

Symulacja smogowa w obszarze Doliny Wisły

Symulacje dyskretne systemów złożonych

Rok akademicki 2018/2019

Adrianna Kopeć

Sylwia Kwiatkowska

Katarzyna Pencak

Kraków 2019

1. Opis problemu

Polska zajmuje czołową pozycję na liście najbardziej zanieczyszczonych krajów Europy. Miasto Kraków oraz okolice każdego roku walczą z problemem smogu, szczególnie w okresie zimowym. Przeprowadzana symulacja pokazuje model propagacji najpowszechniejszego ostatnimi czasy rodzaju zanieczyszczeń – smogu, z uwzględnieniem czynników atmosferycznych tj. wiatru oraz temperatury w obszarze zwanym „Doliną Wisły”.

2. Analiza wstępna

Podczas zapoznawania się z literaturą fachową znaleźliśmy wiele potencjalnych rozwiązań danego problemu. Wszystkie jednak opierały się na rozwiązaniach w postaci modeli matematycznych, które bardzo dobrze opisywały zjawisko rozprzestrzeniania się pyłu zawieszonego, lecz w ujęciu symulacyjnym były one dość niewygodnym rozwiązaniem, gdyż wyniki przedstawiane były w formie wykresów, co nie pozwalało na zastosowanie mapy obszaru „Doliny Wisły”.

Rozważany przez nas był również model z wykorzystaniem sieci neuronowych, opierający się na procesie uczenia się sieci oraz na algorytmie wstecznej propagacji błędów. Ze względu jednak na zaawansowaną metodę obliczeń oraz problemy związane z aproksymacyjnym działaniem modelu (m.in. zawyżanie prognozowanych wartości) również odrzuciliśmy tę propozycję.

Ostatecznie, nasz wybór padł na zastosowanie metody interpolacji Kriginga, która pozwoliła również na uwzględnienie wartości wiatru. Metoda jest często używana w obszarze interpolacji dla takich zjawisk atmosferycznych jak np. wiatr czy temperatura. Przy zastosowaniu modelu Kriginga odpowiednie obszary na wykresie, którego tłem jest mapa obszaru „Doliny Wisły”, zostają zamalowywane zgodnie z wartościami wyliczonymi pomiędzy konkretnymi punktami pomiarowymi. Taki sposób przedstawienia danych jest znacznie wygodniejszy w odczycie jak również bardziej intuicyjny dla zwykłego użytkownika.

3. Studium literaturowe

- **„System prognozowania rozprzestrzeniania zanieczyszczeń powietrza FAPPS – założenia, możliwości, rozwój.” [W:] „Ochrona powietrza w teorii i praktyce. T. 2” (red. Koniecznyński J.), Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska PAN, Zabrze, Hajto M. J., Godłowska J., Kaszowski W., Tomaszewska A.M.; 2012**

System prognozowania rozprzestrzeniania zanieczyszczeń powietrza FAPPS (Forecasting of Air Pollution Propagation System) informuje o aktualnej i przewidywalnej jakości powietrza oraz zagrożeniach dla zdrowia. Jako podstawowe produkty systemu uznaje się: mapy diagnostyczne i prognostyczne stężeń zanieczyszczeń powietrza generowane raz na dobę z rozdzielczością 1 km dla Krakowa oraz 5 km dla województwa małopolskiego, mapy warunków przewietrzania dla obszaru miasta Krakowa oraz najbliższych okolic, informacja o zagrożeniach zdrowotnych oraz moduł wspierający zarządzanie poważnymi awariami. FAPPS opiera się na 4 modelach:

- numeryczna prognozy pogody ALADIN – zapewnia warunki początkowe oraz brzegowe dla modelu MM5
 - niehydrostatyczny model mezoskalowy MM5 — prognozuje pola meteorologiczne
 - preprocesor meteorologiczny CALMET — oblicza głębokość mieszania, klasę stabilności, kinematyczne efekty terenu, termodynamiczne efekty występujące w terenie nachylonym oraz blokujące efekty występowania przeszkód terenowych
 - dyspersyjny model obłoku CALPUFF — oblicza prognozy stężeń zanieczyszczeń
- **„Wskazówki metodyczne dotyczące modelowania matematycznego w systemie zarządzania jakością powietrza”, Ministerstwo Środowiska, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa, 2003**

W dokumencie opisano wiele klas modeli matematycznych jak np.: model smugi gaussowskiej, pudełkowy model Lagrange’a, lagrange’owskie modele obłoków, model Monte Carlo oraz modele receptorowe. Oprócz tego wyszczególniono kolejne etapy modelowania: zdefiniowanie celów, obszar wyników i rozdzielczość siatki receptorowej, okres opracowywania danych, dane wejściowe, wybór modeli, weryfikacja wyników, ich korekcja i adiustacja.

