu wsp_{top} [-]	Dopasowanie modelu WASP do warunków terenowych
1,0 – 10,0	Dopasowanie bardzo dobre
4,0 – 7,0	Dopasowanie dobre
7,0 – 10,0	Dopasowanie słabe
> 10,0	Dopasowanie niezadowalające

Dla wszystkich wariantów obliczeniowych przedstawionych w rozdziale 5, obliczono współczynniki topograficzne terenu. Współczynniki te zostały obliczone na podstawie przebiegów profili wysokościowych i szorstkości terenu, te same profile zostały wykorzystane do przeprowadzenia weryfikacji eksperymentalnej numerycznego modelu przepływu wiatru WASP. Sposób analizy profilu wysokościowego i szorstkości terenu przedstawiono na rysunkach 23 i 24. Rysunek 23 ilustruje przebieg profilu wysokościowego terenu z uwzględnieniem wartości maksymalnej i średniej. Na rysunku 24 oznaczono pola powierzchni powyżej i poniżej średniej wartości szorstkości terenu. Przebieg profilu wysokościowego i szorstkości terenu pokazano na przykładzie odcinka pomiędzy masztami pomiarowymi M2 i M4. Odległość pomiędzy tymi masztami wynosi 17,6 km.



Rys. 23. Przebieg profilu wysokościowego terenu pomiędzy masztami pomiarowymi M2 – M4.



Rys. 24. Przebieg profilu szorstkości terenu pomiędzy masztami pomiarowymi M2 – M4.

Wyznaczone współczynniki topograficzne terenu dla wszystkich wariantów obliczeniowych zestawiono w tabeli 8.

Tabela 8. Zestawienie obliczonych współczynników topograficznych terenu.

Kierunek obliczeń	Współczynnik topograficzny terenu wsp_{top} [-]	Kierunek obliczeń	Współczynnik topograficzny terenu wsp_{top} [-]
M1→M2	4,37	M2→M3	5,66
M2→M1		M3→M2	
M1→M3	5,97	M2→M4	8,89
M3→M1		M4→M2	
M1→M4	4,89	M4→M3	2,84
M4→M1		M3→M4	

Symbolem „→” zaznaczono kierunek wykonywanych obliczeń.

Podczas wyznaczania współczynnika topograficznego terenu, zauważono, że nie ma znaczenia kierunek obliczeń ponieważ do jego obliczania nie wykorzystuje się danych o wietrzności z masztów pomiarowych. Jego określenie ma za zadanie szybkie sprawdzenie danej lokalizacji w odniesieniu do ewentualnego użycia numerycznego modelu przepływu wiatru WASP. Przykładowo dla masztów pomiarowych M1 i M2, niezależnie od kierunku

obliczeń, wartość współczynnika topograficznego wynosi 4,37. Uzyskane wartości współczynników topograficznych terenu mogą błędnie sugerować nieprecyzyjne działanie modelu WAsP. Taki przypadek miał miejsce przy ekstrapolowaniu wyników pomiarów na dystansie pomiędzy masztami pomiarowymi M2 i M4. Wartość współczynnika topograficznego pomiędzy tymi masztami wynosi 8,89 co sugeruje nieprecyzyjne działanie numerycznego modelu przepływu wiatru WAsP. Okazało się, podczas obliczeń w modelu WAsP, że nieprecyzyjne działanie wystąpiło w kierunku od masztu pomiarowego M2 w kierunku masztu pomiarowego M4. W odwrotnym kierunku działanie modelu WAsP cechowało się wysoką dokładnością. Wysokie wartości szorstkości terenu oraz duża różnica w wysokości terenu w bliskiej odległości od masztu pomiarowego silnie zaburzają wynik końcowy co znajduje swoje odzwierciedlenie w obliczonych wartościach współczynnika topograficznego terenu oraz obliczonych parametrach rozkładu Weibulla.

13.1. Dopasowanie współczynnika topograficznego terenu do modelu WAsP

W celu określenia dodatkowego wpływu ukształtowania i pokrycia terenu oraz uwzględnienia kierunku wykonywanych obliczeń, zaproponowano wprowadzenie skorygowanego współczynnika topograficznego terenu. Z analizy przedstawionej w pracy, wykorzystującej numeryczny model przepływu wiatru WAsP zauważono, że największy wpływ na końcowy wynik obliczeń ma orografia i szorstkość terenu w bliskim otoczeniu masztu pomiarowego. Aby to uwzględnić przy wyznaczaniu współczynnika topograficznego terenu, odległości pomiędzy masztami pomiarowymi podzielono na cztery równe odcinki. Przyporządkowano odpowiednią wagę współczynnikiowi wysokościowemu terenu (wsp_h) w zależności od tego, w którym z tych odcinków wystąpiła maksymalna wysokość w przebiegu profilu wysokościowego (h_{max}). Zasada była taka, że im maksymalna wysokość w przebiegu profilu wysokościowego terenu jest bliższa lokalizacji masztu pomiarowego z którego wykonywane były obliczenia, tym waga współczynnika wysokościowego jest większa.

