Ocena materiału prognostycznego dla pola prędkości wiatru w dniu 1 kwietnia 2024 roku

Kierownik opracowania: dr Grzegorz Duniec (CMM, Zakład Prognoz Numerycznych COSMO) mgr Łukasz Kiełt (Biuro Prognoz Meteorologicznych w Krakowie) mgr Artur Surowiecki (Centralne Biuro Prognoz Lotniczych – Meteorologiczne Biuro Nadzoru) dr Natalia Pilguj (CMM, Zakład Analiz Meteorologicznych i Prognoz Długoterminowych) mgr inż. Piotr Szuster (CMM, Zakład Analiz Meteorologicznych i Prognoz Długoterminowych) dr Marcin Kolonko (CMM, Zakład Prognoz Numerycznych ALADIN) dr Piotr Sekuła (CMM, Zakład Prognoza Numerycznych ALADIN) mgr Gabriel Stachura (CMM, Zakład Prognoza Numerycznych ALADIN) dr hab. Jan Szturc, prof. IMGW (CMM, Zakład Nowcastingu) dr Przemysław Baran (CMM, Zakład Nowcastingu) mgr Anna Jurczyk (CMM, Zakład Nowcastingu) dr Andrzej Mazur (CMM, Zakład Prognoz Numerycznych COSMO) mgr Robert Pyrc (Centrum Hydrologiczno-Meteorologicznej Sieci Pomiarowo-Obserwacyjnej-Biuro w Krakowie)

1. Sytuacja synoptyczna w Europie w dniach 31 marca-1 kwietnia 2024

Zasadniczy wpływ na pogodę w Europie w analizowanym okresie miały dwa główne układy baryczne – rozległy obszar obniżonego ciśnienia z głównym ośrodkiem położonym na południowy zachód od Wysp Brytyjskich oraz wał wyżowy ciągnący się od wschodniej części Basenu Morza Śródziemnego po Kazachstan. Początkowo w niedzielę, 31 marca, nad Europą Środkową z południa na północ, od rejonu Sycylii po południową część Półwyspu Skandynawskiego, przebiegała strefa pofalowanego frontu atmosferycznego i związanych z nim lokalnych ośrodków niskiego ciśnienia (ryc. 1).



Ryc.1. Analiza sytuacji synoptycznej z godziny 00UTC dnia 31.03.2024.

Strefa ta oddzielała dwie silnie zróżnicowane termicznie masy powietrza – napływającą z południa do Europy Środkowo-Wschodniej (w tym do Polski) masę powietrza zwrotnikowego od napływającej z zachodu nad Europę Zachodnią masy powietrza polarnego morskiego. Na poziomie izobarycznym 500 hPa nad północno-wschodnim Atlantykiem zaznaczała się rozległa dolina fali górnej częściowo obejmująca Europę Zachodnią, podczas gdy nad Europą Wschodnią rozbudował się grzbiet (ryc.2). Taki rozkład układów barycznych nad Europą Środkową powodował dużą prędkość przepływu powietrza z południowego zachodu na północny wschód, jednocześnie znacząco spowalniając wędrówkę frontów atmosferycznych z zachodu na wschód.



Ryc.2. Mapa górna, poziom 500hPa z godziny 00UTC dnia 31.03.2024.

Z upływem czasu pole baryczne nad Europą uległo istotnej przebudowie. Zmiany pola były związane z wędrówką doliny fali górnej na wschód, a następnie na północny wschód. W niedzielę (31.03) w ciągu dnia zatoka niskiego ciśnienia, zgodnie z kierunkiem wiatru na poziomie sterującym, rozbudowała się na północny wschód, w kierunku krajów nadbałtyckich. Południowa część pofalowanego frontu rozmyła się w wyniku wzrostu ciśnienia we wschodniej części basenu Morza Śródziemnego, przy adwekcji znad Sahary jednorodnego termicznie powietrza oraz rozbudowie klina wysokiego ciśnienia w środkowej i górnej troposferze od Libii po Morze Jońskie (ryc. 3).



Ryc.3. Analiza sytuacji synoptycznej z godziny 12UTC dnia 31.03.2024.

Jednocześnie na północ od Pirenejów powstał nowy ośrodek niskiego ciśnienia. Zapoczątkowany procesami orograficznymi, pogłębiony przez zbliżającą się z zachodu górną zatokę (na poziomie 500 hPa oś zatoki o godzinie 18UTC znalazła się nad pasmem górskim, ryc.4), obecnością lewego wyjścia prądu strumieniowego oraz wzrastającym gradientem termicznym wzdłuż wschodniego wybrzeża Hiszpanii (zbliżający się front atmosferyczny).



Ryc.4. Mapa górna, poziom 500hPa z godziny 18UTC dnia 31.03.2024.

System ten połączył się z wcześniej wspomnianym układem, który znajdował się wtedy nad Niemcami i południową częścią Półwyspu Skandynawskiego. Następnie niż, który powstał w rejonie Pirenejów, przemieścił się szybko na północny wschód i w nocy z niedzieli na poniedziałek (31.03/01.04) znalazł się nad wschodnią Francją. Jednocześnie po zawietrznej stronie Alp w sytuacji południowego fenu utworzył się niż o genezie orograficznej. Ciśnienie w powyższych ośrodkach spadło do 993 hPa.



KieFF

Ryc.5. Analiza sytuacji synoptycznej z godziny 00UTC dnia 01.04.2024.



Ryc.6. Analiza sytuacji synoptycznej z godziny 03UTC dnia 01.04.2024.



Ryc.7. Analiza sytuacji synoptycznej z godziny 06UTC dnia 01.04.2024.



Ryc.8. Analiza sytuacji synoptycznej z godziny 09UTC dnia 01.04.2024.

W wielkanocny poniedziałek w ciągu dnia niż dalej przemieszczał się na północny wschód w stronę Morza Bałtyckiego. O godzinie 12:00 UTC jego ośrodek znalazł się nad Brandenburgią, a ciśnienie w jego ośrodku wynosiło 991 hPa. Związany z nim front chłodny przebiegał przez Czechy, Austrię i Włochy. Nad Karpatami Zachodnimi na mapach synoptycznych dolnych widoczne jest charakterystyczne dla sytuacji fenowej zagięcie izobar (ang. foehn nose, ryc.9), jest to efekt częściowej blokady po stronie dowietrznej powietrza napływającego do przeszkody górskiej.



Ryc.9. Źródło: https://www.idafe.com/English/34a_Foehn_en.html, materiał poglądowy.



Ryc.10. Analiza sytuacji synoptycznej z godziny 12UTC dnia 01.04.2024.



Ryc.11. Mapa górna, poziom 500hPa z godziny 12UTC dnia 01.04.2024.

Po stronie południowej pasma powstał klin a po stronie północnej zatoka, szczególnie wyraźnie zaznaczona w poniedziałek około południa, gdy różnica ciśnienia między dowietrzną a zawietrzną częścią Karpat Zachodnich przekroczyła 5 hPa (ryc.12).





Na poziomie 850 hPa zaznaczała się zatoka, której oś o godzinie 12 UTC rozciągała się nad Sudetami i Karpatami Zachodnimi (ryc. 13).



Ryc.13. Mapa górna, poziom 850hPa z godziny 12UTC dnia 01.04.2024.

Na poziomie 700 hPa zatoka rozciągała się od Niemiec przez Austrię po Słowenię a nad Karpatami Zachodnimi izohipsy wykazywały ugięcie lekko antycyklonalnie (ryc. 14).



Ryc.14. Mapa górna, poziom 700hPa z godziny 12UTC dnia 01.04.2024.

Na obu powyższych poziomach, w obszarze od Bawarii i Czech przez Austrię, zachodnią Słowację po Węgry i północną Chorwację, zaznaczał się znaczny gradient w polu geopotencjału a stacje aerologiczne leżące w pasie od północnego Adriatyku po Tatry notowały duże prędkości wiatru (na 700 hPa: Zagrzeb 30 m/s, Budapeszt 23 m/s).

W dzień 01.04 na stacjach synoptycznych IMGW-PIB zlokalizowanych w Tatrach, na Podhalu i Podbeskidziu zanotowano porywy wiatru o prędkości: Zakopane 25.8 m/s (13.30UTC), Bielsko-Biała 23.2 m/s (14.10UTC), Hala Gąsienicowa 32.6 m/s (około 7UTC), Kasprowy Wierch 42.6 m/s (9UTC).

