



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA

MODELOWANIE I SYMULACJA SYSTEMÓW

SMOG

SYMULACJA ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ PYŁU
ZAWIESZONEGO PM10 I PM2.5 W CENTRUM KRAKOWA

Ewa Hechsman
Agata Sidło
Katarzyna Wilczak

2018/2019

Spis treści

1	Wprowadzenie do tematu	2
1.1	Opis problemu	2
1.2	Analiza wstępna	2
2	Przegląd literatury i innych źródeł	2
3	Proponowany model zjawiska	6
3.1	Cele modelu	6
3.2	Wejścia i wyjścia modelu	6
3.3	Założenia algorytmów i porównanie z podejściem literaturowym	7
3.4	Diagram przypadków użycia	7
4	Symulacja zjawiska - implementacja	8
4.1	Wybór technologii	8
4.2	Diagram klas	9
4.3	Diagramy sekwencji	10
4.4	Opis implementacji	11
4.5	Załączniki	12
5	Wyniki symulacji	12
5.1	Statystyki, uzyskane wyniki ilościowe i jakościowe	12
5.2	Zastosowane procedury walidacji	12
5.3	Porównanie wyników z danymi rzeczywistymi	16
6	Wnioski	18

1 Wprowadzenie do tematu

1.1 Opis problemu

Głównym celem projektu “SMOG” jest stworzenie uproszczonego modelu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w centrum Krakowa. Obejmuje przeprowadzenie pomiarów zanieczyszczeń - pyłów zawieszonych PM_{10} oraz $PM_{2.5}$, a także czynników, takich jak: wiatr, temperatura, ciśnienie, opady, wilgotność, mających wpływ na przemieszczanie się smogu, oraz na ich podstawie dokonanie krótkiej propagacji zanieczyszczenia.

1.2 Analiza wstępna

Istnieje wiele potencjalnych możliwości rozwiązania problemu. Przytoczona w punkcie 2 literatura sugeruje obszerny opis matematyczny zjawiska rozprzestrzeniania się pyłu zawieszonego. Opis matematyczny dostarcza wiele wzorów, które uwzględniają odpowiednie warunki atmosferyczne, jak i rodzaj pyłu oraz główne źródła zanieczyszczeń. Nie oferuje jednak dobrych rozwiązań symulacyjnych, ponieważ dane można przedstawić głównie za pomocą wykresów, co nie pozwala na pokazanie obszaru centrum Krakowa.

Rozważaliśmy multi-agentowe podejście do problemu. Model przedstawiałby wybrane cząstki zanieczyszczenia jako agentów i umieszczał je na mapie. Jest to jednak mało wizualnie atrakcyjna i nieintuicyjna metoda, ponieważ człowiek nie jest w stanie w normalnych warunkach zobaczyć pojedynczych cząstek pyłu. Widzimy raczej “chmury pyłu”, obszary zanieczyszczone.

Znaleziona w literaturze interpolacja Kriginga oraz interpolacja RIO są dosyć szczegółowym przedstawieniem danych, które również pozwalają na uwzględnienie odpowiednich warunków atmosferycznych. Nie rozróżniają pojedynczych cząstek pyłu, ale wyliczają wartości pomiędzy punktami pomiarowymi i na ich podstawie “kolorują” odpowiednie obszary na wykresie, co bardziej odpowiada intuicyjnemu przedstawieniu zanieczyszczenia. Interpolacja RIO jest bardziej zaawansowaną techniką interpolacyjną. Ogólny model Kriginga jest wykorzystywany często przy interpolacji danych m.in. przy symulacji wiatrów, temperatur i innych czynników meteorologicznych.

2 Przegląd literatury i innych źródeł

- *‘Integrated agent-based transport simulation and air pollution modelling in urban areas-the example of Munich’ Friederike Hülsmann*

Symulacja stanu powietrza na przykładzie miasta Monachium. Autor pracy oprócz zanieczyszczeń, bierze pod uwagę również ruch uliczny i integruje symulację zanieczyszczenia z symulacją ruchu ulicznego. Modeluje zanieczyszczenia jako system multi-agentowy używając metody MATSim, która zawiera 4 podstawowe kroki: generacja planów (jeden plan każdego dnia dla każdego czynnika), symulacja ruchu

ulicznego (integracja planów z pkt. 1 z fizycznym system ruchu), przeliczanie (dane wejściowe z pkt. 2 są przeliczane przez funkcję - inną dla każdego czynnika), nauka (agenci interpretują obecne plany i w następnej iteracji nanoszą zmiany w czasie, trasie i modelu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń). Uzyskane dane z symulacji przedstawia na odpowiednich wykresach.

<https://mediatum.ub.tum.de/doc/1210046/1210046.pdf>

- **'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 FAPPS(Forecasting of Air Pollution Propagation System) - przewidywanie stężenia zanieczyszczeń w województwie Małopolskim i Krakowie. Stosuje 5 stopniową skalę stanu zanieczyszczenia powietrza (niski, średni, wysoki, bardzo wysoki, ryzykowny). Rozprzestrzenianie PM10 jest tutaj przedstawione w ujęciu makroskopowym jako obszary na mapie województwa. System FAPPS działa na bazie zespołu następujących modeli:

- numeryczna prognoza pogody ALADIN - zapewnia warunki początkowe i brzegowe dla modelu MM5,
- niehydrostatyczny, mezoskalowy model meteorologiczny 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.

<http://smog.imgw.pl/home>

- **Mapa czujników Airly**

Rozmieszczone na mapie czujniki smogu i warunków atmosferycznych pokazują stan pyłu zawieszonego w danym momencie i w danym punkcie pomiarowym. Do opisu stanu smogu na mapie wykorzystują trzy kolory - zielony (bardzo dobry stan powietrza), pomarańczowy (średni), czerwony (zły). Istnieje możliwość oglądania pomiarów czujników do 24h wstecz oraz prognozy na następne godziny.