Wagę współczynnika topograficznego oznaczono symbolem α i przyporządkowano następujące wartości:

- $\alpha = 1,50$ w przypadku wystąpienia maksymalnej wartości wysokości terenu w pierwszym odcinku pomiędzy masztami pomiarowymi (do 1/4 odległości),
- $\alpha = 1,25$ w przypadku wystąpienia maksymalnej wartości wysokości terenu w drugim odcinku pomiędzy masztami pomiarowymi (do 1/2 odległości),
- $\alpha = 1,00$ w przypadku wystąpienia maksymalnej wartości wysokości terenu w trzecim odcinku pomiędzy masztami pomiarowymi (do 3/4 odległości),
- $\alpha = 0,75$ w przypadku wystąpienia maksymalnej wartości wysokości terenu w ostatnim, czwartym odcinku.

Aby uwzględnić wpływ szorstkości terenu zaproponowano przypisanie wagi współczynniki szorstkości terenu (wsp_{sz}). Analogicznie do modyfikacji współczynnika wysokościowego terenu, analizując przebieg profilu szorstkości terenu, scharakteryzowano miejsca o najwyższych wartościach szorstkości (SZ_{max}). W zależności od wystąpienia maksymalnej wartości szorstkości terenu w poszczególnych czterech odcinkach pomiędzy masztami pomiarowymi, nadano odpowiednie wagi współczynniki szorstkości terenu, które oznaczono symbolem β i przyporządkowano następujące wartości:

- $\beta = 4,00$ w przypadku wystąpienia maksymalnej wartości wysokości terenu w pierwszym odcinku pomiędzy masztami pomiarowymi (do 1/4 odległości),
- $\beta = 3,00$ w przypadku wystąpienia maksymalnej wartości wysokości terenu w drugim odcinku pomiędzy masztami pomiarowymi (do 1/2 odległości),
- $\beta = 2,00$ w przypadku wystąpienia maksymalnej wartości wysokości terenu w trzecim odcinku pomiędzy masztami pomiarowymi (do 3/4 odległości),
- $\beta = 1,00$ w przypadku wystąpienia maksymalnej wartości wysokości terenu w ostatnim, czwartym odcinku.

Uwzględniając powyższe wagi współczynników wysokości i szorstkości terenu, skorygowany współczynnik topograficzny terenu, wyrażono za pomocą zależności:

$$wsp_{topK} = \alpha \cdot wsp_h + \beta \cdot wsp_{SZ} \quad (49)$$

gdzie: wsp_{topK} – skorygowany współczynnik topograficzny, wsp_h – współczynnik wysokości, wsp_{SZ} – współczynnik szorstkości, α – waga współczynnika wysokościowego terenu, β – waga współczynnika szorstkości terenu.

Po ponownym obliczeniu współczynników topograficznych terenu, uwzględniając ich dopasowanie do działania numerycznego modelu przepływu wiatru WAsP otrzymano wyniki obliczeń, które zaprezentowano w tabeli 9. Skorygowane współczynniki topograficzne terenu porównano z wcześniej wyznaczonymi współczynnikami topograficznymi terenu nie uwzględniającymi zmian w ukształtowaniu i pokryciu terenu w zależności od odległości wystąpienia tych zmian.

Tabela 9. Zestawienie skorygowanych współczynników topograficznych terenu.

Kierunek obliczeń	Wsp. topograficzny terenu		Kierunek obliczeń	Wsp. topograficzny terenu	
	wsp_{top} [-]	wsp_{topK} [-]		wsp_{top} [-]	wsp_{topK} [-]
M1→M2	4,37	3,98	M2→M3	5,66	8,88
M2→M1		13,55	M3→M2		6,63
M1→M3	5,97	5,53	M2→M4	8,89	16,69
M3→M1		6,86	M4→M2		8,50
M1→M4	4,89	4,40	M4→M3	2,84	4,28
M4→M1		5,86	M3→M4		12,59

Symbolem „→” zaznaczono kierunek wykonywanych obliczeń.