Na wysokogórskiej stacji synoptycznej na szczycie Chopok (Słowacja, Niżne Tatry, 2007 m n.p.m.) odnotowało średnią prędkość południowego wiatru wynoszącą o godzinie 9UTC 35 m/s a o 12UTC 34 m/s.

Na sondażu aerologicznym wykonanym 01.04 o godz. 12:00 UTC na stacji Poprad-Ganovce (Ryc.15) wystąpił wyraźny wzrost prędkości wiatru na poziomie 2000-2500 m n.p.m. do prędkości z zakresu 25-30 m/s i niewielką inwersję temperatury, która została potwierdzona w sondażu wykonanym w Tarnowie (Ryc.16).



Ryc.15. Diagram aerologiczny z Popradu z godziny 00UTC i 12UTC dnia 01.04.2024.



Ryc.16. Diagram aerologiczny z Tarnowa z godziny 12UTC dnia 01.04.2024.

Z pomiarów wynikało, że warstwa inwersyjna zalegała na wysokości 2700-3200 m. n.p.m., a prędkość przepływu na ww. wysokości wynosiła 26-30 m/s.

Zbliżający się z zachodu front po przekroczeniu Alp, które wcześniej spowolniły jego ruch, przemieścił się na wschód i już wczesnym popołudniem od południowego zachodu wkroczył nad teren Polski, gdzie w kolejnych godzinach przyniósł opady deszczu i burze z silnymi porywami wiatru (25.7 m/s o 15.20UTC, stacja telemetryczna Polkowice Dolne, woj. Dolnośląskie). W nocy z poniedziałku na wtorek (01/02.04) niż znad wschodnich Niemiec przemieścił się nad Bałtyk Południowy, w punkcie okluzji, gdzie nadal występował znaczny gradient termiczny, wydzielił się nowy ośrodek, który zgodnie ze spływem w środkowej troposferze przemieścił się na północny wschód. Związany z niżem front atmosferyczny przemieścił się nad Polską, a za nim napłynęła chłodniejsza masa powietrza pochodzenia polarno-morskiego.



Kiett.

Ryc.17. Analiza sytuacji synoptycznej z godziny 18UTC dnia 01.04.2024.



Ryc.18. Analiza sytuacji synoptycznej z godziny 00UTC dnia 02.04.2024.

Przez większą część analizowanego okresu do Polski napływała wyjątkowo ciepła jak na tę porę roku masa powietrza zwrotnikowego znad Afryki Północnej (stacje synoptyczne notowały pył w powietrzu a na obrazach satelitarnych można było stwierdzić obecność pyłu przenoszonego znad Sahary na północ). W okresie od 30 do 31 marca na stacjach meteorologicznych IMGW-PIB były obserwowane wartości temperatury przekraczające dotychczasowe absolutne wartości maksymalne marca. W dniu 30 marca w Tarnowie (stacja telemetryczna) zanotowano 26,4°C, co jest najwyższą wartością temperatury w marcu zarejestrowaną kiedykolwiek przez sieć pomiarową IMGW-PIB. Również 1 kwietnia w znacznej części kraju odnotowano wartości temperatury maksymalnej z zakresu 20-26°C.

Ze względu na rejon pochodzenia, napływająca do Polski masa powietrza była bardzo sucha. Na stacjach synoptycznych w południowej i wschodniej części Polski zarówno w niedzielę, jak i w poniedziałek odnotowano wilgotność względną na poziomie 20-40%. Na uwagę zasługuje fakt, że w niedzielę na Kasprowym Wierchu występował silny wiatr południowo-zachodni skręcający o godzinie 18:00 na południowy. W nocy (31/01) początkowo zaobserwowano słaby opad deszczu, a wilgotność względna osiągnęła 95%. Dopiero nad ranem wilgotność względna zaczęła spadać utrzymując się na poziomie 50-80%. Wilgotność względna wzrosła do wartości powyżej 95% dopiero wraz z nadejściem chłodnego frontu atmosferycznego.

2. Analiza numeryczna sytuacji meteorologicznej – modele GFS 0.25°, ECMWF 0.1°, UM 4 km, ICON 2.5 km, COSMO 2.8 km, ALARO 4 km oraz AROME 2 km

W celu oceny materiału prognostycznego analizie poddano numeryczne prognozy z modeli GFS 0.25°, ECMWF 0.1°, UM 4 km, ICON 2.5 km, COSMO 2.8 km, ALARO 4 km oraz AROME 2 km, z terminów 06:00, 09:00, 12:00, 15:00 UTC na podstawie startu pracy tych modeli o godz. 00 UTC dnia 01.04.2024.

Przeprowadzona analiza pola barycznego wskazuje na rozbieżne scenariusze położenia ośrodków barycznych nad obszarem Europy Centralnej oraz ich głębokości w dniu 1 kwietnia 2024 (ryc. 19). Prognozy poszczególnych modeli wskazywały na podobne położenie i przemieszczanie się układu niskiego ciśnienia, gdzie o godz. 06:00 UTC układ ten z centrum w okolicy Norymbergi, przemieszczał się w kierunku północno wschodnim. W późniejszych godzinach centrum tego układu znajdowało się w okolicach granicy polsko-niemieckiej na wysokości województwa zachodniopomorskiego. Nieco odmienny przebieg wydarzeń był prognozowany przez model COSMO 2.8 km. Układ niżowy położony był nieco bardziej na zachód wzgledem pozostałych modeli, a jego centrum w późniejszych godzinach (15:00 UTC) znajdowało się nad obszarem północnych Niemiec. Model ten charakteryzowały też niższe wartości ciśnienia w centrum (987 hPa o godz. 15:00 UTC), oraz zwiazany z tym wiekszy poziomy gradient baryczny. Pozostałe modele wskazywały na wartości ciśnienia w centrum niżów rzędu 990 hPa. Poszczególne prognozy wskazywały również na obecność zatoki niskiego ciśnienia nad terytorium Czech o godz. 09:00 UTC. W kolejnych krokach czasowych, wraz z przemieszczaniem się niżu, obszar zatoki obejmował również część Polski zachodniej. Prognozowana przez wszystkie modele obecność klina wysokiego ciśnienia nad obszarem Słowacji, powodowała zwiększenie poziomego gradientu barycznego nad obszarami południowej Polski, co jest szczególnie widoczne w prognozach od godz. 09:00 UTC. Część modeli, tj. GFS 0.25°, ECMWF 0.1°, ICON 2.5 km oraz UM 4 km, wskazywała również na scenariusz rozwoju niewielkiego ośrodka niskiego ciśnienia na południu Polski w obrębie lokalnej zatoki niskiego ciśnienia w rejonie Wadowic.

Na ryc. 20. przedstawiono prognozy barycznej topografii względnej z modelu ECMWF 0.1° dla poziomów izobarycznych 500 i 700 hPa oraz wartości geopotencjału. W poszczególnych krokach prognozy, mapa poziomu izobarycznego 700 hPa wskazuje na występowanie centrum układu niskiego ciśnienia nad wodami Morza Celtyckiego. W przypadku dwóch analizowanych poziomów, prognoza na godz. 12:00 UTC wskazywała na wzrosty ciśnienia w centrum układu, co było jednoznaczne z słabnięciem tego ośrodka niżowego. Według wyliczeń modelu, o godzinie 00:00 UTC nad Europą Zachodnią zlokalizowana była dolina długiej fali górnej z osią rozciągającą się od obszaru Morza Celtyckiego po południową Hiszpanię. Kroki prognozy o godzinie 06:00 i 12:00 UTC wskazywały na obecność krótkiej fali górnej (widocznej na poziomach 700 i 500 hPa) której oś przebiegała od wybrzeży Beneluksu, następnie wzdłuż granicy francusko-niemieckiej w kierunku Austrii. W obszarze jej występowania intensyfikował się powierzchniowy ośrodek niskiego ciśnienia, którego położenie według poszczególnych modeli i kroków czasowych zostało zaprezentowane na ryc. 19.



Pressure reduced to MSL [hPa]: 2024-04-01 00 UTC init

Ryc. 19. Prognozy ciśnienia atmosferycznego zredukowanego do poziomu morza według poszczególnych modeli w kolejnych krokach czasowych (start prognozy o 00:00 UTC dnia 01.04.2024).