- **'Wykorzystanie modeli statystycznych do oceny i prognozowania stężeń zanieczyszczeń powietrza na przykładzie Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego' Mgr inż. Jarosław Siewior (rozprawa doktorska)**

Praca opisuje kilka deterministycznych modeli matematycznych propagacji zanieczyszczeń powietrza (m.in. Gaussa, Lagrange'a, Eulera) oraz modele stochastyczne oparte na pomiarach. Do modelowania problemu wykorzystuje jednak model ARX

tn. taki, który uwzględnia autokorelację stężeń zanieczyszczeń oraz zmienne egzogenne (typu X), czyli warunki meteorologiczne. Jest to opis w większości matematyczny, poparty wzorami i wyprowadzeniami. Dane końcowe przedstawione są na wykresie.

<http://docplayer.pl/23939538-Akademia-gorniczo-hutnicza-im-stanislawa-staszica-wydzial-gornictwa-i-geoinzynierii-katedra-inzynierii-srodowiska-i-przerobki-surowcow.html>

- ***'Computer Treatment of Large Air Pollution Models' Zahari Zlatev***

Według autora, najpierw należy zlokalizować źródła emisji zanieczyszczeń, m.in.: transport uliczny, elektrownie, przemysłowe oraz domowe spalanie, procesy przemysłowe i określić wielkość ich wpływu na stan jakości powietrza. Największy wpływ na transport cząsteczek w powietrzu ma wiatr. Kiedy zanieczyszczenia znajdują się już w atmosferze, dochodzi do zjawiska dyfuzji, podczas której następują różne reakcje chemiczne. Warunkują one powstawanie nowych pyłów lub tworzenie nowych, lecz nieszkodliwych składników. Wraz z opadem, zanieczyszczenia mogą ulec depozycji (usunięciu). Po wstępnej analizie problemu, należy zamodelować transport szkodliwych cząsteczek. Zahari Zlatev opisuje matematyczny sposób poszczególnego modelowania emisji, transportu, dyfuzji, procesu depozycji oraz reakcji chemicznych zanieczyszczeń. Możliwe jest również otrzymanie generalnego matematycznego modelu tworząc kombinację matematycznych wyrażeń użytych do opisu wcześniej wspomnianych procesów. W książce znajdziemy również porównanie modeli Lagrange'a i Eulera, a także numeryczne podejście do modelowania zanieczyszczeń powietrza.

- **Air Pollution Information System UK**

Na stronie opisane zostały modele dyspersji powietrza, które służą do oszacowania stężenia zanieczyszczeń powietrza emitowanych z procesów przemysłowych - źródło punktowe lub drogi - źródło linii. Modele są wykorzystywane do modelowania lokalnego (<20 km), dalekiego zasięgu, regionalnego oraz zanieczyszczeń powietrza (>50 km). Opisano modele krótkiego zasięgu - ADMS, AERMOD, SCAIL, DMRB oraz długiego zasięgu - FRAME.

<http://www.apis.ac.uk/air-pollution-modelling>

- ***'Wskazówki metodyczne dotyczące modelowania matematycznego w systemie zarządzania jakością powietrza' Ministerstwo Środowiska, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa, 2003***

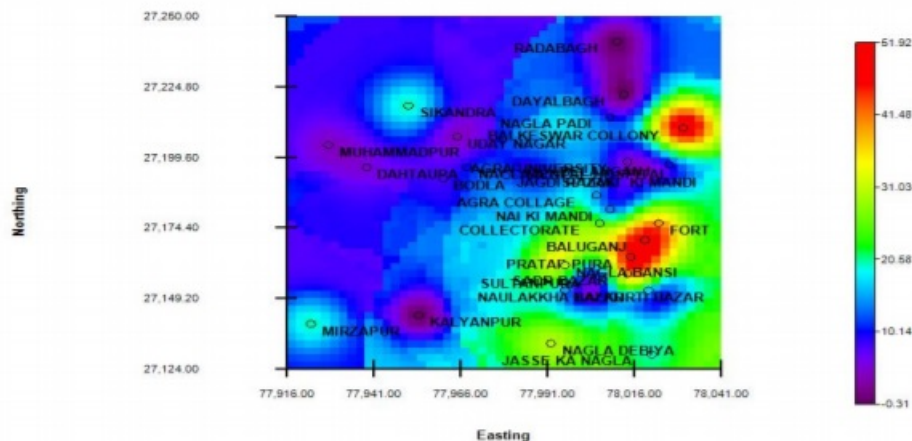
Opisane zostały różne klasy modeli: emisji, meteorologiczny, transportu zanieczyszczeń, gaussowskie modele smugi, gaussowskie i lagranżowskie modele obłoków, lagranżowskie modele ruchu pseudocząstek (Monte Carlo), siatkowe modele eulerowskie, modele receptorowe. Podczas modelowania wyróżniono etapy: zdefiniowanie celów modelowania, obszar wyników i rozdzielczość siatki receptorowej, okres opracowania danych, dane wejściowe (emisje, ich agregacja, dane meteorologiczne, geofizyczne, geograficzne), wybór modeli, weryfikacja, korekcja i adiustacja wyników.

https://www.mos.gov.pl/g2/big/2009_05/d9f172f280b8d79bc85879350fabebfe.pdf

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

Dokument dokładnie opisuje zastosowanie interpolacji Kriginga do modelowania danych związanych z zanieczyszczeniami powietrza. Pomiary przeprowadzono w Indiach. Model opisuje algorytm interpolacji, metodę wyznaczania semi-variogramu oraz prezentuje przykłady zastosowania do modelowania konkretnych danych pomiarowych.

https://www.ripublication.com/ijeem_spl/ijeemv4n3_05.pdf



Rysunek 1: Wynik zastosowania algorytmu Kriginga (Ordinary Kriging) na danych dla Dayalbagh

- **'RIO: A NOVEL APPROACH FOR AIR POLLUTION MAPPING' Stijn Janssen, , Frans Fierens, , Gerwin Dumont, Clemens Mensink**