Porównując uzyskane wartości współczynników topograficznych terenu dla wszystkich wariantów obliczeniowych wyraźnie widać, że skorygowany współczynnik topograficznych terenu różni się od obliczeń bez uwzględnienia wag α i β . Wyniki obliczeń jednoznacznie

wskazują, że kierunek wykonywanych obliczeń ma znaczenie. Przykładowo, podczas obliczeń współczynnika topograficznego terenu pomiarowymi M2 a M4 jego wartość wyniosła 8,89 niezależnie od kierunku obliczeń. Skorygowana wartość współczynnika topograficznego terenu dla tego przypadku wynosiła 16,69 przy wykonywaniu obliczeń od masztu M2 w kierunku masztu M4, a w odwrotnym kierunku wyniosła 8,50. Analiza wag współczynników wysokości α i szorstkości β wskazuje, że wysokie wartości szorstkości terenu w bliskim otoczeniu masztu pomiarowego mają większe znaczenie niż zmiany w ukształtowaniu terenu. Znajduje to odzwierciedlenie w wynikach obliczeń uzyskanych z wykorzystaniem numerycznego modelu przepływu wiatru WAsP.

Należy zwrócić uwagę, że do wyznaczenia współczynnika topograficznego nie są brane pod uwagę takie dane jak prędkość i kierunek wiatru. Określenie współczynnika topograficznego opiera się tylko na podstawie analizy cyfrowych modeli: wysokościowego i szorstkości terenu.

14. Analiza wyników obliczeń

Analizę wyników obliczeń wykonano w celu oceny działania numerycznego modelu przepływu wiatru WAsP. Porównano obliczone przebiegi rozkładu Weibulla uwzględniające parametr skali A oraz parametr kształtu k , współczynniki topograficzne terenu oraz zmierzone i obliczone średnie prędkości wiatru. Stopień dopasowania modelu WAsP określono przy pomocy współczynników determinacji R^2 . Współczynnik determinacji R^2 jest miarą tego, jaki procent rzeczywistej wartości zmiennej jest wyjaśniany na podstawie danego modelu. Im jego wartość jest wyższa tym stopień dopasowania modelu jest lepszy. R^2 przyjmuje wartości z zakresu $\langle 0, 1 \rangle$. Zakres współczynnika determinacji R^2 oraz dopasowanie modelu mieści się w przedziałach:

- $0,9 \div 1,0$ – dopasowanie bardzo dobre
- $0,8 \div 0,9$ – dopasowanie dobre
- $0,6 \div 0,8$ – dopasowanie zadowalające
- $0,5 \div 0,6$ – dopasowanie słabe
- $< 0,5$ – dopasowanie niezadowalające

Obliczone współczynniki determinacji R^2 dla przebiegów rozkładu Weibulla w poszczególnych wariantach obliczeniowych przedstawiono w tabeli 10. Podczas analizy wyników obliczeń skupiono się głównie na przypadkach, w których wartości współczynnika determinacji R^2 wskazywały na najłabsze i najmocniejsze dopasowanie modelu WASP.

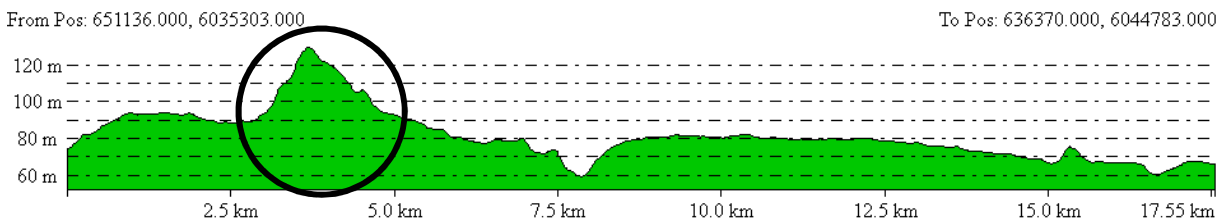
Tabela 10. Obliczone współczynniki determinacji R^2 dla przebiegów rozkładu Weibulla dla wariantów obliczeniowych.

Wariant obliczeniowy	Kierunek obliczeń	Współczynnik determinacji R^2 [-]
Wariant 1	M2→M1	0,835
	M3→M1	0,993
	M4→M1	0,998
Wariant 2	M1→M2	0,982
	M3→M2	0,992
	M4→M2	0,977
Wariant 3	M1→M3	0,995
	M2→M3	0,838
	M4→M3	0,993
Wariant 4	M1→M4	0,986
	M2→M4	0,783
	M3→M4	0,966

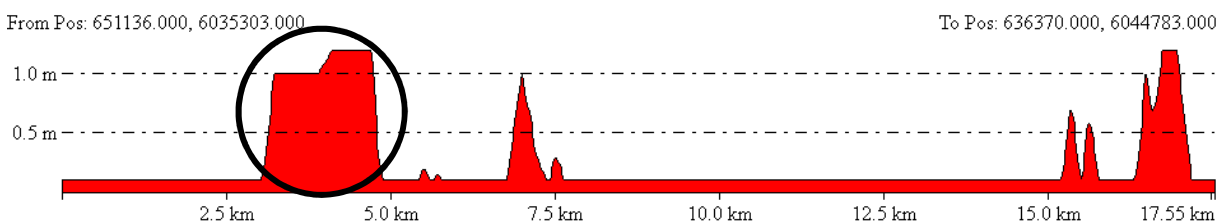
Symbolem „→” zaznaczono kierunek wykonywanych obliczeń.