Ryc. 20. Prognozy wysokości geopotencjału na poziomach izobarycznych 500 i 700 hPa według modelu ECMWF 0.1° (start prognozy o godz. 00:00 UTC dnia 01.04.2024). Skala barwna przedstawia baryczną topografię względną poziomu 500 hPa w odniesieniu do poziomu 1000 hPa.

Na ryc. 21. przedstawiono wyniki prognoz numerycznych prędkości i kierunku wiatru na wysokości izobarycznej 850 hPa. Wyniki poszczególnych modeli numerycznych różnią się od siebie w zakresie prędkości przepływu mas powietrza oraz zakresu przestrzennego jego dynamiki. Większość modeli (ICON 2.5 km, COSMO 2.8 km, ALARO 4 km, AROME 2 km) prognozowała rozległy obszar o przepływie mas powietrza skierowanym na północny wschód, charakteryzującym się prędkością nie przekraczającą 50 kt (92,6 km/h), z ograniczonymi obszarami wyróżniającymi się prędkościami do 60 kt (111,1 km/h). Wyższe wartości na istotnym obszarze (od 60 do 70 kt; 111,1-129,6 km/h) były prognozowane przez modele GFS 0.25°, ECMWF 0.1° oraz UM 4km o godz. 12:00 UTC. Obszar przepływu o prędkości 70-80 kt (129,6-148,2 km/h) rozciągający się na północ od Nowego Targu aż po okolice Suchej Beskidzkiej i Myślenic został zobrazowany jedynie przez model UM 4 km dla godziny 12:00 UTC. W ogólnym ujęciu obszar prognozowanego przez modele ECMWF 0.1° oraz UM 4 km silnego przepływu mas powietrza obejmował nie tylko rejon Podhala, ale również znaczny obszar Beskidów Zachodnich. Maksymalne otrzymane wartości rzędu ponad 70 kt (129,6 km/h) były reprezentowane przez model UM 4 km. Należy również zwrócić uwagę wysokość poziomu 850 hPa przebiegającą około 800 metrów nad położeniem Zakopanego.

Wyniki prognoz numerycznych prędkości i kierunku wiatru na wysokości izobarycznej 700 hPa zostały przedstawione na ryc. 22. Uzyskane wyniki cechują się mniejszym, choć nadal zauważalnym zróżnicowaniem przestrzennym w porównaniu do rozkładu dla wysokości izobarycznej 850 hPa. Wynika to z jego przebiegu na wyższej wysokości AGL co skutkuje mniejszym oddziaływaniem powierzchni terenu. Predkość wiatru wzrasta w kolejnych krokach czasowych osiągając wartości szczytowe około godziny 12:00 UTC. Przeważająca część modeli na godzinę wskazuje na wartości przekraczające 40 kt (74,1 km/h) nad obszarem Tatr i Podhala. Według prognoz na tę godzinę, istotną część wspomnianych terenów charakteryzuje południowo-zachodni przepływ mas powietrza o prędkości 50-60 kt (92,6-111,1 km/h). Najwyższą dynamiką przepływu charakteryzują się wyniki uzyskane przez modele UM 4 km, COSMO 2.8 km oraz ECMWF 0.1°.



850 hPa wind [kt]: 2024-04-01 00 UTC init

Ryc. 21. Prognozy prędkości kierunku wiatru na poziomie 850 hPa według poszczególnych modeli w kolejnych krokach czasowych (start prognozy o 00:00 UTC dnia 01.04.2024 r.). Czerwony prostokąt określa rejon Tatr i okolic.



700 hPa wind [kt]: 2024-04-01 00 UTC init

Ryc. 22. Prognozy prędkości i kierunku wiatru na poziomie 700 hPa według poszczególnych modeli w kolejnych krokach czasowych (start prognozy o 00:00 UTC dnia 01.04.2024 r.). Czerwony prostokąt określa rejon Tatr i okolic.

W przypadku prognozowanych prędkości wiatru na wysokości 10 m n.p.g., w czasie godzin porannych (6:00 UTC) model ICON 2.5 km wskazywał na możliwość występowania prędkości przekraczających 30 kt (55,5 km/h; ryc. 23). W późniejszych godzinach prognoza tego samego modelu wskazywała na występowanie wartości osiągających maksymalnie 50 kt (92,6 km/h) w rejonie Tatrzańskiego Parku Narodowego. Prognozy pozostałych modeli wskazywały na niższe wartości, z reguły nie przekraczające 30 kt (55,5 km/h). Co istotne, obszarami o wyższych

prędkościach był nie tylko rejon Tatr, ale również okolice Bielsko-Białej, Suchej Beskidzkiej i Raciborza. Analizowane modele o mniejszej rozdzielczości, czyli GFS 0.25° i ECMWF 0.1° wskazywały również na strefę podwyższonych prędkości w okolicach Gorlic i Krosna. W przypadku wszystkich modeli podwyższone prędkości wiatru reprezentowane były przede wszystkim przez kroki czasowe 9:00 i 12:00 UTC.

Oprócz prędkości wiatru, analizie poddano również prognozowane porywy (ryc. 24). W przypadku większości analizowanych modeli, prognozowane porywy wiatru na godz. 06:00 UTC nie przekraczały 50 kt (92,6 km/h). W godzinach wczesnoporannych, modele o większych oczkach siatki, tj. ECMWF 0.1° i GFS 0.25°, wskazywały na możliwość występowania porywów do maksymalnie 40 kt (74,1 km/h), kiedy wyniki wyliczeń AROME 2 km i COSMO 2.8 km prognozowały lokalne porywy do 60 kt (111,1 km/h) w Tatrach. W późniejszych godzinach, każdy z modeli wskazywał znacznie bardziej rozległe obszary objęte prognozowanymi porywami do 50 kt (92,6 km/h). Modele o większej rozdzielczości poziomej (AROME 2 km, ALARO 4 km, COSMO 2.8 km, UM 4 km) wskazywały na występowanie porywów nawet do 60 kt (111,1 km/h). Warto zwrócić uwagę na rozległy obszar prognozy porywów do 60 kt (111,1 km/h) w pasie od Czarnego Dunajca, przez Suchą Beskidzką, aż do Bielska Białej, który był wskazywany jedynie przez model UM 4 km. Analizując poszczególne kroki czasowe prognozowanych porywów wiatru i modeli, należy zwrócić uwagę, że prognoza modelu COSMO 2.8 km wskazywała na występowanie znacznie niższych wartości w porównaniu do innych modeli o siatce <10 km, które wskazywały na możliwy charakter zdarzeń o większej intensywności, szczególnie w rejonie Tatr. Wyniki symulacji modeli ALARO 4 km, AROME 2 km i ECMWF 0.1° wskazywały również na możliwość występowania porywów do 50 kt (92,6 km/h) w późniejszych godzinach prognozy, tj. 15:00 UTC.



10m AGL wind [kt]: 2024-04-01 00 UTC init

Ryc. 23. Prognozy prędkości i kierunku wiatru z wysokości 10 m n.p.g. według poszczególnych modeli w kolejnych krokach czasowych (start prognozy o 00:00 UTC dnia 01.04.2024 r.). Czerwony prostokąt określa rejon Tatr i okolic. Wartości naniesione na mapie wskazują na prognozowane porywy wiatru.



10m AGL wind gust [kt]: 2024-04-01 00 UTC init

Ryc. 24. Prognozy porywów wiatru z wysokości 10 m n.p.g. według poszczególnych modeli w kolejnych krokach czasowych (start prognozy o 00:00 UTC dnia 01.04.2024 r.). Czerwony prostokąt określa rejon Tatr i okolic.