- ***„Zastosowanie modeli sieci neuronowych w ocenie i prognozowaniu jakości powietrza”, Teresa Łozowicka Stupnicka, Monika Talarczyk***

Przedstawione rozwiązanie z użyciem modelu sieci neuronowych zakłada wyliczenie syntetycznego wskaźnika jakości powietrza na podstawie dopasowania elementów modelu w procesie uczenia się sieci, do którego użyto algorytmu wstecznej propagacji błędu oraz algorytmu Levenberga-Marquarda. Następnie przeprowadzane są testy i wybierana jest sieć o najmniejszych wartościach błędu RMS (Root Mean Squared) dla zbiorów uczącego, walidacyjnego i testowego.

- ***„Ocena przydatności wybranych modeli gaussowskich w obliczeniach stanu zanieczyszczenia powietrza, rozprawa doktorska”, Przemysław Szczygłowski; promotor: Marian Mazur; Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie. Wydział Geodezji Górniczej i Ochrony Środowiska. Zakład Kształtowania i Ochrony Środowiska.***

Opis użycia gaussowskiego modelu obłoku w układzie Lagrange’a przy zastosowaniu narzędzi CALMET oraz CALPUFF, uwzględniającego rzeźbę terenu oraz czasową i przestrzenną zmienność warunków meteorologicznych. Przy właściwym modelowaniu uwzględniono wpływ wiatru na przemieszczanie się zanieczyszczeń.

- ***„Applying Kriging Approach on Pollution Data using GIS Software”, Aman Tyagi, Preetvanti Singh***

Użycie metody interpolacji Kriginga jako sposobu na przedstawienie poziomu zanieczyszczenia na danym obszarze. Dokument pokazuje sposób na obliczenie zmiennej semiwariogramu oraz kolorowanie mapy po zastosowaniu Kriginga, w zależności od wartości wskaźnika zanieczyszczenia powietrza.

- ***„A Bayesian kriged Kalman model for short-term forecasting of air pollution levels”, Sujit K. Sahu, Kanti V. Mardia***

Autorzy na podstawie danych o zanieczyszczeniu powietrza zebranych w Nowym Jorku podjęli próbę krótkoterminowej prognozy pogody przy użyciu Bayesowskiego modelu zaimplementowanego przy użyciu metod Monte Carlo oraz głównych funkcji krigingu i flitru Kalmana. Ponownie wyliczana jest zmienna wariogramu, następnie tworzy się modele wariacji przestrzenne i poddaje się je krigingowi. Przy analizie danych wykorzystuje się walidację krzyżową.

- ***„A New High Frequency Kriging Approach for Nonstationary Environmental Processes”, Montserrat Fuentes***

Zaprezentowana została nowa metodologia dla interpolacji przestrzennej dla niestacystycznych procesów. Nie mogła zostać użyta tutaj standardowa metoda krigingu dla takich procesów, którą stosuje się do drugiego rodzaju procesów. Interpolacja przeprowadzana jest z wykorzystaniem krigingu dla wysokich częstotliwości. Nowy algorytm dopasowujący korzysta z podejścia spektralnego. Następnie metody rozszerzane są poprzez przybliżone podejście Bayesowskie, uwzględniające niepewność parametryczną.

- ***„Modelling study for assessment and forecasting variation of urban air pollution”, Gregorio Andria, Giuseppe Cavone, Anna M.L. Lanzolla***

W związku z dynamicznym rozwojem obszarów zurbanizowanych dane dotyczące zanieczyszczeń powietrza stają się niewystarczające. W rozprawie poruszono trzy podejścia do analizy danych środowiskowych: filtr Kalmana, Kriging oraz hybryda tych dwóch. Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów wywnioskowano, że połączenie obu algorytmów pozwala na dobrą estymację analizowanych substancji oraz ewentualną rekonstrukcję brakujących danych, przy zapewnieniu maksymalnej dokładności i ulepszonym działaniu modelu.

- ***„Modelowanie emisji i rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń ze środków transportu drogowego”, Łukasz Drąg***

Autor artykułu zwraca uwagę, że ocenę jakości powietrza w aglomeracjach przeprowadza się poprzez wykonywanie pomiarów, natomiast na pozostałych obszarach stosuje się modelowanie matematyczne lub inne metody szacowania. Pomimo mnogości rozwiązań powszechnie wykorzystywane są analityczne modele gaussowskie typu: model smugowy, smuga segmentowa i obłok, głównie ze względu na ich złożoność matematyczną oraz fakt, że można je podzielić na metody gdzie źródło jest punktowe lub liniowe.

- ***Mapa czujników Airly***

Przedstawiane w formie punktów o różnych kolorach, czujniki odwzorowują stan powietrza na podstawie danych zebranych przez każdy z nich. Następnie tworzona jest tzw. heatmapa, gdzie przedstawiona jest jakość powietrza w pobliżu, oszacowana z dużym prawdopodobieństwem, przy użyciu pomiaru interpolowanego.