Najniższe wartości współczynnika determinacji występowały zawsze podczas wykonywania obliczeń na podstawie danych z masztu pomiarowego M2. Wpływ na to mają wysokie wartości szorstkości terenu oraz duże zmiany w wysokości terenu w pobliżu masztu pomiarowego M2. Potwierdza to słuszność wprowadzenia skorygowanego współczynnika topograficznego terenu. Wokół masztu pomiarowego M2 w skali lokalnej (do 500 m) znajduje się kompleks leśny zaburzający przepływ wiatru. Wartość długości szorstkości dla obszarów leśnych wynosi 0,75 m. W odległości około 3,5 km od masztu pomiarowego znajduje się wzniesienie (zmiana rzędnych terenu dochodzi do 60 m) co powoduje mniejszą

dokładność wyników uzyskanych za pomocą numerycznego modelu przepływu wiatru WAsP. Uzyskane wyniki są mniej precyzyjne z uwagi na dynamiczną zmianę profilu wiatru wraz z wysokością. Jest to przypadek szczególny, ponieważ gwałtowne zmiany szorstkości terenu nakładają się z dużymi zmianami ukształtowania terenu co silnie zaburza końcowy wynik obliczeń co powinno dawać wysoką wartość współczynnika topograficznego terenu. Najgorsze dopasowanie wyników uzyskanych z modelu WAsP (parametry rozkładu Weibulla oraz średnia prędkość wiatru) do danych empirycznych miało miejsce przy wykonywaniu obliczeń na podstawie danych o wietrzności z masztu pomiarowego M2 do lokalizacji masztu pomiarowego M4. Dla tego przypadku wartość współczynnika determinacji R^2 wyniosła 0,783 i jest to najniższa wartość ze wszystkich wyników obliczeń. Na rysunku 25 przedstawiono profil wysokościowy terenu pomiędzy masztami pomiarowymi M2 i M4. Profil szorstkości terenu pomiędzy tymi masztami przedstawiono na rysunku 26. Na rysunkach zaznaczono gwałtowne zmiany wysokości i szorstkości terenu. Dla najlepszego przypadku wartość współczynnika determinacji R^2 wyniosła 0,998, a wartość skorygowanego współczynnika topograficznego wsp_{topK} 3,98 – wartość ta została uzyskana przy obliczeniach pomiędzy masztami pomiarowymi M1 i M2.



Rys. 25. Profil wysokościowy terenu pomiędzy masztami pomiarowymi M2 – M4.