W kontekście analizy prędkości i porywów wiatru, istotna jest również analiza profili pionowych. Wyniki wybranych symulacji zestawiono na ryc. 7. Symulacja modelu ICON 2.5 km wskazuje na występowanie prędkości wiatru >70 kt (129,6 km/h) po stronie zawietrznej Tatr. Należy zwrócić uwagę, że dla tej samej lokalizacji, model wskazywał na ujemne wartości pionowej składowej wektora prędkości wiatru, co oznacza osiadanie powietrza w tej strefie. Skutkowało to występowaniem dużych prędkości wiatru w dolnych warstwach profilu, także w warstwie przyziemnej. Ze względu na występujące ruchy pionowe wstępujące na szerokości 49.5°N, prędkości wiatru w

pionowym profilu stają się niższe. Kolejna, znacznie słabsza strefa osiadania prognozowana była w szerokości geograficznej 49.7°N, gdzie ponownie jest widoczny wzrost prędkości wiatru, sięgający warstwy przyziemnej. Model UM 4 km również wskazywał na występowanie strefy związanej z osiadaniem po stronie zawietrznej. W przypadku tej symulacji, strefa występowania prędkości wiatru powyżej 65 kt w warstwie 1,3-2,5 km jest znacznie bardziej rozległa i rozciąga się bardziej na północ. Wynika to z braku obecności silnych stref pionowych ruchów wznoszących. Prawdopodobnie z tego względu model UM 4 km wskazywał na większe prędkości porywów i prędkości wiatru w obszarach oddalonych na północ od Tatr (Ryc. 24). Model COSMO 2.8 km, podobnie jak ICON 2.5 km, wskazywał na występowanie strefy osiadania bezpośrednio przy obszarze zawietrznym Tatr, a położona blisko strefa dodatnich wartości pionowej składowej wektora prędkości wiatru ograniczała przemieszczanie się strefy wysokich prędkości dalej na północ.



Ryc. 25. Prognozowany pionowy profil prędkości wiatru (górny wiersz) i pionowej składowej wektora prędkości wiatru (dolny wiersz) według prognoz ICON 2.5 km, UM 4 km i COSMO 2.8 km na termin 12 UTC 01.04.2024 r (start prognozy o 00:00 UTC tego samego dnia).

Przeprowadzona analiza modeli numerycznych wskazuje na zróżnicowanie wyników prognoz rozważanych produktów. Modele GFS 0.25° oraz ECMWF 0.1° ze względu na dość rzadką siatkę obliczeniową w porównaniu do pozostałych modeli związane były z otrzymaniem bardziej jednorodnego rozkładu przestrzennego. Większe zróżnicowanie reprezentowane było przez modele mezoskalowe o znacznie większych rozdzielczościach, tj. UM 4 km, ICON 2.5 km, COSMO 2.8 km, ALARO 4 km, AROME 2 km. Gęstsza siatka obliczeniowa, umożliwiająca dokładniejszą reprezentację zróżnicowanej rzeźby terenu, pozwoliła wskazać na większe zróżnicowanie przestrzenne analizowanych zmiennych, przede wszystkim porywów wiatru. Analiza pionowych profili pozwala wyjaśnić odmienne scenariusze reprezentowane przez modele mezoskalowe, co w niniejszej analizie przedstawiono na przykładzie modelu UM 4 km, związanego z większym zasięgiem prognozowanych silnych porywów wiatru.

3. Analiza porównawcza prognoz numerycznych (model ALARO i AROME) z obserwacjami

Do oceny i analizy komparatystycznej wyników symulacji z obserwacjami wykorzystano symulacje otrzymane z modeli numerycznych ALARO (4 km) i AROME (2 km) dla przebiegów z godziny 00 UTC, 06 UTC, 12 UTC i 18 UTC z 31/3/2024. Szczególną uwagę skupiono na godzinach przedpołudniowych i południowych (9 i 12 UTC, czyli 11 i 14 czasu środkowoeuropejskiego). Wybrano zakres domen dla obydwu modeli (ALARO i AROME), która obejmuje rozpatrywany obszar oraz w obrębie której znajdują się stacje synoptyczne, które posłużą do weryfikacji prognozowanych wartości średniego wiatru i porywów rejestrowanych na stacjach synoptycznych (Kasprowy Wierch (12650), Zakopane (12625), Bielsko-Biała (12600) oraz Nowy Sącz (12660).



Model ALARO, porywy wiatru [m/s], 9:00 UTC 1/4/2024 Przebieg modelu z 06 h, 31/3/2024

Ryc.26. Prognoza porywów wiatru na godzinę 9 UTC (11 czasu urzędowego) prognozowanych przez model ALARO o rozdzielczości przestrzennej 4 km. Maksymalne prognozowane wartości porywów wiatru w Tatrach wyniosły 36 m/s.

Model AROME, porywy wiatru [m/s] 9:00 UTC 1/4/2024 Przebieg modelu z 06h, 31/3/2024



Ryc. 27. Prognoza porywów wiatru dla godziny 9 UTC (11 czasu urzędowego) prognozowanych przez model AROME o rozdzielczości przestrzennej 2 km. Maksymalne prognozowane wartości porywów wiatru w Tatrach wyniosły 40 m/s.

Z symulacji numerycznych (ryc. 26, 27) wynika, że oba modele prognozowały maksymalne wartości porywów wiatru do 35-40 m/s. Należy podkreślić, że obliczenia numeryczne są przeprowadzane w węzłach obliczeniowych siatki numerycznej, które nie pokrywają się z lokalizacją stacji synoptycznej Kasprowy Wierch. Na ryc. 28 i 29 przedstawiono symulację prędkości wiatru z której wynika, że najwyższa prędkość wiatru prognozowana była na godzinę 09 UTC (11 czasu urzędowego), a następnie prognozowana prędkość wiatru na godzinę 12 UTC była nieznacznie niższa (patrz rys. 31).

Model AROME, porywy wiatru [m/s] z 12:00 UTC dnia 1/4/2024. Przebieg modelu z 06h, 31/3/2024



Ryc. 28. Prognoza porywów wiatru dla godziny 12 UTC (14 czasu urzędowego) prognozowanych przez model AROME. Widoczne (w porównaniu z ryc. 27) osłabienie wiatru o kilka m/s, przy jednoczesnym zwiększeniu obszaru z dużą prędkością wiatru (co jest widoczne dla północnej i zachodniej lokalizacji Tatr).

Model ALARO, prognoza prędkości wiatru [m/s] dla 9:00 UTC dnia 1/4/2024, przebieg modelu z 12h, 31/3/2024



Ryc. 29. Prognoza prędkości wiatru dla godziny 9 UTC prognozowanej przez model ALARO. Maksymalna prognozowana prędkość wiatru nie przekroczyła 16 m/s.

Model AROME, prognoza prędkości wiatru [m/s] dla 9:00 UTC 1/4/2024. Przebieg modelu z 12h, 31/3/2024



Ryc. 30. Prognoza prędkości wiatru dla godziny 9 UTC prognozowanej przez model AROME. Widoczne zmniejszenie wartości prędkości do 16 m/s (czyli niecałych 60 km/h). Maksymalna prognozowana prędkość wiatru nie przekroczyła 16 m/s.

Model AROME, prognoza prędkości wiatru [m/s] dla 12:00 UTC 1/4/2024. Przebieg modelu z 12h 31/3/2024



Ryc. 31. Prognoza prędkości wiatru dla godziny 12 UTC prognozowanej przez model AROME. Widoczne (w porównaniu z ryc. 5) stopniowe zwiększenie strefy dużych prędkości wiatru przy jednoczesnym obniżeniu maksimum z 16 na 12 m/s.

Reasumując, wszystkie przebiegi modeli ALARO i AROME dały spójny obraz prognozowanego pola wiatru. Przewidywania porywów wiatru sięgały wartości 36-40 m/s (dla godziny 9 UTC), 32-36 m/s (dla godziny 12 UTC). Natomiast spodziewane przez modele wartości średniej prędkości wiatru wynosiły 16 m/s (dla 9 UTC) i 12 m/s (dla 12 UTC). Pomimo różniącej się rozdzielczości obu modeli (mezoskalowego - 4 km i wysokiej rozdzielczości - 2 km) otrzymane symulacje wartości prędkości były zbliżone.

Poniżej została przedstawiona weryfikacji modeli dla pięciu prognoz rozpoczynających się o godzinie 00, 06, 12, 18 UTC w dniu 31/3/2024 oraz z godziny 00 UTC z dnia 1/4/2024. Analizę komparatystyczną wykonano tylko dla stacji synoptycznych, ponieważ z tych stacji dostępne są pomiary porywów wiatru. Jak już wspomniano wyżej do porównania wybrano stacje: Kasprowy wierch (12650), Zakopane (12625), Bielsko-Białą (12600) i Nowy Sącz (12660).



Ryc. 32. Porównanie zmierzonej średniej prędkości wiatru i porywów wiatru dla stacji Kasprowy Wierch z wynikami prognostycznymi otrzymanymi z modelu ALARO dla prognoz startujących o godzinie o godzinie 00, 06, 12, 18 UTC w dniu 31/3/2024 oraz prognozy z dnia 1/4/2024 00 UTC.