Publikacja opisuje model interpolacji RIO, który stanowi wydajne narzędzie do oceny jakości powietrza. Może również zostać wykorzystany do tworzenia analitycznych map rekordów danych historycznych. Model RIO jest rodzajem modelu Kriging, jednak jest on dokładniejszy i uwzględnia lokalne zanieczyszczenia powietrza. W publikacji znajdziemy również przykładowe schematy i mapy jakości powietrza.

https://www.researchgate.net/publication/252915197_RIO_A_NOVEL_APPROACH_FOR_AIR_POLLUTION_MAPPING

- *'Próba zastosowania metody krigingu do wykonania map izolinii stężenia pyłu zawieszonego PM10 dla rejonu aglomeracji warszawskiej' Andrzej Brandyk, Grzegorz Majewski, Laura Poretta, Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW, Zakład Hydrologii i Zasobów Wodnych, Zakład Meteorologii i Klimatologii*

Praca opisuje proces zastosowania metody krigingu do wyliczenia stężenia pyłu zawieszonego PM10, a następnie zaprezentowaniu wyników na mapie izolinii. Zostają poruszone kwestie m.in.: ilości punktów pomiarowych, a wiarygodności uzyskanych wyników, warunki meteorologiczne, tworzenie wariogramu.

<http://iks.pn.sggw.pl/z36/art10.pdf>

3 Proponowany model zjawiska

3.1 Cele modelu

Model ma za zadanie pokazać przepływ zanieczyszczeń na mapie centrum Krakowa w punktach pomiarowych, jak i pomiędzy nimi. Pokazuje również wpływ czynników atmosferycznych na przemieszczanie się pyłów.

Głównymi źródłami pyłu zawieszonego w centrum Krakowa jest zwiększony ruch uliczny przy alei Słowackiego i Mickiewicza. Nasz model ma na celu ukazanie stanu jakości powietrza w okolicach Rynku Głównego w Krakowie, oraz w otoczeniu zatłoczonych ulic.

3.2 Wejścia i wyjścia modelu

Symulacja interpolacji zanieczyszczenia

Wejściem systemu są dane pomiarowe z czujników zanieczyszczeń powietrza Airly oraz dane meteorologiczne (temperatura, prędkość i kierunek wiatru, opady) z serwisu Windy.com. Dane zapisywałyśmy codziennie co 12 godzin oraz w jeden dzień bardziej szczegółowo - co godzinę.

Na wyjściu otrzymamy mapę centrum Krakowa z naniesioną mapą interpolacyjną wykonaną metodą Kriginga oraz punktami pomiarowymi (rozmieszczonymi w miejscach czujników Airly). Mapa będzie dostępna dla dwóch rodzajów zanieczyszczeń: pyłu zawieszonego PM10 oraz PM2.5. Mapa będzie odświeżać się co sekundę pokazując kolejne pomiary dla kolejnych godzin, co utworzy krótką animację. Powyżej mapy będą wypisywane dane meteorologiczne dla danego czasu pomiaru. Kolory będą opisywać stan powietrza w danym miejscu.

Propagacja zanieczyszczenia

Wejściem systemu są dane meteorologiczne (prędkość i kierunek wiatru, temperatura, opady) wpisywane ręcznie przez użytkownika oraz średnie przypuszczalne stężenie pyłu PM10 w punktach pomiarowych.

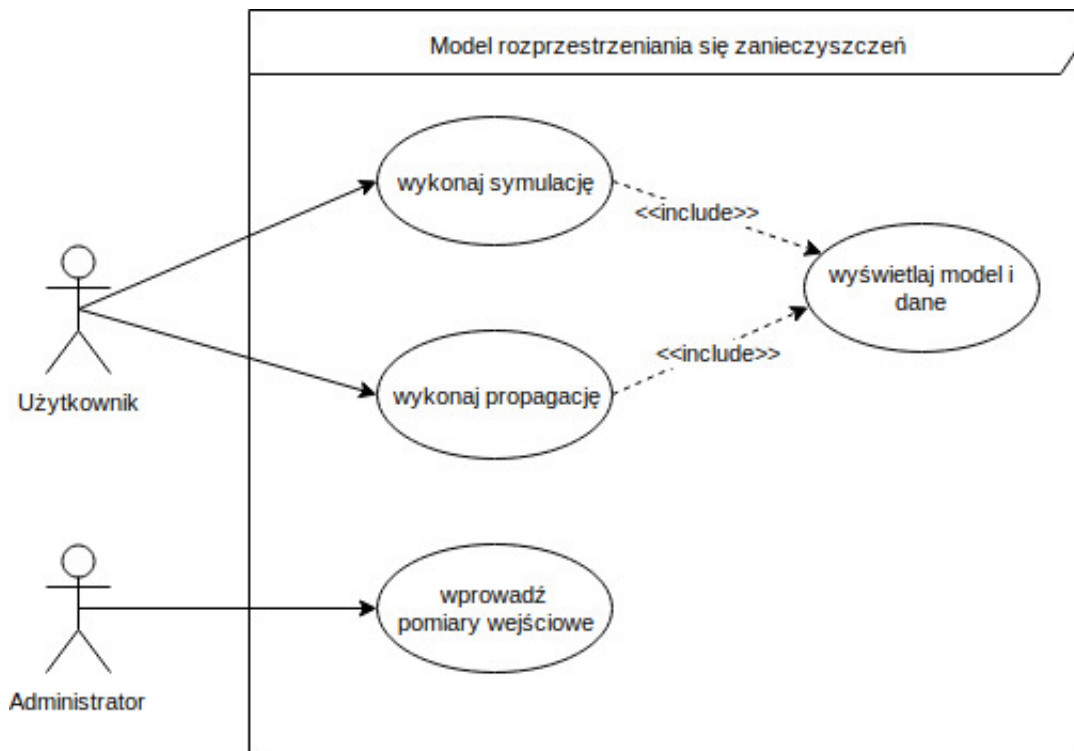
Wyjściem, jak w przypadku symulacji, jest animacja mapy centrum Krakowa z naniesioną mapą interpolacyjną oraz punktami pomiarowymi dla pyłu zawieszonego PM10. Pokazuje kolejne przypuszczalne stężenia pyłu w kolejnych 5 godzinach (5 klatek animacji) przy warunkach atmosferycznych podanych na wejściu.