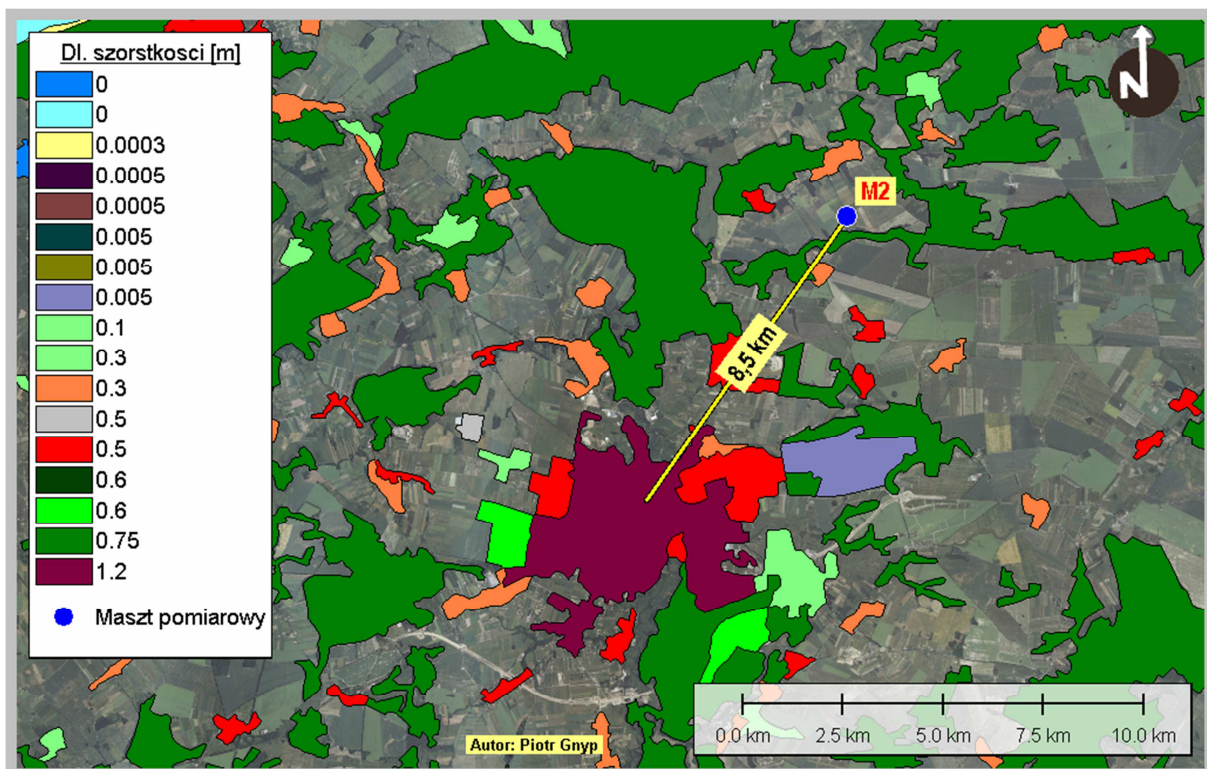


Rys. 26. Profil szorstkości terenu pomiędzy masztami pomiarowymi M2 – M4.

W wyniku analizy przeprowadzonej na podstawie danych pomiarowych pochodzących z lokalizacji masztów pomiarowych M1, M3 i M4 zauważono, że obliczone średnie prędkości wiatru są zbieżne z wartościami zmierzonymi. Maksymalne odchylenia w obliczonej prędkości wiatru w odniesieniu do zmierzonej prędkości wiatru dla najwyższego punktu pomiarowego (100 m) mieściły się w przedziale $-0,37 \text{ m/s} \div 0,10 \text{ m/s}$. Duże odchylenia w obliczonych prędkościach wiatru wystąpiły podczas obliczeń przy użyciu danych pomiarowych pochodzących z masztu pomiarowego M2. Różnice w obliczonych prędkościach wiatru w odniesieniu do zmierzonych były najwyższe i mieściły się w przedziale $-1,27 \text{ m/s} \div -0,93 \text{ m/s}$ dla wysokości 100 m. Obliczone parametry rozkładu Weibulla jednoznacznie wskazują, że największe różnice dla parametru skali A występowały przy obliczeniach na podstawie danych z masztu pomiarowego M2, różnice mieściły się w przedziale $-1,05 \div -1,44$. Dla obliczeń na podstawie danych z masztów pomiarowych M1, M2 i M4 różnice w obliczonych parametrach skali A mieściły się w przedziale $-0,77 \div 0,40$. Wyniki obliczeń na podstawie danych o wietrzności z masztu pomiarowego M2 były obarczone największym błędem a stopień dopasowania modelu WAsP był najniższy. Fakt ten można wyjaśnić w następujący sposób, że wysokie wartości szorstkości terenu oraz gwałtowne zmiany rzędnych terenu w pobliżu masztu pomiarowego zaburzają końcowy wynik obliczeń. Dla obliczeń na podstawie danych masztu pomiarowego M2 współczynnik determinacji R^2 osiągał najniższe wartości mieszczące się w przedziale $0,783 \div 0,835$ a współczynnik topograficzny terenu mieścił się w przedziale $8,88 \div 16,69$.

Na dominującym kierunku wiatru $228,1^\circ$ dla masztu pomiarowego M2 znajduje się miasto Słupsk (ok. 8,5 km). Wartości długości szorstkości dla obszarów miejskich są najwyższe i dochodzą do 2 m. Dla Słupska wartość ta maksymalnie osiąga 1,2 m. Dodatkowo w bliskim sąsiedztwie masztu M2 w odległości 500 m znajduje się kompleks leśny, wartości długości szorstkości dla obszarów leśnych wynoszą 0,75 m. W odległości 3,5 km od masztu pomiarowego M2 znajduje się duże przewyższenie terenu, różnice w rzędnych terenu dochodzą do 60 m. Obszar miejski, leśny i duże zmiany w ukształtowaniu terenu mają wpływ na obliczenia z wykorzystaniem numerycznego modelu przepływu wiatru WAsP. W istotny sposób zaburzają wynik końcowy co znajduje odzwierciedlenie w stopniu dopasowania modelu oraz zaproponowanym w pracy współczynniku topograficznym terenu, wyrażającym właśnie wpływ szorstkości i topografii terenu. W tym przypadku stwierdzono ograniczenia