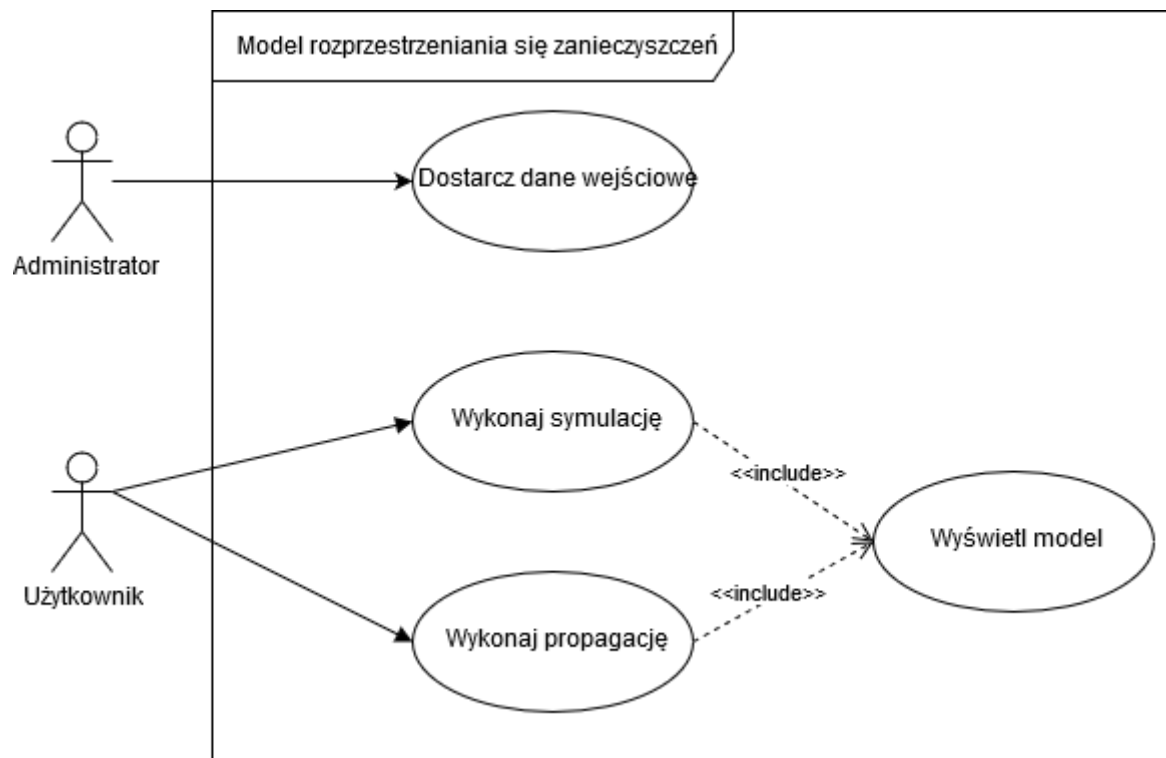
4. Cel modelu

Przeprowadzana symulacja ma pokazywać przepływ zanieczyszczeń w obszarze zwanym Doliną Wisły na podstawie zebranych danych wraz z kilkugodzinnymi prognozami w przód.

W naszym modelu wykorzystujemy dane zapewnione nam przez system czujników *Airly*. Wartości odczytywane przez sensory w czasie rzeczywistym są poddawane działaniu algorytmów, które ostatecznie przekształcają pomiary w indeks CAQI, będący jedną liczbą, wykorzystywaną w naszej symulacji. Do parametrów uwzględnianych w końcowym wyniku należą wartości: pyłów zawieszonych PM1, PM2.5, PM10, ciśnienie oraz wilgotność. Oprócz tego wykorzystujemy również dane z serwisu *weatherbit.io* tj. temperaturę, ilość opadów, a także prędkość oraz kierunek wiatru.

Produktem końcowym modelu jest animacja mapy obszaru Doliny Wisły z zaznaczonymi punktami, gdzie umieszczone są czujniki, będące naszymi punktami pomiarowymi oraz naniesionych na nią „pokolorowanych” map, utworzonych dzięki zastosowaniu metody Kriginga. Każdy kolor opisuje inny stan powietrza w danym miejscu na mapie.

Z perspektywy literaturowej sam algorytm Kriginga jest niewystarczający. Zastosowanie filtra Kalmana czy jakiegokolwiek modelu smugi gaussowskiej prawdopodobnie dałby zdecydowanie dokładniejszy wynik. To samo jeśli chodzi o zastosowanie preprocesora CALMET oraz modelu obłoku CALPUFF, jednak na potrzeby naszej symulacji zastosowane przez nas rozwiązanie okazało się być wystarczające.