3.3 Założenia algorytmów i porównanie z podejściem literaturowym

Zastosowany przy interpolacji wartości między punktami pomiarowymi algorytm interpolacji Kriginga pobiera dane wejściowe, które są odpowiednio stężeniami pyłów w punktach pomiarowych i wylicza wartości interpolowane pomiędzy tymi punktami. Jest to podejście podobne do stosowanych w wymienionej w poprzednich rozdziałach literaturze. Niektóre pozycje stosują ulepszoną wersję tego algorytmu - *algorytm RIO*.

Algorytm zastosowany przy propagacji zanieczyszczeń jest nieco rozbieżny z podejściem z literatury. Wykorzystuje on obserwacje dokonane na podstawie symulacji i interpolacji danych pomiarowych z użyciem algorytmu Kriginga, ale przy weryfikacji danych wyjściowych wynik okazał się być podobny do wcześniejszej symulacji.

3.4 Diagram przypadków użycia



Rysunek 2: Diagram przypadków użycia modelu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń

4 Symulacja zjawiska - implementacja

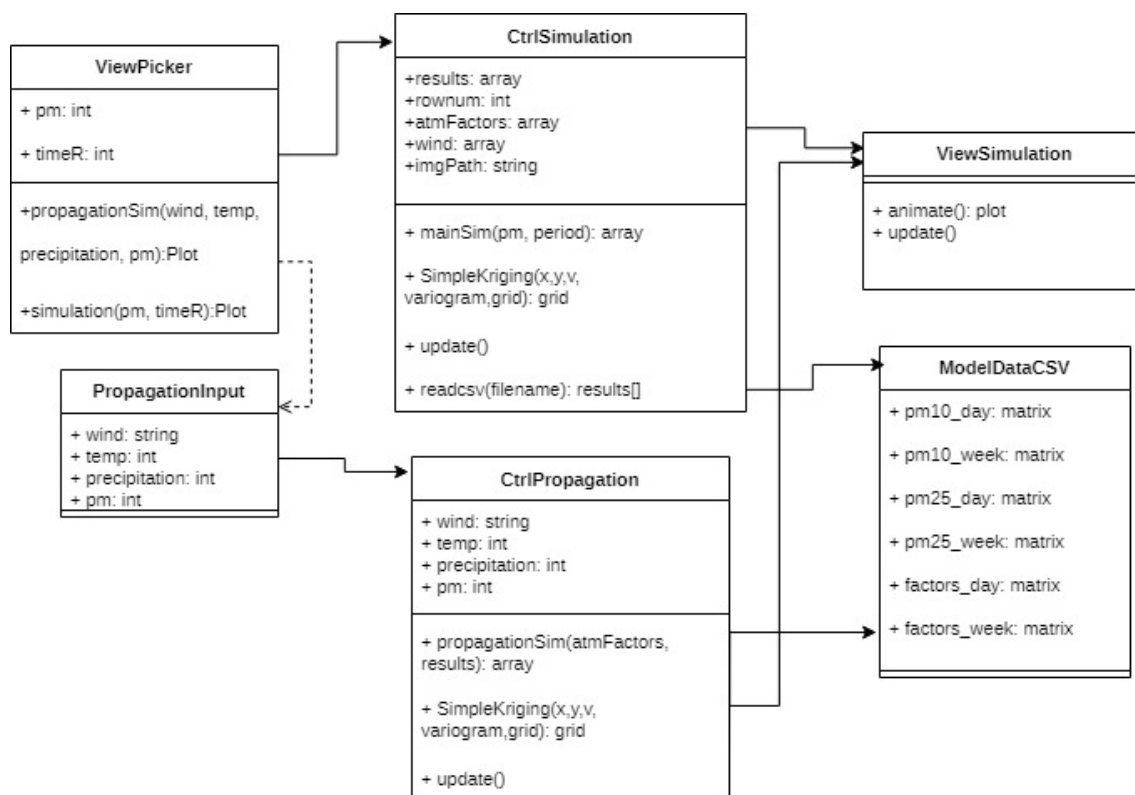
4.1 Wybór technologii

Do realizacji naszej wizji symulacji rozprzestrzeniania się smogu wybrałyśmy język Python. Python dostarcza dużą ilość bibliotek matematycznych pomocnych przy implementacji interpolacji Kriginga, rysowaniu wykresów i umiejscowieniu punktów pomiarowych na siatce. Jest też prosty składniowo, co zapewnia dużą czytelność kodu.

Zdecydowałyśmy się na użycie następujących bibliotek:

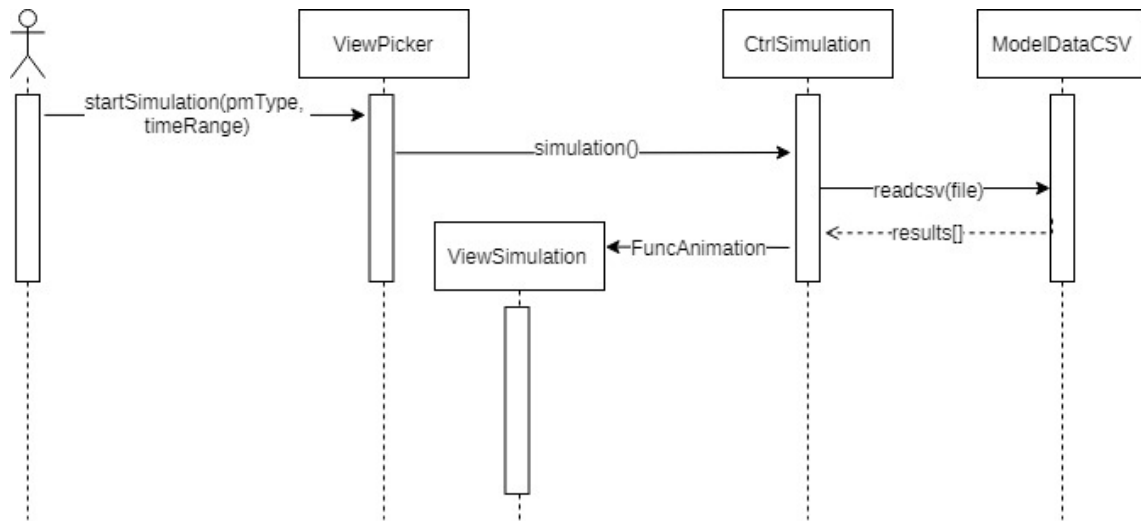
- **matplotlib** - biblioteka umożliwiająca tworzenie wykresów w okienku w formie animacji
- **numpy** - dostarcza m. in. funkcje matematyczne (np. funkcje trygonometryczne, pierwiatek, sumowanie elementów tablicy czy obliczanie eksponenty) oraz typ tablicowy
- **scipy.linalg** - umożliwia obliczanie równania liniowego potrzebne do implementacji Simple Kriginga
- **FuncAnimation** z pakietu **matplotlib.animation** - umożliwia tworzenie animacji w prosty sposób
- **csv** - umożliwia wczytywanie pliku zawierającego dane wejściowe
- **Tkinter** - służy do tworzenia interfejsu graficznego

4.2 Diagram klas

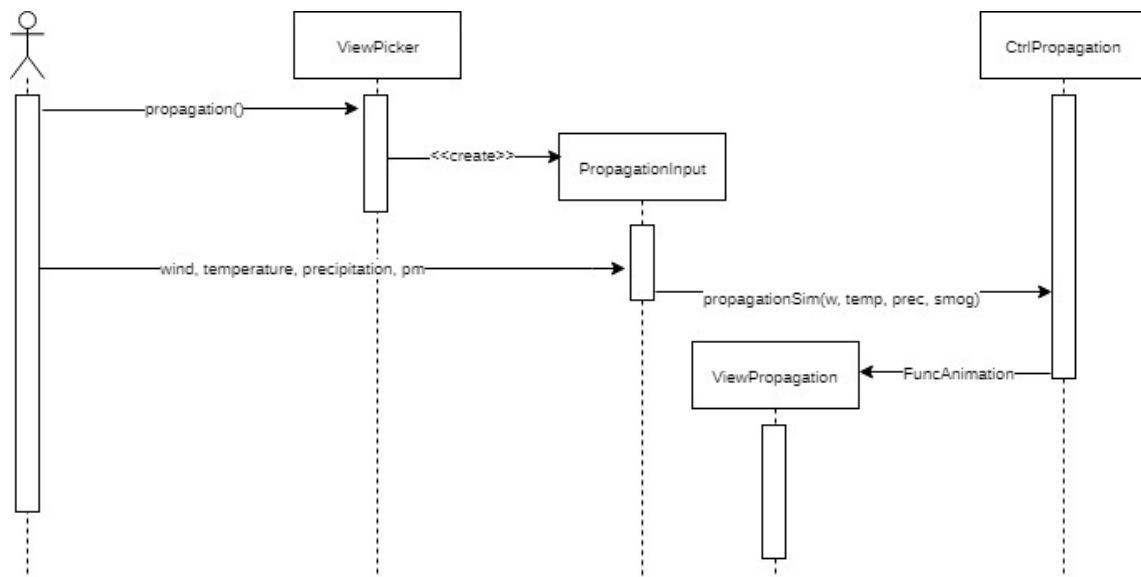


Rysunek 3: Diagram klas modelu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń

4.3 Diagramy sekwencji



Rysunek 4: Diagram sekwencji dla symulacji pomiarów



Rysunek 5: Diagram sekwencji dla propagacji pomiarów

4.4 Opis implementacji

Tworzenie naszej symulacji możemy podzielić na dwa etapy. Początkowo stworzyliśmy program, który na podstawie rzeczywistych danych, odczytanych z kilkunastu czujników, wylicza wartości interpolowane między nimi, a następnie prezentuje wyniki na mapie. Symulacje tworzą kolejno aktualizowane wykresy, powstające po ponownym odczytaniu rzeczywistych danych i wyliczeniu danych interpolowanych. Do implementacji interpolacji użyliśmy funkcji *SimpleKriging* (źródło: <https://sourceforge.net/p/geoms2/wiki/Kriging/>). Jej algorytm wygląda następująco:

1. Sprawdzenie odległości między danym węzłem a próbką
2. Sprawdzenie kąta między danym węzłem a próbką
3. Obliczenie tablicy M dla wartości wariogramu pomiędzy węzłem a próbką
4. Uzyskanie macierzy K z wartościami wariogramu dla wszystkich analizowanych węzłów
5. Rozwiązanie układu $K \cdot w = M$, aby uzyskać poszczególne wagi
6. Pomnożenie wag przez wynik odejmowania średniej z wartości od wartości oraz zsumowanie wyniku
7. Otrzymanie wartości dla danego węzła poprzez odjęcie od otrzymanej sumy średniej z wartości
8. Powtórzenie kroków dla wszystkich węzłów

Dodatkowo, dla każdego z wyników, odczytywałyśmy aktualne warunki pogodowe - temperaturę, wiatr, opady, ciśnienie. Dzięki uzyskanym wynikom, mogliśmy zaobserwować, które z nich i w jak dużym stopniu wpływają na zachowanie się smogu.