Analiza ryc. 32 wskazuje, że dla Kasprowego Wierchu prognozy prędkości wiatru były spójne, ale zaniżały wartości o 10 m/s względem zmierzonych wartości. Dla porywów wiatru prognozowane prędkości były zaniżone o około 15 m/s (model ALARO).

Analogicznie jak w przypadku modelu ALARO prognozy prędkości i porywów wiatru modelu AROME są spójne, niestety znacząco zaniżone w stosunku do rzeczywistości, o 10-15 m/s.



Ryc. 33. Porównanie zmierzonej średniej prędkości wiatru i porywów wiatru dla stacji Kasprowy Wierch z wynikami prognostycznymi otrzymanymi z modelu AROME dla prognoz startujących o godzinie o godzinie 00, 06, 12, 18 UTC w dniu 31/3/2024 oraz prognozy z dnia 1/4/2024 00 UTC.

W Zakopanym (ryc. 34), zmierzone prędkości były mniejsze (9 m/s dla prędkości wiatru i 25 m/s dla porywów wiatru), a rozbieżności między modelami a późniejszą obserwacją także były znacząco mniejsze.



Ryc. 34. Porównanie zmierzonej średniej prędkości wiatru i porywów wiatru dla stacji Zakopane z wynikami prognostycznymi otrzymanymi z modelu ALARO dla prognoz startujących o godzinie o godzinie 00, 06, 12, 18 UTC w dniu 31/3/2024 oraz prognozy z dnia 1/4/2024 00 UTC.

W Bielsku-Białej (ryc. 35) model AROME prognozował wartości prędkości wiatru i prędkości porywów zbliżone do zmierzonych wartości na stacji meteorologicznej (15 m/s dla średniej prędkości i 20-25 m/s dla porywów wiatru). Symulacje numeryczne z kolejnych przebiegów wykazywały spójność.



Ryc. 35. Porównanie zmierzonej średniej prędkości wiatru i porywów wiatru dla stacji Bielsko Biała z wynikami prognostycznymi otrzymanymi z modelu AROME dla prognoz startujących o godzinie o godzinie 00, 06, 12, 18 UTC w dniu 31/3/2024 oraz prognozy z dnia 1/4/2024 00 UTC.



Ryc. 36. Porównanie zmierzonej średniej prędkości wiatru i porywów wiatru dla stacji Nowy Sącz z wynikami prognostycznymi otrzymanymi z modelu ALARO dla prognoz startujących o godzinie o godzinie 00, 06, 12, 18 UTC w dniu 31/3/2024 oraz prognozy z dnia 1/4/2024 00 UTC.

Prognozy pola wiatru dla stacji Nowy Sącz (ryc. 36) wykazywały zadawalającą zgodność z pomiarami. Pozostaje pytanie, skąd takie zaniżenie wartości prędkości i porywów wiatru dla Kasprowego Wierchu? Odpowiedzi należy szukać w ograniczeniach modeli numerycznych oraz niedokładnym odwzorowaniem topografii terenu w modelach numerycznych. Złożenie obu czynników skutkować może niedoszacowanie lub przeszacowanie wartości prognozowanych pól meteorologicznych.

4. Analiza wyników modelu INCA-PL2 podczas silnego wiatru 2024-04-01

Wprowadzenie

Modele nowcastingowe INCA-PL2, powstały na bazie austriackiego modelu INCA, które wykorzystują następujące¹:

- dane telemetryczne ze stacji meteorologicznych,
- prognozy numerycznych z modelu AROME 2 km.

Modele nowcastingowe prognozują pole wiatru średniego natomiast nie prognozują porywów wiatru.

Działanie modelu oparte jest na połączeniu danych wejściowych tj. pomiarów i prognoz za pomocą liniowej funkcji wagowej. Horyzont prognozy to 8 godz. Połączenie to odbywa się z uwzględnieniem topografii terenu oraz zależności parametrów meteorologicznych od wysokości nad poziomem morza. Zatem prognozy nowcastingowe powstają z downskalowanych do 1 km prognoz numerycznych AROME, adjustowanych do danych telemetrycznych przy uwzględnieniu orografii terenu. Zatem jeśli idzie o możliwość predykcji groźnych zjawisk, jest ona możliwa, jeśli albo model mezoskalowy je przewidzi, albo gdzieś już pojawiły się zmierzone wartości bliskie lub osiągające wartości progowe do ostrzeżeń.

Wszystkie powyższe wykresy zostały sporządzona dla prognoz wiatru średniego (jak już wspomniano INCA-PL2 nie generuje prognoz porywów wiatru). Ostrzeżenia dotyczące zjawiska związanego z wiatrem są generowane w oparciu o wartości progowe:

- 1. stopień > 15 m/s,
- 2. stopień > 20 m/s,
- 3. stopień > 25 m/s.

Sytuacja z 2024-04-01

INCA-PL2 często przeszacowuje prognostyczne wartości prędkości wiatru co może prowadzić do nadmiernego wzmacnia zjawiska w wysokich partiach gór (ryc. 1), dlatego podczas opracowywania prognoz synoptycznych jak i analiz naukowych należy mieć to na względzie.

¹ Biała Księga Numerycznych Modeli Pogody, pod redakcją Michała Ziemiańskiego, Mariusza Figurskiego, Andrzeja Wyszogrodzkiego, Seria Wydawnictw Technicznych IMGW-PIB, 2023, Aneks 4. https://www.imgw.pl/sites/default/files/2023-08/imgw-pib-monografia-2023.07-biala-ksiega-168x235mm-v1.pdf



Ryc. 37. Prognoza AROME z 0:00 UTC na 7:00 (+7 godz.) (na górze) oraz prognoza INCA-PL2 z 6:00 na 7:00 (+1 godz). (na dole).

Na poniższych wykresach przedstawiono prognozy z całej doby 2024-04-01 dla stacji synoptycznej: Morskie Oko, dla czasów wyprzedzenia: 0 (czyli analizy), 4 i 8 godz. Przy dłuższych czasach wyprzedzenia prognozy INCA-PL2 coraz bardziej stają się zbieżne z symulacjami prognoz numerycznych AROME co jest ogólną prawidłowością. Na poniższych wykresach prędkość wiatru jest wyrażona w m/s.

Trzy wiersze opisu osi poziomej na wykresach oznaczają od dołu:

- czas wygenerowania (godz. w UTC),
- czas wyprzedzenia (w godz.),
- czas, na którą jest prognoza (godz. w UTC).



Morskie Oko



Ryc. 38. Prognoza z całej doby 2024-04-01 dla stacji synoptycznej Morskie Oko dla czasów wyprzedzenia: 0 (czyli analizy), 4 i 8 godz.

W przypadku Kasprowego Wierchu – najwyżej położonego posterunku, najwyższymi wartościami były wartości zmierzone na stacji. INCA-PL2 dostosowuje prognozy AROME do orografii terenu w 1-km siatce, co mogło być przyczyną niższych wartości prognozowanych przez INCA-PL2 dla tej stacji.

Kasprowy Wierch





Ryc. 39. Prognoza z całej doby 2024-04-01 dla stacji synoptycznej Kasprowy Wierch dla czasów wyprzedzenia: 0 (czyli analizy), 4 i 8 godz.

Natomiast w Zakopanem najwyższe wartości przyjmują prognozy AROME, co zapewne również wynika z uśredniającego działania modelu. Natomiast INCA-PL2 daje prognozy najniższe, co może być z kolei wynikiem nadmiernego wpływu orografii na model.

Zakopane





Ryc. 40. Prognoza z całej doby 2024-04-01 dla stacji synoptycznej Zakopane dla czasów wyprzedzenia: 0 (czyli analizy), 4 i 8 godz.

Poniżej pokazano wykres prognoz dla Zakopanego, pokazujące prognozy z różnymi czasami wyprzedzenia, na godz. 9:00 UTC. Wartość zmierzona pozostaje ta sama, skok w prognozowanych wartościach AROME związany jest z przejściem na prognozy z innego przebiegu. Natomiast prognozy INCA-PL2 wykazują pewną dynamikę, w tym przypadku raczej spadkową, na skutek różnego wpływu pomiarów.