Rys. 1 Diagram przypadków użycia dla modelu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń

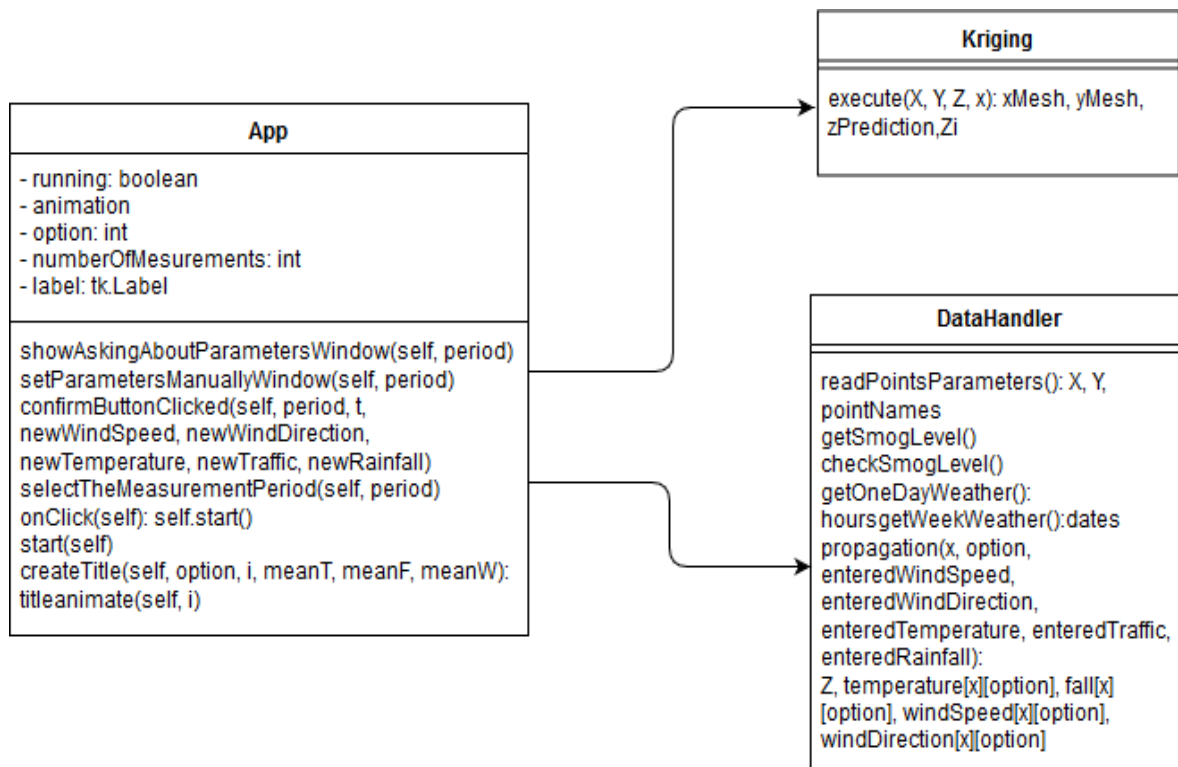
5. Symulacja

5.1 Technologia

Do realizacji zadania wykorzystaliśmy język Python wraz z bibliotekami matematycznymi przez niego dostarczanymi. Jego przejrzystość oraz prosta składnia znacznie ułatwiają czytelność kodu, natomiast gotowe biblioteki ułatwiają obliczenia matematyczne oraz wyrysowywanie wykresów. Użyliśmy bibliotek:

- **matplotlib** do rysowania wykresów oraz tworzenia animacji,
- **numpy** do funkcji matematycznych oraz zebrania danych w tablicach,
- **pandas** do odczytywania danych z pliku,
- **math** do działań matematycznych,
- **tkinter** do tworzenia interfejsu graficznego
- **mplcursors** do interaktywnego kursora
- **requests** do integracji z sieciowymi bazami danych (API)

5.2 Diagram klas



Rys. 2 Diagram klas dla modelu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń

5.3 Implementacja

Z pliku pobierane są dane (współrzędne oraz nazwy) kilkunastu czujników umieszczonych w obszarze zwanym Doliną Wisły. Z API *airly.eu* pozyskujemy bieżące wartości smogu, natomiast z API *weatherbit.io* – prognozowane warunki atmosferyczne.

Użytkownik ma do wyboru 2 okresy symulacji: dzienny – 8 propagacji co 3 godziny oraz tygodniowy – 8 propagacji co dzień. Następnie decyduje on o wartościach czynników (wiatr, temperatura, opady, ruch uliczny) – istnieje możliwość wpisania własnych wartości bądź pozostania przy pobranych prognozach.

Drugim etapem programu jest predykcja rozprzestrzeniania się smogu na obszarze „Doliny Wisły”, polegająca na zastosowaniu algorytmu uwzględniającego wpływ warunków atmosferycznych oraz natężenia ruchu. Wartości smogu obliczane są w zależności od czynników i dobranych do nich przeliczników, np. zgodnie z siłą oraz kierunkiem wiatru, smog przemieszcza się w odpowiednią stronę z większą lub mniejszą prędkością.

Następnie program wylicza wartości interpolowane między punktami pomiarowymi, korzystając z zaimplementowanego algorytmu Kriginga.