Drugim etapem naszego projektu było stworzenie pięciogodzinnej predykcji rozprzestrzeniania się smogu na analizowanym przez nas obszarze. Stworzyliśmy prosty model, bazujący na wynikach uzyskanych w poprzednim etapie oraz różnych artykułach (pozycja [10] w Literaturze). Początkowe wartości smogu w analizowanych punktach pomiarowych zostały ustalone na podstawie średniej wartości podanej przez użytkownika oraz obserwacji - zależą od odległości od dróg i dużych skupisk osiedli mieszkaniowych, gdzie występuje największe spalanie. W zależności od podanych przez użytkownika wartości wiatru, temperatury oraz opadów, program odpowiednio symuluje rozprzestrzeniający się smog. Założenia naszego modelu to:

1. Temperatura większa od -5°C nie powoduje znacznych różnic w rozprzestrzenianiu się smogu
2. Jeżeli temperatura jest mniejsza od -5°C to większe palenie w piecach oraz mróz powodują utrzymanie się smogu
3. Im większe opady, tym szybciej zanika smog

4. Silny wiatr (powyżej 5 kt) powoduje najszybsze zanikanie smogu
5. Słaby wiatr powoduje wolniejsze przemieszczanie się smogu
6. W zależności od kierunku wiatru, smog przemieszcza się w odpowiednią stronę

4.5 Załączniki

- Wersja wykonywalna programu dla platformy Windows (src/AirPollutionSimulation.exe)
- Kody źródłowe wraz z komentarzami (folder src)
- Krótki film z przebiegu symulacji (folder video)
- Link do repozytorium: <https://github.com/katarzynawilczak/SMOG>

5 Wyniki symulacji

5.1 Statystyki, uzyskane wyniki ilościowe i jakościowe

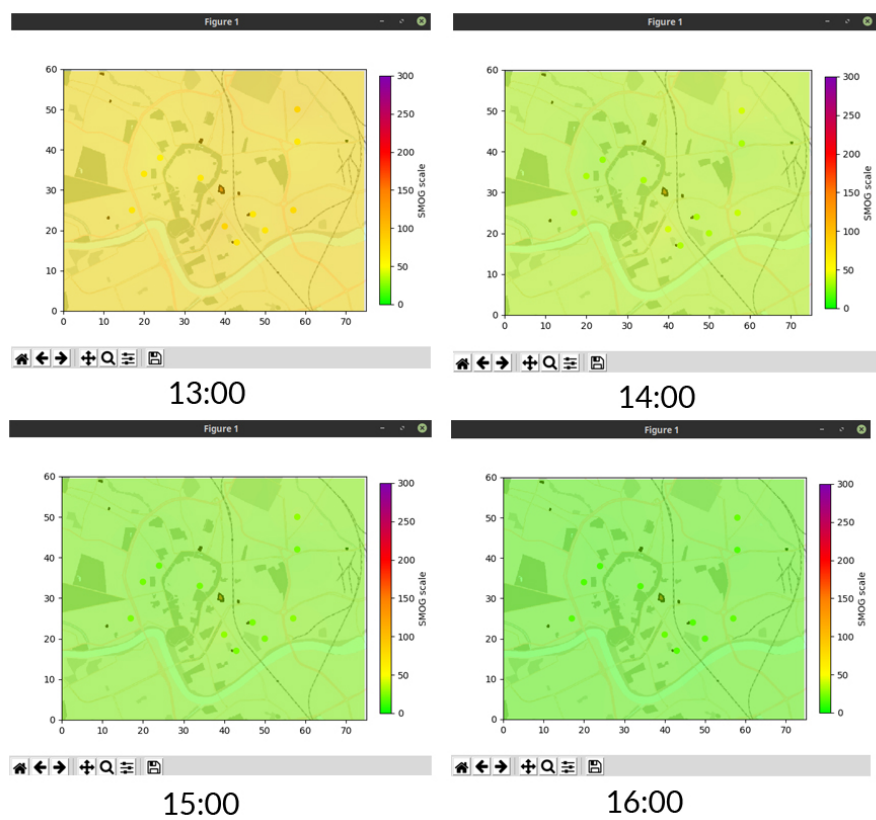
Przykładowe wyniki symulacji będą umieszczone w poniższych podrozdziałach.

5.2 Zastosowane procedury walidacji

Walidację danych symulacji rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń przeprowadziłyśmy na podstawie porównania wartości smogu dla punktów pomiarowych uzyskanych w naszej propagacji z wynikami propagacji portali zajmujących się badaniem przemieszczania się pyłów.

Propagacja na portalach nie jest propagacją dokładnie dla tych punktów pomiarowych, a raczej propagacją ogólną dla terenów okolic Krakowa, dlatego nasze wyniki mogą różnić. Również mało portali oferuje godzinową propagację danych.

Do naszej symulacji wprowadziłyśmy dane wejściowe atmosferyczne: wiatr(08W), temperatura(1C), opad(0.0mm) oraz pomiary zanieczyszczenia dla godziny 12:00 pobrane ze strony <https://airly.com>. Uzyskałyśmy poniższe propagacje.



Jak ukazano na zdjęciach średnie wartości smogu w kolejnych godzinach to:

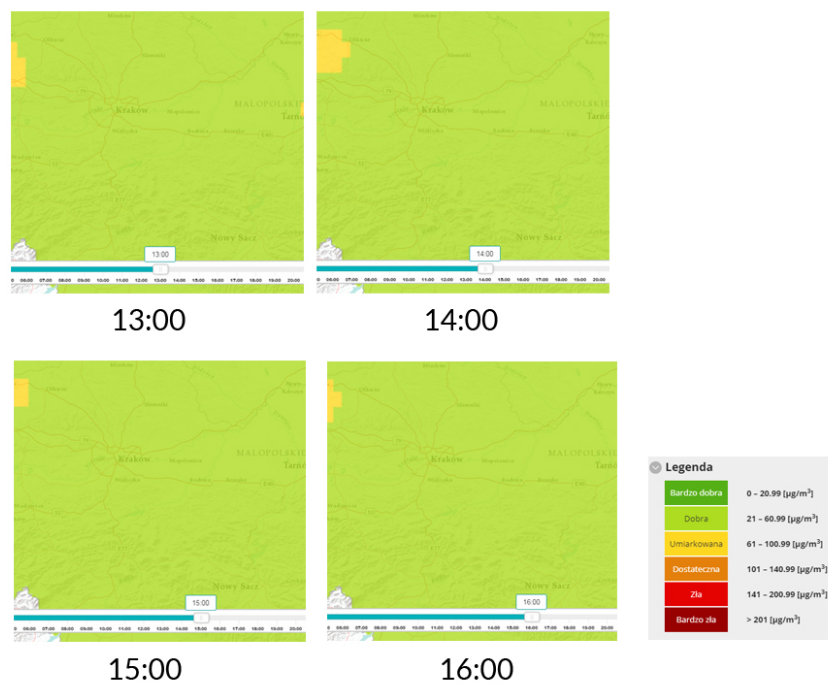
- 13:00: średnio $50-60 \mu/m^2$
- 14:00: średnio $30-40 \mu/m^2$
- 15:00: średnio $23-30 \mu/m^2$
- 16:00: średnio $20-25 \mu/m^2$