Ryc. 41. Porównanie prognoz wiatru INCA-PL2 i AROME na godz. 2024-04-01, 9:00 UTC, wygenerowanych z różnymi czasami wyprzedzenia, z wartością zmierzoną.

W analizowanym dniu od rana zostały przekroczone wartości progowe nawet dla 3. stopnia zagrożenia, ale jedynie dla najwyższych partii gór w okolicach Kasprowego Wierchu. Jest to jednak wynikiem w dużym stopniu działania algorytmu uwzględniającego wpływ topografii terenu na zmienność parametrów meteorologicznych. Model INCA-PL na skutek powyższych przyczyn gorzej sobie radzi w wysokich górach, natomiast znacznie lepiej na terenach z mniejszym zróżnicowaniem orografii terenu.

5. Porównanie symulacji prognoz wiązkowych i symulacji deterministycznych (model COSMO) z obserwacjami

Poniżej przedstawiono prognostyczne wartości średniego wiatru otrzymanego z modelu wiązkowego. W celu przybliżenia systemu prognoz wiązkowych zacytowany zostanie fragment książki wydanej przez IMGW-PIB (Biała Księga Numerycznych Modeli Pogody, pod redakcją Michała Ziemiańskiego, Mariusza Figurskiego, Andrzeja Wyszogrodzkiego, Seria Wydawnictw Technicznych IMGW-PIB, 2023, Aneks 2. Konsorcjum Modelowania COSMO, Andrzej Wyszogrodzki, Grzegorz Duniec) System prognoz wiązkowych zbudowany jest z 20 realizacji prognoz modeli COSMO 2,8 km zasilanych warunkami brzegowymi i początkowymi dostarczanymi z modelu COSMO 7 km, pochodzącymi z czterech poprzednich prognoz tego modelu. Umożliwia to wygenerowanie czterech niezależnych statystycznie zestawów prognoz. W każdym z zestawów ustawiona jest jedna realizacja podstawowa i cztery perturbacje warunków początkowych dla parametrów glebowych: po dwie perturbacje pola wilgotności (c-soil, surface-area index of evaporating fraction) oraz dwie perturbacje temperatury gleby do głębokości 1.5 m w głąb ziemi (Tg). Wyniki z wszystkich 20 realizacji są przetwarzane statystycznie w celu wyliczenia wartości średnich i ekstremalnych, wariancji oraz prawdopodobieństwa przekroczeń krytycznych wartości.

Przedstawiono wartości średnie otrzymane z uśrednienia po zespole, spread, czyli wariancję oraz wartości maksymalne i minimalne. Przeanalizowano prognozę dla stacji w Bielsku-Białej, na Kasprowym Wierchu oraz dla Zakopanego. Prognozy pochodziły z czterech przebiegów. Dwa z czterech przebiegów były zrealizowane 31 marca 2024 roku o godzinie 12 UTC, 18 UTC oraz dwa pozostałe 1 kwietnia 2024 roku o godzinie 00 UTC oraz 06 UTC. Z analizy otrzymanych wyników wynika, że prognostyczne wartości średniej prędkości wiatry były znaczącą poniżej wartości zmierzonych na stacjach synoptycznych.

	Wartości w km/h	Wartości w km/h	Wartości w km/h	Wartości w km/h	Stacja synoptyczna	Początek prognozy
godz.	Średnia po zespole	spread	Min.	Max.		rrrrmmddhh
0	19,71	1,46	17,88	21,83	Bielsko-Biała	2024033112
3	17,68	2,36	14,65	21,44		
6	26,11	3,30	23,18	31,85		
9	28,86	3,18	24,44	32,79		
12	28,75	1,74	26,50	31,04		
15	27,35	0,79	26,30	28,37		
18	26,55	0,71	25,63	27,62		
21	35,01	1,71	33,03	37,37		
24	32,90	4,35	26,65	39,02		
27	24,41	0,93	22,92	25,69		
30	15,71	4,11	9,66	21,01		
33	16,15	4,94	8,67	23,30		
36	21,58	1,02	19,92	23,89		
0	19,23	2,31	16,65	22,73	Zakopane	
3	17,69	5,81	9,69	26,67		
6	10,62	2,96	6,86	15,19		
9	21,71	2,72	18,37	25,77		
12	20,30	2,05	18,18	23,57		
15	17,87	2,19	15,39	20,97		
18	22,79	3,50	17,28	26,27		
21	26,01	0,80	24,89	27,18		
24	19,94	3,22	16,23	25,07		
27	15,83	3,05	12,14	20,58		
30	24,01	6,79	17,41	34,47		
33	20,63	4,86	13,01	25,43		
36	9,46	4,62	3,74	16,64		
0	32,33	4,20	25,65	37,12	Kasprowy Wierch	
3	31,12	4,00	26,78	36,94		
6	25,18	2,69	20,69	28,03		
9	30,74	1,17	29,03	32,18		
12	31,98	2,15	30,01	35,63		
15	29,37	3,64	24,82	34,37		
18	36,44	3,18	32,36	40,09		
21	36,80	1,11	34,99	38,03		
24	34,80	2,66	30,97	38,57		
27	29,72	3,97	25,09	36,26		
30	38,96	1,83	36,38	41,52		
33	35,80	6,77	24,19	41,21		
36	13,28	5,10	8,04	21,35		
0	24,13	2,50	21,57	28,20	Bielsko-Biała	2024033118
3	26,91	3,45	21,72	30,99		
6	28,04	2,05	25,02	30,35		
9	28,57	1,62	26,95	31,23		
12	25,72	2,59	21,35	28,17		
15	34,09	1,23	32,53	36,00		
18	32,56	4,47	26,72	39,04		
21	22,86	2,38	18,71	25,37		
24	17,02	2,63	13,73	21,12		

27	16,26	4,97	9,63	23,80		
30	21,40	0,81	19,87	22,93		
33	17,07	3,51	12,97	22,94		
36	22,96	1,72	21,27	26.38		
0	15,78	1,73	13,40	18,15	Zakopane	
3	21.36	2.26	18.31	24.75		
6	20.24	1.21	18.90	22.20		
9	18.86	2.86	15.40	22.59		
12	21.34	3.44	16.71	25.65		
15	25.87	1.00	24.25	27.15		
18	20.52	3.17	16.48	25.34		
21	16,43	2,77	12,95	20.89		
24	24.75	6.35	17.07	34.44		
27	22.65	7.49	13.24	32.49		
30	11.10	5.65	3.65	17.87		
33	13.90	3.37	10.13	19.70		
36	16.52	3.55	12.12	22.45		
0	27.23	1.20	25.86	28.71	Kasprowy Wierch	
3	31.02	1.86	28.68	33,30		
6	31.75	1.06	30.26	33,16		
9	28.10	3.07	23.66	31.77		
12	33.94	4.35	28.45	40.23		
15	36,39	1.52	34.05	38.05		
18	34,15	2.95	30,66	38,65		
21	30.27	3.95	25.41	36,49		
24	38.97	1.63	36.51	41.12		
27	35.71	6.83	24.25	41.28		
30	12.44	3.92	7.59	17.37		
33	12.45	3.32	8.49	17.55		
36	17.81	2.72	14.17	21.87		
0	24.61	1.14	23.54	26.49	Bielsko-Biała	2024040100
3	28.00	2.19	25.89	31.75		
6	28.24	2.14	25.12	30,70		
9	33 44	1,59	30,69	35,35		
12	31.52	3 15	26.25	35.00		
15	24.09	3.58	19.08	29.43		
18	13 62	4 52	5.87	17 77		
21	14,97	3.77	9,39	20.23		
24	21.17	1.26	18,89	23.74		
27	13,99	1.95	11.43	17.51		
30	20.95	1.53	18,12	22.48		
33	25.88	0.95	24.01	27.39		
36	22 25	3 67	16.08	26.50		
0	18,98	0.85	17,75	20.01	Zakopane	
3	19,87	2.86	16.09	23.44		
6	18 91	<u>-,</u> 30 3 87	13 65	23,32		
9	24 68	1 48	21.86	26,32		
12	21,68	4.65	16.56	29.50		
15	17 04	3 47	13 23	20,00		
18	19.77	4,28	14,58	25.57		
-		,	,	- /		