w stosowaniu modelu WAsP. Na rysunku 27 przedstawiono zmiany w szorstkości terenu w bliskim otoczeniu masztu pomiarowego M2 na dominującym kierunku wiatru. W tabeli 11 przedstawiono obliczone parametry rozkładu Weibulla oraz średnią prędkość wiatru dla wszystkich wariantów obliczeniowych. W tabeli 11, dla porównania, dla każdego wariantu obliczeniowego, przedstawiono również parametry rozkładu Weibulla oraz średnią prędkość wiatru wyznaczoną na podstawie danych zmierzonych. W tabeli 12 zestawiono obliczone współczynniki determinacji R^2 , błędy procentowe PE i skorygowane współczynniki topograficzne terenu wsp_{topK} dla poszczególnych wariantów obliczeniowych. Błędy procentowe PE podano dla najwyższych anemometrów zainstalowanych na masztach pomiarowych na wysokościach 100 m i oznaczono symbolem PE_{top} . Analizując wyniki zawarte w tabeli 11, wyraźnie widać, że dla obliczeń wykonywanych na podstawie danych z masztu M2 parametry rozkładu Weibulla różniły się od parametrów wyznaczonych na podstawie danych zmierzonych. Średnia obliczona prędkość wiatru dla obliczeń na podstawie danych z masztu M2 zawsze była wyższa niż średnia zmierzona prędkość wiatru.



Rys. 27. Długości szorstkości w bliskim otoczeniu masztu pomiarowego M2.

Tabela 11. Obliczone parametry rozkładu Weibulla oraz średnia prędkość wiatru dla wszystkich wariantów obliczeniowych.

Wariant obliczeniowy	Kierunek obliczeń	Parametr A rozkładu Weibulla A [-]	Parametr k rozkładu Weibulla k [-]	Śr. obliczona prędkość wiatru $v_{\text{śr. obl}}$ [m/s]
Wariant 1	M2→M1	8,68	2,479	7,70
	M3→M1	8,00	2,393	7,09
	M4→M1	7,49	2,393	6,64
	M1*	7,63	2,447	6,77
Wariant 2	M1→M2	7,83	2,307	6,93
	M3→M2	8,12	2,365	7,19
	M4→M2	7,58	2,381	6,72
	M2*	7,98	2,620	7,09
Wariant 3	M1→M3	8,05	2,322	7,14
	M2→M3	9,10	2,436	8,07
	M4→M3	7,83	2,350	6,94
	M3*	7,99	2,510	7,09
Wariant 4	M1→M4	7,77	2,350	6,89
	M2→M4	8,74	2,471	7,75
	M3→M4	8,07	2,381	7,15
	M4*	7,30	2,548	6,48

* – parametry zmierzone.

Tabela 12. Obliczone współczynniki determinacji R^2 , błąd procentowy PE i skorygowany współczynnik topograficzny terenu wsp_{topK} dla poszczególnych wariantów obliczeniowych.

Wariant obliczeniowy	Kierunek obliczeń	Skorygowany wsp. top. terenu wsp_{topK} [-]	Współczynnik determinacji R^2 [-]	Błąd procentowy PE_{top} [%]
Wariant 1	M2→M1	13,55	0,835	13,74
	M3→M1	6,86	0,993	1,92
	M4→M1	5,86	0,998	4,73
Wariant 2	M1→M2	3,98	0,982	2,26
	M3→M2	6,63	0,992	5,22
	M4→M2	8,50	0,977	1,41
Wariant 3	M1→M3	5,53	0,995	0,71
	M2→M3	8,88	0,838	2,12
	M4→M3	4,28	0,993	13,82
Wariant 4	M1→M4	4,40	0,986	1,77
	M2→M4	16,69	0,783	5,61
	M3→M4	12,59	0,966	14,48

15. Podsumowanie i wnioski

Najważniejszym osiągnięciem rozprawy jest wykazanie ograniczeń w stosowaniu numerycznego modelu przepływu wiatru WASP dla lokalizacji charakteryzujących się wysokimi wartościami szorstkości terenu oraz dużymi zmianami rzędnymi terenu. W celu określenia tych ograniczeń porównano obliczone parametry rozkładu Weibulla oraz średnią prędkość wiatru z wartościami wyznaczonymi na podstawie danych zmierzonych. Stopień dopasowania modelu WASP do danej lokalizacji wyznaczono obliczając współczynnik determinacji R^2 dla obliczonych i rzeczywistych przebiegów rozkładu Weibulla. Średnie obliczone prędkości wiatru porównano ze średnimi zmierzonymi prędkościami i na podstawie różnic wyznaczono błąd procentowy PE .