Porównanie z propagacją <https://powietrze.malopolska.pl/jakosc-powietrza/>



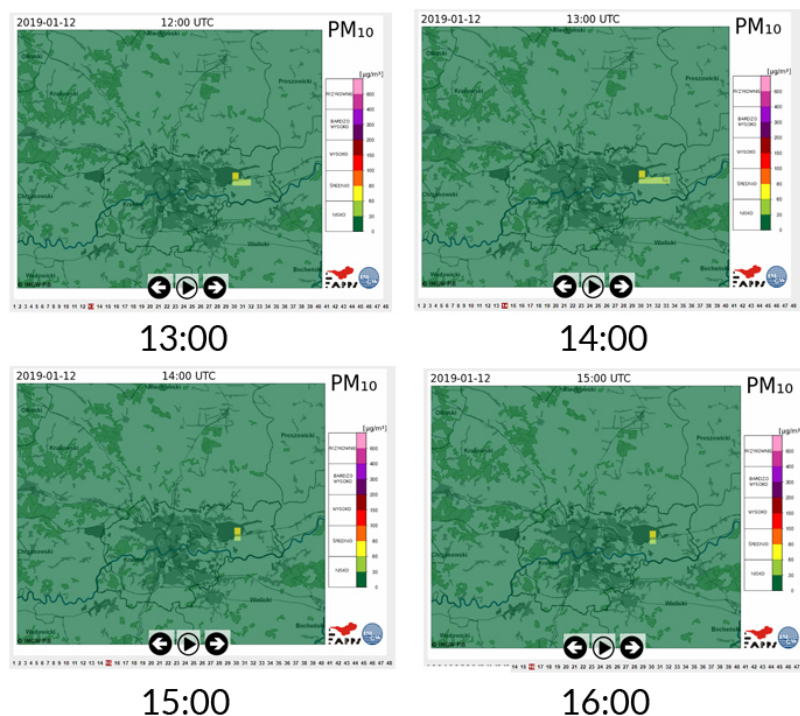
Tutaj propagacja jest bardziej ogólna, dla rozważanego przedziału godzin 12:00-18:00 jakość powietrza była *dobra*. Poziom zanieczyszczenia dla stanu *dobry* został określony na 20-60 μ/m^2 . Wszystkie nasze propagacje mieszczą się w tym przedziale.

Porównanie z propagacją <http://powietrze.gios.gov.pl>



Strona oferuje propagację godzinową dla okolic terenu Krakowa. Poziom zanieczyszczenia został określony jako *dobry*, co według legendy odpowiada skali $21-60.99 \mu/m^2$. Nasze propagacje również mieszczą się w tym przedziale.

Porównanie z propagacją <http://smog.imgw.pl/home>



Propagacja na tym portalu również dotyczy większego obszaru okolic Krakowa. Jednak dla obowiązującej legendy wartości zanieczyszczenia mieszczą się w skali $0-30 \mu/\text{m}^2$ oraz na wschód od Krakowa - $30-60 \mu/\text{m}^2$. Nasza propagacja nieco odbiega od tych wartości, zwłaszcza w pierwszych dwóch godzinach.

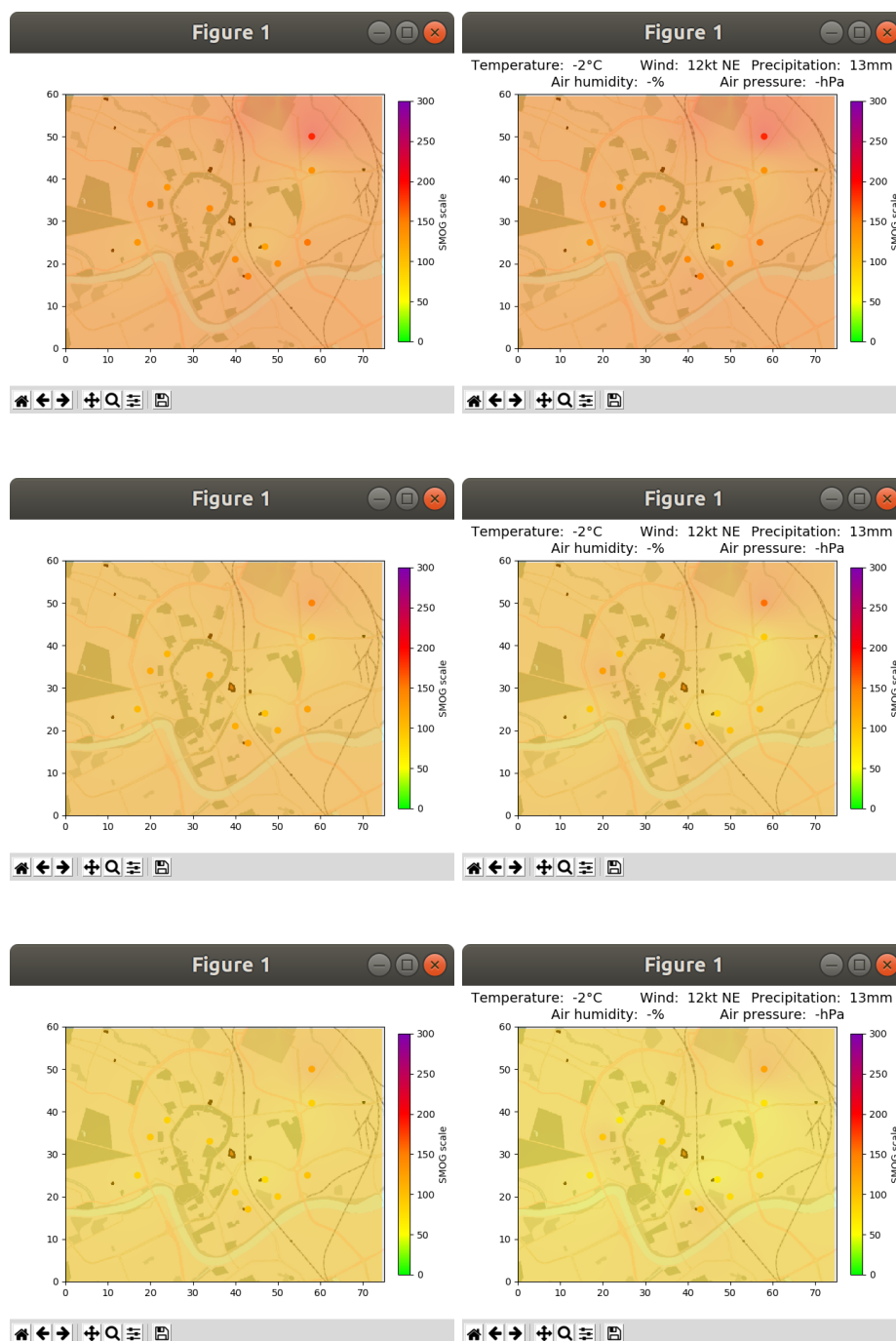
Może być to wynikiem różniących się pomiarów wejściowych. Na stronie smog.imgw.pl pomiary dla godziny 12:00 są również propagacją bazującą na wartościach rzeczywistych z dnia poprzedniego. Nasze dane dla godziny 12:00 są danymi rzeczywistymi z czujników Airly.