21	22,40	8,19	11,62	32,59		
24	10,12	4,77	3,70	15,88		
27	10,98	2,46	7,07	14,32		
30	14,45	1,59	11,76	16,55		
33	19,25	0,78	17,68	20,39		
36	19,55	1,67	16,90	22,61		
0	30,08	0,84	29,14	31,33	Kasprowy Wierch	
3	26,65	3,72	21,64	31,29		
6	30,50	3,85	25,09	34,83		
9	34,67	1,63	31,95	36,51		
12	34,64	3,36	30,85	39,92		
15	29,65	2,50	26,17	33,08		
18	38,80	1,39	36,73	40,48		
21	34,91	8,38	20,62	41,37		
24	10,74	3,86	5,38	15,17		
27	9,80	2,37	6,43	13,74		
30	16,53	1,58	14,51	19,22		
33	18,28	1,01	16,46	20,04		
36	18,66	1,39	15,93	21,14		
0	22,32	1,55	20,60	24,44	Bielsko-Biała	2024040106
3	32,81	2,00	30,39	36,30		
6	34,78	1,57	32,04	36,41		
9	25,87	4,22	19,22	30,61		
12	12,88	4,51	5,78	18,12		
15	11,56	5,05	4,61	19,25		
18	21,98	1,98	19,40	25,33		
21	14,38	2,83	10,87	19,15		
24	20,69	1,50	17,98	22,33		
27	26,35	1,28	24,17	28,39		
30	21,81	3,28	16,52	26,39		
33	20,34	3,51	15,97	25,11		
36	20,70	1,99	17,79	23,97		
0	14,72	2,65	10,45	17,59	Zakopane	
3	22,32	2,07	19,21	25,25		
6	24,41	4,02	18,94	30,22		
9	16,89	3,80	11,91	22,99		
12	20,80	4,20	14,05	25,63		
15	21,25	8,52	10,85	32,59		
18	9,75	5,04	2,33	15,34		
21	10,14	2,54	6,60	14,73		
24	14,56	1,90	11,12	16,70		
27	19,44	0,96	17,73	20,76		
30	19,84	1,15	17,65	21,74		
33	18,54	1,62	16,25	21,79		
36	16,86	2,91	12,66	21,34		
0	30,71	2,86	26,43	33,60	Kasprowy	
3	33,93	2,79	29,27	37,02		
6	35,75	2,99	31,47	40,02		
9	29,72	2,57	25,80	33,03		
12	38,93	1,39	36,63	40,40		

15	34,19	7,85	20,78	41,14
18	10,27	4,10	4,69	15,36
21	10,16	2,47	6,62	14,05
24	16,14	2,31	12,54	19,32
27	19,21	1,06	17,77	20,98
30	18,68	1,08	16,81	20,78
33	16,65	1,90	13,86	19,82
36	17,13	2,15	12,86	19,72

Tab. 1. Prognoza pola wiatru otrzymana z numerycznych prognoz wiązkowych. Fragmenty oznaczone na czerwono wskazują na prognozę pola wiatru na godzinę 09 UTC, 12 UTC oraz 15 UTC, 1 kwietnia 2024 roku. Godziny w kolumnie natomiast oznaczają krok czasowy prognozy od chwili startu modelu.

Tab. 2. Wiązkowa prognoza numeryczna pola średniego wiatru vs. dane pomiarowe ze stacji meteorologicznej

Stacja meteorologiczna w Zakopanem, dla przebiegu z dnia 31 III 2024 roku, godzina 12 UTC.

		/ 1		/ 0	
Godzina w UTC	Średnia prędkość wiatru,	Minimalna prędkość	Maksymalna prędkość	Zmierzona wartość	Zmierzona wartość
	km/h	wiatru [km/h]	wiatru [km/h]	średniej prędkości wiatru	porywu wiatru
				[km/h]	[km/h]
9	26,01	24,89	27,18	32,4	72
12	19,94	16,23	25,07	32,4	90
15	15,83	12,14	20,58	21,6	93,6

Stacja meteorologiczna w Bielsku-Białej, dla przebiegu z dnia 31 III 2024 roku, godzina 12 UTC.

Godzina w UTC	Średnia prędkość wiatru,	Minimalna prędkość	Maksymalna prędkość	Zmierzona wartość	Zmierzona wartość
	km/h	wiatru [km/h]	wiatru [km/h]	średniej prędkości wiatru	porywu wiatru
				[km/h]	[km/h]
9	35,01	33,03	37,37	12,4	61,2
12	32,90	26,65	39,02	50,4	79,2
15	24,41	22,92	25,69	39,6	82,8

Stacja meteorologiczna na Kasprowym Wierchu, dla przebiegu z dnia 31 III 2024 roku, godzina 12 UTC.

Godzina w UTC	Średnia prędkość wiatru, km/h	Minimalna prędkość wiatru [km/h]	Maksymalna prędkość wiatru [km/h]	Zmierzona wartość średniej prędkości wiatru [km/h]	Zmierzona wartość porywu wiatru [km/h]
9	36,80	34,99	38,03	61,2	154,8
12	34,80	30,97	28,57	43,2	154,8
15	29,72	25,09	36,26	57,6	140,4

Stacja meteorologiczna w Zakopanem, dla przebiegu z dnia 31 III 2024 roku, godzina 18 UTC.

		<u> </u>			
Godzina w UTC	Średnia prędkość wiatru,	Minimalna prędkość	Maksymalna prędkość	Zmierzona wartość	Zmierzona wartość
	km/h	wiatru [km/h]	wiatru [km/h]	średniej prędkości wiatru	porywu wiatru
				[km/h]	[km/h]
9	25,87	24,25	27,15	32,4	72
12	20,52	16,48	25,34	32,4	90
15	16,43	12,95	20,89	21,6	93,6

Stacja meteorologiczna w Bielsku-Białej, dla przebiegu z dnia 31 III 2024 roku, godzina 18 UTC.

Godzina w UTC	Średnia prędkość wiatru,	Minimalna prędkość	Maksymalna prędkość	Zmierzona wartość	Zmierzona wartość
	km/h	wiatru [km/h]	wiatru [km/h]	sredniej prędkości wiatru	porywu wiatru
				[KIII/II]	[KIII/11]
9	34,09	32,53	36,00	12,4	61,2
12	32,56	26,72	39,04	50,4	79,2
15	22,86	18,71	35,37	39,6	82,8

Stac	ia meteoroloo	piczna na Kas	prowym Wierchu.	dla przebiegu	, z dnia 31 III 20	24 roku, godzina 18 UTC.
0.00						z i iona, goazina io o ioi

, .	1 2		0		
Godzina w UTC	Średnia prędkość wiatru,	Minimalna prędkość	Maksymalna prędkość	Zmierzona wartość	Zmierzona wartość
	km/h	wiatru [km/h]	wiatru [km/h]	średniej prędkości wiatru	porywu wiatru
				[km/h]	[km/h]
9	30,27	25,41	36,49	61,2	154,8
12	38,97	36,51	41,12	43,2	154,8
15	35,71	24,25	41,28	57,6	140,4

Stacja meteorologiczna w Zakopanem, dla przebiegu z dnia 01 IV 2024 roku, godzina 00 UTC.

Godzina w UTC	Srednia prędkość wiatru,	Minimalna prędkość	Maksymalna prędkość	Zmierzona wartość	Zmierzona wartość
	km/h	wiatru [km/h]	wiatru [km/h]	średniej prędkości wiatru	porywu wiatru
				[km/h]	[km/h]
9	24,68	21,86	26,37	32,4	72
12	21,68	16,56	29,50	32,4	90
15	17,04	13,23	22,70	21,6	93,6
Stacja meteorologiczna w Bielsku-Białej, dla przebiegu z dnia 01 IV 2024 roku, godzina 00 UTC.					
Godzina w UTC	Średnia prędkość wiatru,	Minimalna prędkość	Maksymalna prędkość	Zmierzona wartość	Zmierzona wartość
	km/h	wiatru [km/h]	wiatru [km/h]	średniej prędkości wiatru	porywu wiatru
				[km/h]	[km/h]
9	33,04	30,69	35,35	12,4	61,2
12	31,52	26,25	35,00	50,4	79,2
15	24,09	19,08	29,43	39,6	82,8

Stacja meteorologiczna na Kasprowym Wierchu, dla przebiegu z dnia 01 IV 2024 roku, godzina 00 UTC.