Algorytm Kriginga:

1. Znalezienie poprawnej pary punktów danych wejściowych – węzła oraz próbki.
2. Sprawdzenie odległości pomiędzy parą punktów.
3. Wyliczenie tablicy *distances* dla wartości wariogramu pomiędzy parą punktów.
4. Utworzenie macierzy *covariance* z wartościami wariogramu dla wszystkich analizowanych par punktów.
5. Uzyskanie wag poprzez rozwiązanie układu $covariances * weights = distances$.
6. Obliczenie estymowanej oraz przewidywanej wartości dla piksela poprzez zsumowanie wartości pomnożonych wag i wartości z wejścia.
7. Otrzymanie szukanej wartości dla węzła poprzez odjęcie od sumy średniej z wartości (błąd wariancji).
8. Powtórzenie czynności dla wszystkich węzłów.

Wyniki są przedstawiane w formie wykresów, które są na bieżąco aktualizowane, tworząc animację.

5.4 Załączniki

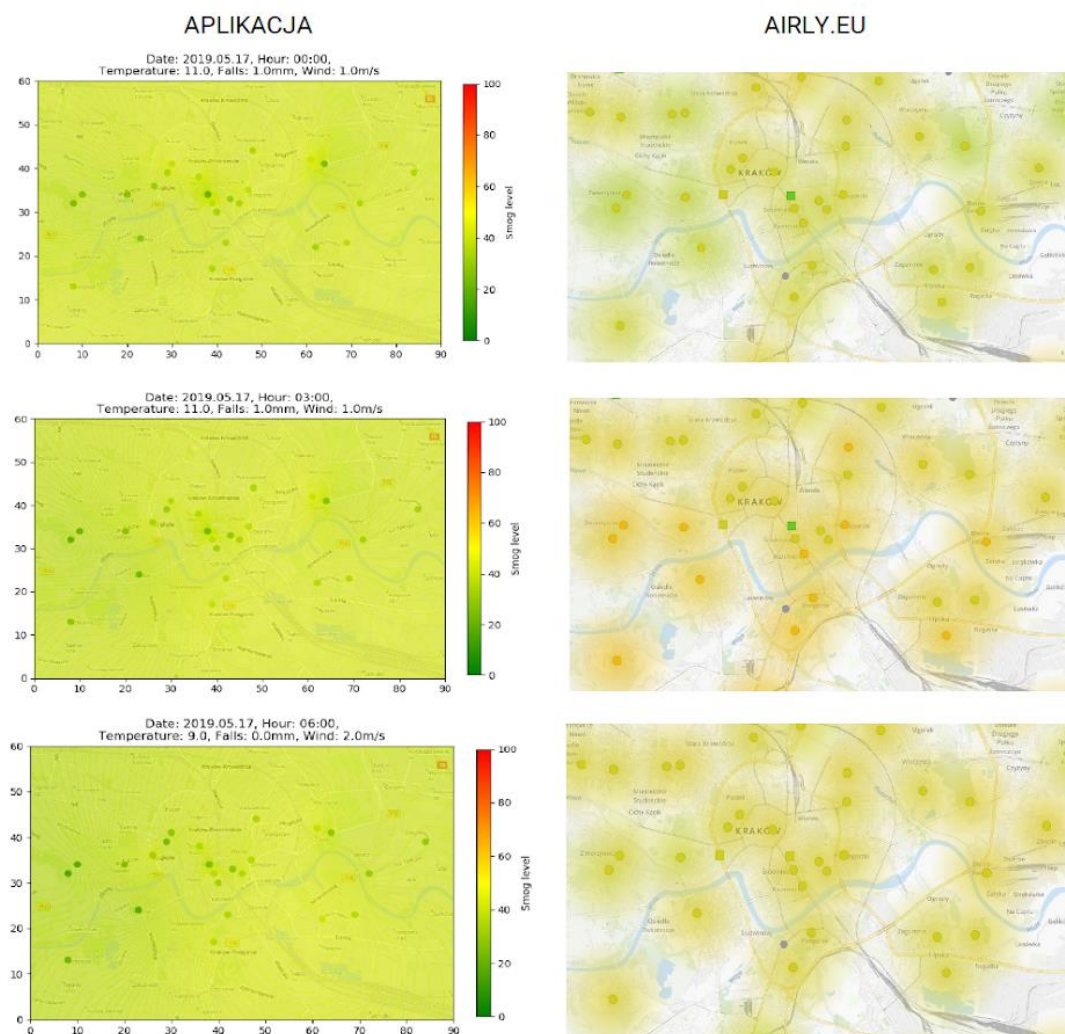
- Wersja wykonywalna programu
- Kody źródłowe z komentarzami
- Plik z wymaganiami modułowymi
- Film z przebiegu symulacji