W rozprawie przedstawiono autorską metodę opracowywania cyfrowych modeli szorstkości terenu oraz cyfrowych modeli wysokościowych terenu poprzez wykorzystanie danych dotyczących pokrycia terenu pochodzących z Europejskiej Agencji Ochrony Środowiska z bazy danych Corine Land Cover oraz misji SRTM-3. Opracowano metodę oceny i weryfikacji działania numerycznego modelu przepływu wiatru WASP na podstawie zaproponowanych i wyznaczonych współczynników topograficznych terenu. Współczynniki topograficzne terenu obliczono się na podstawie parametrów samego terenu, którymi są profil wysokościowych terenu oraz profil szorstkości terenu.

Ograniczenia w stosowaniu modelu WASP zaczynają pojawiać się, gdy szorstkości terenu w promieniu do 10 km od masztu pomiarowego osiągają wartości powyżej 1 m. Obszar o podwyższonej szorstkości charakteryzuje się wielkością co najmniej średniego miasta (około 50 km²) i musi być zlokalizowany na dominującym kierunku wiatru. W przypadku modelu wysokościowego terenu, WASP wykazuje ograniczenia gdy rzędne terenu gwałtownie zmieniają swoje wartości na krótkim odcinku. Zmiana wysokości terenu na odcinku do 5 km o 50 m w sposób istotny zaburza końcowy wynik obliczeń.

W przypadku obliczeń z wykorzystaniem danych o wietrzności z masztu pomiarowego M2 stwierdzono najgorsze dopasowanie modelu WASP skutkujące tym, że wyniki obliczeń w sposób istotny odbiegały od rzeczywistości. Współczynnik determinacji R^2 w zależności od kierunku wykonywanych obliczeń wyniósł 0,783 ÷ 0,835. Znalazło to swoje odzwierciedlenie w obliczonych współczynnikach topograficznych terenu, których wartość osiągała 16,69.

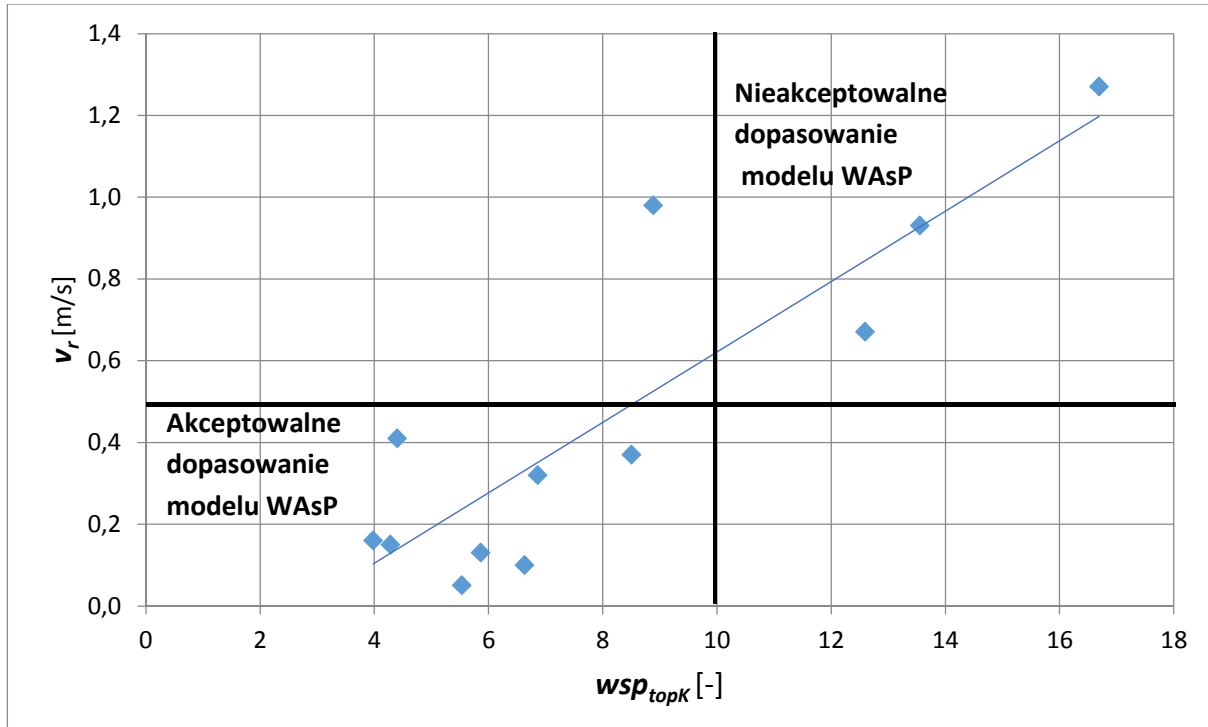
Analizując parametry rozkładu Weibulla, w szczególności parametr skali A , wyraźnie widać, że obliczenia na podstawie danych z masztu pomiarowego M2 w sposób wyraźny różnią się od obliczeń na podstawie danych o wietrzności z innych masztów pomiarowych. Obliczone wartości parametru A zawsze były większe od wartości wyznaczonych na podstawie danych zmierzonych. W zależności od kierunku obliczeń, wartość parametru A była większa o $1,05 \div 1,44$ od wartości rzeczywistych. Dla pozostałych masztów pomiarowych M1, M3 i M4 model WAsP dawał dobre wyniki, współczynnik dopasowania modelu R^2 mieścił się w przedziale $0,966 \div 0,998$. Dla tych przypadków najmniejsza wartość współczynnika topograficznego terenu wyniosła 3,98 (teren równinny), a najwyższa 12,59 (teren lekko zróżnicowany). Dla wartości współczynnika topograficznego terenu $wsp_{top} < 10$ różnice w obliczonych prędkościach wiatru na podstawie numerycznego modelu przepływu wiatru WAsP przyjmują wartości $v_r < 0,5$ m/s. Zależność pomiędzy wartościami współczynnika topograficznego terenu a różnicami w obliczonych prędkościach wiatru na podstawie modelu WAsP przedstawiono na rysunku 28.