,	1 1		0	. 0	
Godzina w UTC	Średnia prędkość wiatru,	Minimalna prędkość	Maksymalna prędkość	Zmierzona wartość	Zmierzona wartość
	km/h	wiatru [km/h]	wiatru [km/h]	średniej prędkości wiatru	porywu wiatru
				[km/h]	[km/h]
9	34,67	31,95	36,51	61,2	154,8
12	34,64	30,85	39,92	43,2	154,8
15	29,65	26,17	33,08	57,6	140,4

Stacja meteorologiczna w Zakopanem, dla przebiegu z dnia 01 IV 2024 roku, godzina 06 UTC.

Godzina w UTC	Średnia prędkość wiatru, km/h	Minimalna prędkość wiatru [km/h]	Maksymalna prędkość wiatru [km/h]	Zmierzona wartość średniej prędkości wiatru	Zmierzona wartość porywu wiatru
9	22,32	19,21	25,25	[km/h] 32,4	[km/h] 72
12	24,41	18,94	30,22	32,4	90
15	16,89	11,91	22,99	21,6	93,6

Stacja meteorologiczna w Bielsku-Białej, dla przebiegu z dnia 01 IV 2024 roku, godzina 06 UTC.

Godzina w UTC	Średnia prędkość wiatru,	Minimalna prędkość	Maksymalna prędkość	Zmierzona wartość	Zmierzona wartość
	km/h	wiatru [km/h]	wiatru [km/h]	średniej prędkości wiatru	porywu wiatru
				[km/h]	[km/h]
9	32,81	30,39	36,30	12,4	61,2
12	34,78	32,04	36,41	50,4	79,2
15	25,87	19,22	30,61	39,6	82,8

Stacja meteorologiczna na Kasprowym Wierchu, dla przebiegu z dnia 01 IV 2024 roku, godzina 06 UTC.

o a o o no o o o o o o o o o o o o o o o					
Godzina w UTC	Średnia prędkość wiatru, km/h	Minimalna prędkość wiatru [km/h]	Maksymalna prędkość wiatru [km/h]	Zmierzona wartość średniej prędkości wiatru	Zmierzona wartość porywu wiatru
				[km/h]	[km/h]
9	33,93	29,27	37,02	61,2	154,8
12	35,75	31,47	40,02	43,2	154,8
15	29,72	25,80	33,03	57,6	140,4

Z powyższej analizy wynika, że prognostyczne wartości pola średniego wiatru otrzymane w wyniku uśrednienia po zespole były zaniżone. Jedynie prognoza średniej prędkości wiatru na godzinę 9 UTC dla przebiegów z godziny 18 UTC (31 III), 00 UTC (01 IV) i 06 UTC (01 IV) była zawyżona.



Ryc. 42. Prognoza deterministyczna pola porywów wiatru, model COSMO 2k8, start prognozy godz. 00 UTC, 1 kwietnia 2024 roku.

Godzina 9 UTC	Prognostyczny poryw wiatru [km/h]	Zmierzony poryw wiatr [km/h]	
Zakopane	45,36	72	
Bielsko-Biała	54,29	61,2	
Kasprowy Wierch	47,77	154,8	

Tab. 2. Porównanie danych pomiarowych z prognostycznymi wartości porywów otrzymanych z modelu COSMO2k8 dla przebiegu deterministycznego dla godz. 9 UTC, 01 kwietnia 2024 roku.



Ryc. 43. Prognoza deterministyczna pola porywów wiatru, model COSMO 2k8, start prognozy godz. 00 UTC, 1 kwietnia 2024 roku.

Godzina 12 UTC	Prognostyczny poryw wiatru [km/h]	Zmierzony poryw wiatr [km/h]	
Zakopane	57,6	90	
Bielsko-Biała	67	79,2	
Kasprowy Wierch	39,31	154,8	

Tab. 3. Porównanie danych pomiarowych z prognostycznymi wartości porywów otrzymanych z modelu COSMO2k8 dla przebiegu deterministycznego dla godz. 12 UTC, 01 kwietnia 2024 roku.



Ryc. 44. Prognoza deterministyczna pola porywów wiatru, model COSMO 2k8, start prognozy godz. 00 UTC, 1 kwietnia 2024 roku.

Godzina 15 UTC	Prognostyczny poryw wiatru [km/h]	Zmierzony poryw wiatr [km/h]
Zakopane	54,86	93,6
Bielsko-Biała	35,14	82,8
Kasprowy Wierch	26,68	140,4

Tab. 4. Porównanie danych pomiarowych z prognostycznymi wartości porywów otrzymanych z modelu COSMO2k8 dla przebiegu deterministycznego dla godz. 15 UTC, 01 kwietnia 2024 roku.

Deterministyczna prognoza porywów wiatru otrzymana z przebiegu deterministycznego modelu COSMO o rozdzielczości 2,8 km była zaniżona w stosunku do rzeczywistych porywów zmierzonych na stacjach synoptycznych.

6. Skutki

W wyniku zaistniałej w analizowanym okresie sytuacji anemologicznej doszło w rejonie południowej Polski do licznych negatywnych zdarzeń w środowisku przyrodniczym. Według informacji przekazanych przez rzecznika prasowego KGPSP pana Karola Kierzkowskiego do kumulacji zdarzeń, związanych z występowaniem silnego wiatru, doszło w poniedziałek 1 kwietnia. Największa ilość interwencji Straży Pożarnej miała miejsce w woj. małopolskim (357) oraz śląskim (203).

Najbardziej ucierpiały powiaty tatrzański, nowotarski i limanowski. Najczęściej skutkiem wysokich prędkości wiatru były połamane gałęzie, konary i fragmenty drzew oraz całe drzewa, a także zerwane pokrycia dachowe, całe dachy oraz fragmenty elewacji.

Niestety w regionie doszło również do tragicznych zdarzeń. Pierwsze z nich miało miejsce po godzinie 11⁰⁰ w Zakopanem, w wyniku przewrócenia się drzewa na samochód zginęła 23-letni kobieta. Kolejne zdarzenie miało miejsce również w Zakopanem, gdzie wg świadków na wychodzącą z kościoła rodzinę, przewróciło się drzewo. W wyniku tego zdarzenia, po przewiezieniu do szpitala, śmierć poniósł 9 letni chłopiec.

Około godziny 14³⁰ wg informacji podanych przez rzecznika małopolskiej straży pożarnej oraz małopolskiej policji w wyniku przewrócenia się drzewa śmierć poniosły trzy osoby w tym niestety także 7 letni chłopiec.

Ze względu na ilość poszkodowanych oraz skalę skutków, można szacować, że był to jeden z najtragiczniejszych epizodów wiatrowych w południowej Polsce od wielu lat.

Ze względu na maksymalne prędkości wiatru, największe szkody w drzewostanie wystąpiły na obszarze Tatrzańskiego Parku Narodowego w rejonie Morskiego Oka, Hali Ornak i Doliny Chochołowskiej, przy czym skala zniszczeń będzie znana dopiero po całkowitym oszacowaniu jej przez odpowiednie służby.

Najwięcej uszkodzeń budynków, zerwanych poszyć dachowych oraz całych dachów zanotowano w rejonie Podhala, ale również w zachodniej części Kotlinny Orawsko Nowotarskiej. Ze wstępnych ustaleń ilość ta przekroczyła 80 przypadków.

Duże prędkości wiatru występowały również w rejonie Beskidu Wyspowego, w powiecie limanowskim. Według posiadanych informacji oraz relacji medialnych, służby interweniowały ponad 30 razy, co było związane przede wszystkim z usuwaniem przewróconych drzew oraz zabezpieczaniem uszkodzonych budynków. Do podobnego zdarzenia jak w Zakopanym doszło w Łostówce, gdzie około godziny 13⁰⁰ powalone przez wiatr drzewo spadło na przejeżdzający samochód. Na szczęście, kierująca nim kobieta nie ucierpiała.

Okresowo trudna sytuacja występowała również na Śląsku. W regionie odnotowano ponad 200 zdarzeń związanych z silnym wiatrem, występowały one najczęściej na południu regionu w Bielsku-Białej, a także w powiatach bielskim, cieszyńskim i żywieckim. Skutkiem silnego wiatru były przede wszystkim przewrócone przez wiatr drzewa oraz uszkodzone elementy elewacji.

W całym regionie karpackim w wyniku uszkodzeń linii przesyłowych, lokalnie do odbiorców w dniu 1 kwietnia nie docierał prąd. Do części odbiorców dostawy zostały przywrócone dopiero kolejnego dnia.