6. Wyniki symulacji

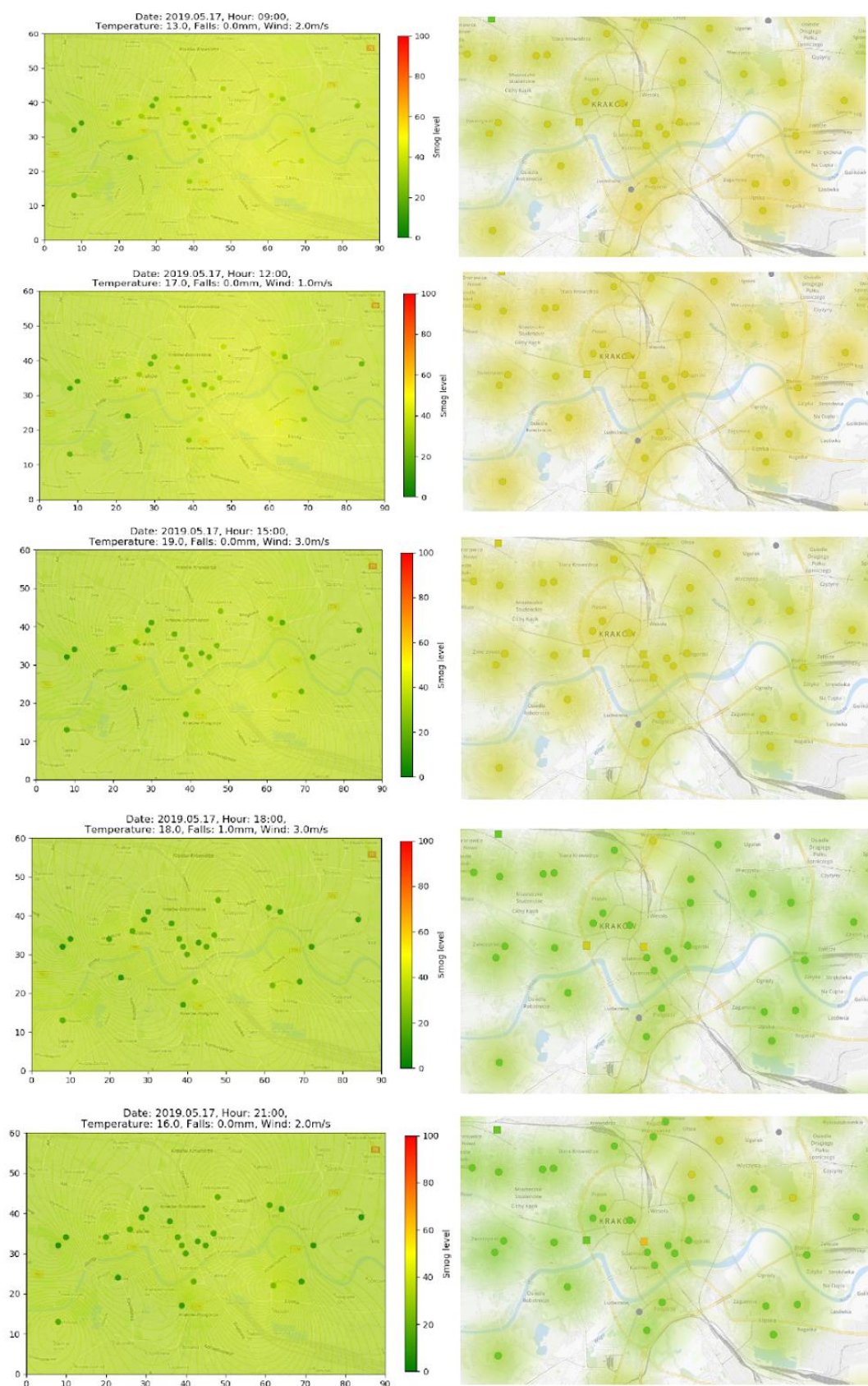
Walidacja uzyskanych wyników opierała się na porównaniu wartości smogu uzyskanych przez naszą symulację z wynikami znajdującymi się na portalu <http://airly.eu>. Propagacja na tym portalu odzwierciedla jednak predykcję tylko w pobliżu danych punktów pomiarowych, a nie obejmuje całego obszaru „Doliny Wisły” jak jest to w naszym przypadku.

Zaprezentowane ilustracje pokazują symulację z poprzedniej wersji programu (bazującego na “sztywnych” danych), jednak ze względu na niezmieniony algorytm i przeliczniki, dobrze obrazują one trafność wyboru narzędzi do propagacji smogu.

Symulację przeprowadziliśmy dla dnia 17 maja 2019 roku, od godziny 00:00, z odstępem czasowym co 3 godziny, z następującymi danymi atmosferycznymi: temperatura: 11.0 C, opady: 1.0 mm, wiatr: 1.0 m/s. Uzyskałyśmy następujące wyniki:

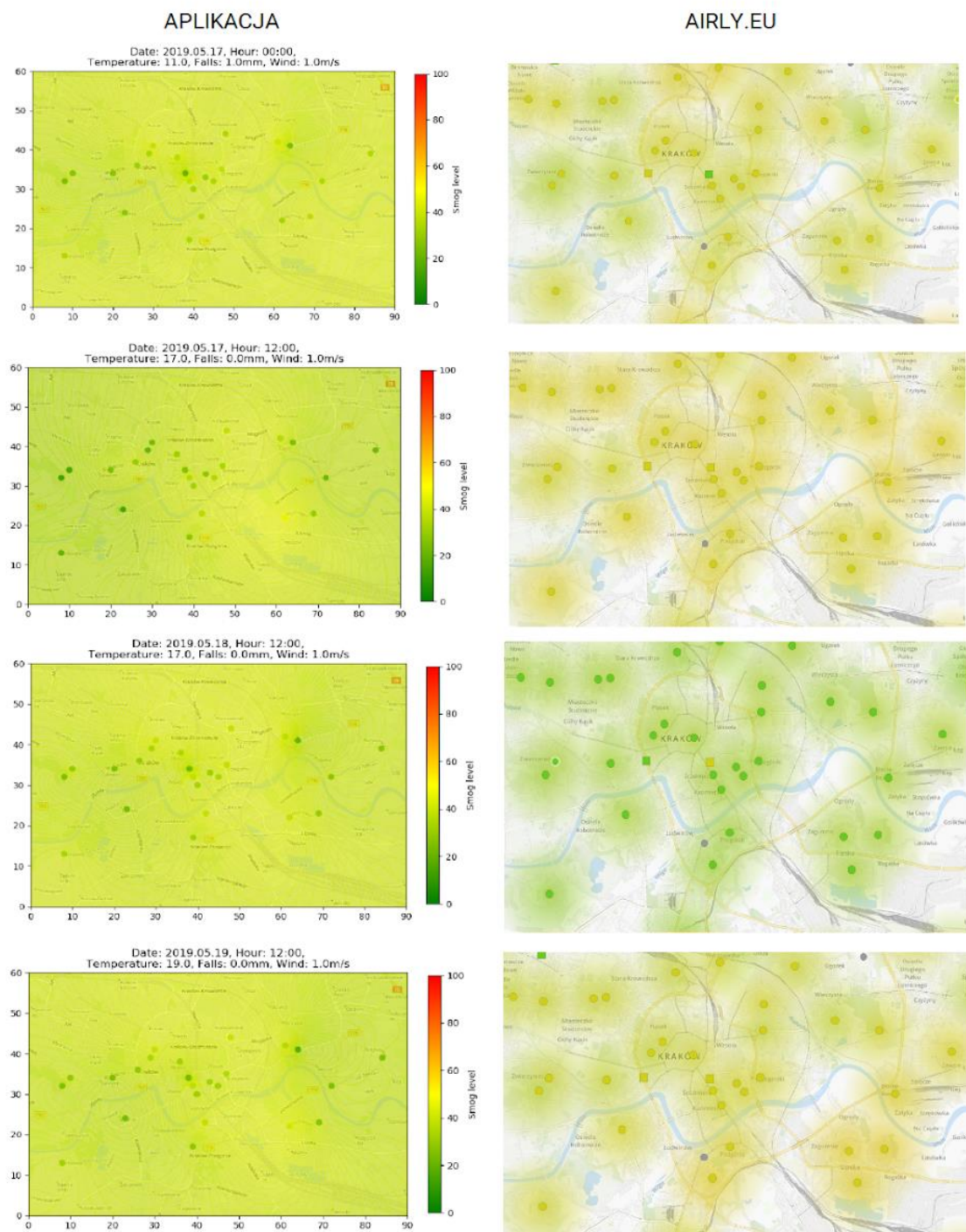


Rys. 3. Wyniki symulacji przy zmieniającym się wietrze dla dnia 17.05.2019 oraz porównanie ich z wartościami z portalu <http://airly.eu> dla godzin 00:00 – 06:00