Błąd procentowy PE oscylował pomiędzy wartościami $0,71\% \div 14,48\%$ dla wszystkich wariantów obliczeniowych. Wysoka wartość błędu procentowego PE wynosząca $13,74\%$ występowała przy obliczeniach wykonywanych na podstawie danych z masztu M2 do lokalizacji masztu M1. Spowodowane było to wysokimi wartościami szorstkości terenu w pobliżu masztu pomiarowego M2 oraz odległością pomiędzy masztami wynoszącą $48,6$ km. Wynika z tego, że dla takich przypadków dane o wietrzności z masztu pomiarowego nie powinny służyć jako dane wejściowe do obliczeń z wykorzystaniem modelu WAsP. Dla obliczeń wykonywanych na podstawie masztów pomiarowych M3 i M4, pomimo dobrego dopasowania modelu cechującego się wysokimi wartościami R^2 mieszczącymi się w przedziale $0,966 \div 0,993$ wartości błędu procentowego wynosiły $13,82\% \div 14,48\%$. Rozbieżności pomiędzy współczynnikami determinacji R^2 a błędami procentowymi PE znajdują swoje odzwierciedlenie w parametrze skali A rozkładu Weibulla. Parametr A dla lokalizacji masztu pomiarowego M3 i M4 różni się o $0,69$ natomiast parametr kształtu k jest zbliżony, różnica wynosi $0,038$. Przy zbliżonych wartościach parametru kształtu k , współczynnik determinacji R^2 będzie przyjmował wartości bliskie 1 z uwagi na to, że parametr k nadaje kształt rozkładowi Weibulla.

Podczas analizy przebiegu pionowych profili wiatru oraz średnich prędkości wiatru ze wszystkich wysokości pomiarowych dla masztów M1 \div M4, wyraźnie widać różnice w profilu

wiatru. Analizując przebieg profili wiatru dla masztów M1, M3 i M4, zaobserwowano, że początkowo do wysokości około 20 m nad poziomem terenu przebieg profili wiatru dla masztów M1 i M3 jest podobny. Powyżej 20 m nad poziomem terenu zaobserwowano większy wzrost średnich prędkości wiatru dla masztu M3. Na wysokości 100 m nad poziomem terenu średnie prędkości wiatru dla masztów M2 i M3 są takie same i wynoszą 7,09 m/s. Przebieg profilu wiatru dla masztu pomiarowego M4 był całkowicie odmienny niż w przypadku masztów pomiarowych M1, M2 i M3, w całym swoim przebiegu cechował się niższymi średnimi prędkościami wiatru. Powyższe różnice w średnich prędkościach wiatru pomiędzy masztami pomiarowymi wynikają z różnic w ukształtowaniu i pokryciu terenu w bliskim otoczeniu masztu pomiarowego, co potwierdzają obliczenia z wykorzystaniem modelu WAsP oraz wartości obliczonych współczynników topograficznych terenu.

Analiza i metody obliczeń przedstawione w pracy potwierdzają tezę, że wysokie wartości szorstkości terenu w bliskim otoczeniu masztu pomiarowego w połączeniu z terenem zakwalifikowanym jako skomplikowany nie pozwalają prawidłowo prognozować warunków wietrzności z wykorzystaniem numerycznego modelu przepływu wiatru WAsP.



Rys. 28. Zależność pomiędzy wartościami współczynnika topograficznego terenu a różnicami w obliczonych prędkościach wiatru na podstawie modelu WAsP.