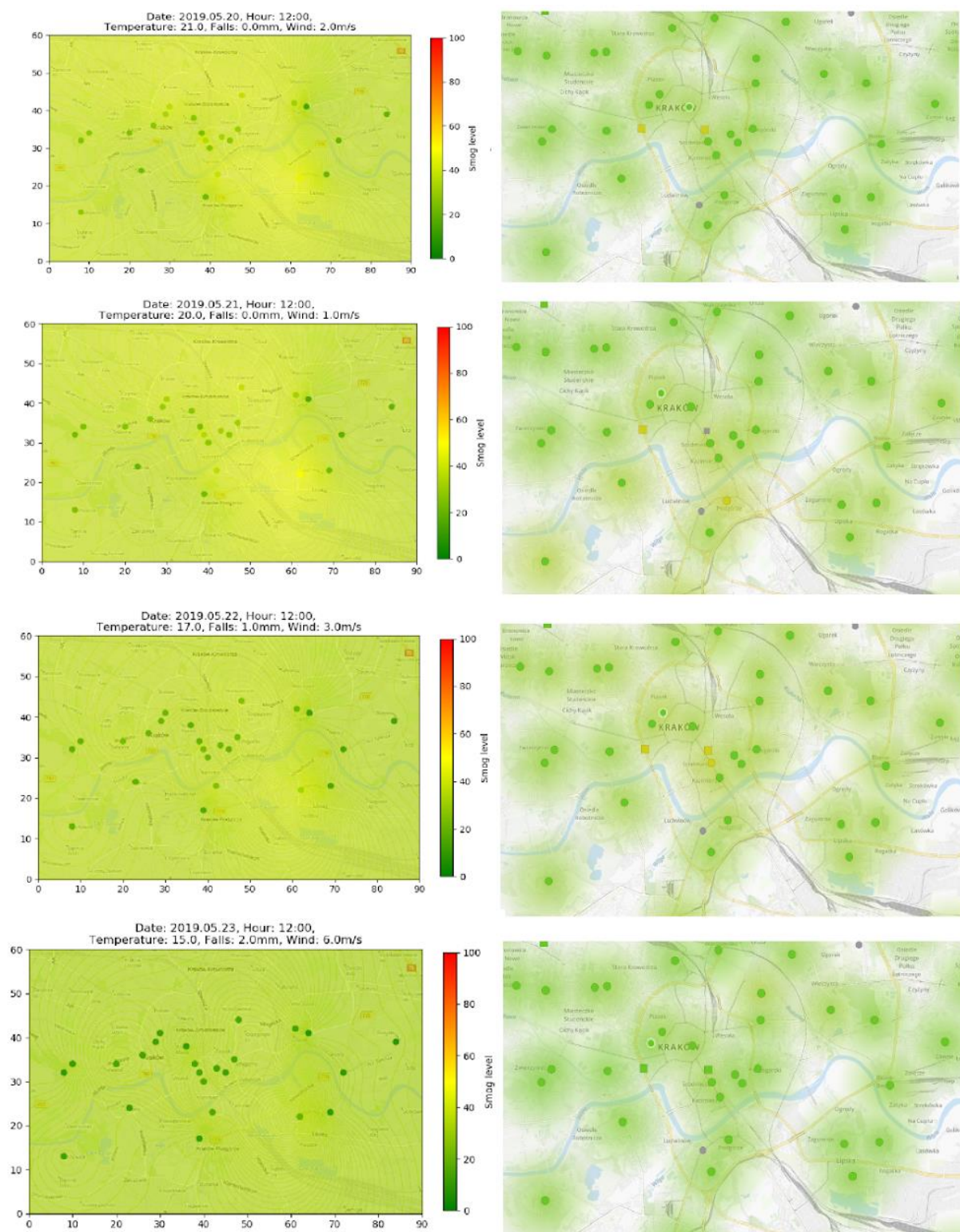
Rys. 4. Wyniki symulacji przy zmieniającym się wietrze dla dnia 17.05.2019 oraz porównanie ich z wartościami z portalu <http://airly.eu> dla godzin 09:00 – 21:00

Dodatkowo przeprowadziliśmy też symulację całotygodniową dla okresu 17 – 23.05.2019 roku, w odstępie czasowym 24 godzin, z następującymi danymi atmosferycznymi na wejściu: temperatura: 11.0 C, opady: 0.1 mm, wiatr: 1.0 m/s.



Rys. 5. Wyniki symulacji dla dni 17 - 19.05.2019 oraz porównanie ich z wartościami z portalu

<http://airly.eu>



Rys. 6. Wyniki symulacji dla dni 20 - 23.05.2019 oraz porównanie ich z wartościami z portalu <http://airly.eu>

7. Wnioski

Nasza symulacja pomimo zastosowania wyłącznie algorytmu Kriginga dostarcza wystarczająco dokładne wyniki symulacji. Z wyników symulacji wywnioskowaliśmy, że na ilość smogu w danym obszarze znacząco wpływa wiatr. Pod jego wpływem zanieczyszczenia przemieszczają się, czasami powodując wzrost ich ilości, ale w większości przypadków wręcz przeciwnie - przy odpowiednio dużych wartościach powoduje zanik smogu. Podobne oddziaływanie mają opady atmosferyczne.

W porównaniu do wartości z innych symulacji czy programów propagujących zanieczyszczenia nasza aplikacja podaje zbliżone wyniki. Pod względem wizualnym aplikacja również wygląda interesująco oraz ułatwia użytkownikowi zrozumienie dostarczonych mu danych. Oba te elementy uznajemy jako sukces, gdyż cały projekt od początku do końca opierałyśmy na własnych doświadczeniach oraz umiejętnościach.

Jeśli chodzi o możliwość rozwoju naszej aplikacji, to z pewnością dobrym pomysłem byłoby dołożenie kolejnych czynników np. wilgotności czy ciśnienia atmosferycznego, które wpływałyby na propagację zanieczyszczeń. Oprócz tego możnaby było opracować dokładniejszą skalę ilości zanieczyszczeń, głównie ze względów wizualnych, aby ułatwić użytkownikom rozróżnianie poszczególnych wartości. Ciekawym rozwiązaniem byłoby również rozszerzenie obszaru, początkowo o kolejne dzielnice Krakowa, potem na całe miasto, a następnie na gminę. Dodatkowo w przyszłych rozwiązaniach można by było rozważyć dodanie opcji zmian pór roku, aby symulować można było komplet warunków atmosferycznych.