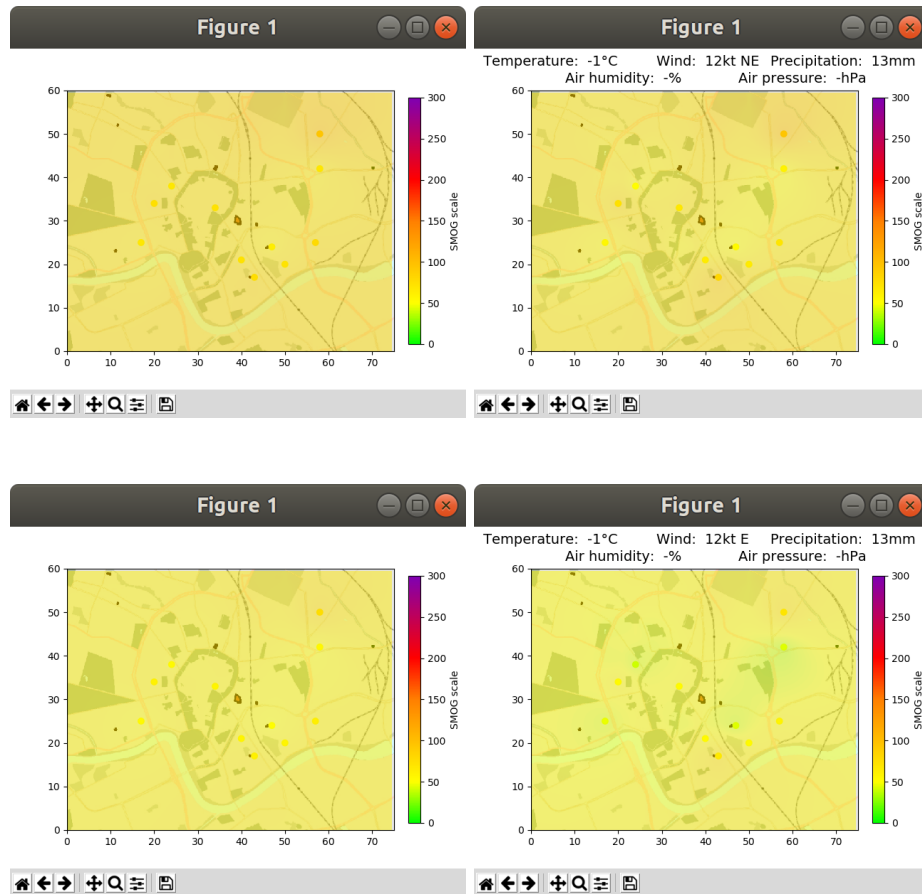
Propagacja może się różnić również dlatego, że smog.imgw.pl wykorzystuje zaawansowany system propagacji zanieczyszczeń **FAPPS** (Forecasting of Air Pollution Propagation System).

5.3 Porównanie wyników z danymi rzeczywistymi

Porównaliśmy w naszym programie symulację dla danych rzeczywistych pobranych z czujników Airly (w programie - *Symulacja*) oraz symulację danych prognozowanych dla kolejnych 5 godzin (w programie - *Propagacja*) przy panujących w tej chwili warunkach atmosferycznych.

Wyniki porównania propagacji (po lewej stronie) oraz danych rzeczywistych (po prawej):





6 Wnioski

Na podstawie naszej implementacji rozprzestrzeniania się smogu z wykorzystaniem danych rzeczywistych można wystarczająco dokładnie przewidzieć zachowanie pyłu przy różnych warunkach atmosferycznych. Po analizie symulacji danych rzeczywistych z naszej symulacji wywnioskowałyśmy, że największy wpływ na przemieszczanie się zanieczyszczeń ma temperatura, opady oraz wiatr.

Największym wyzwaniem projektu była interpolacja wartości pomiędzy punktami pomiarowymi, aby symulacje były atrakcyjne wizualnie oraz wartości pomiędzy punktami pomiarowymi były przybliżone do rzeczywistych. Algorytm interpolacji Kriginga okazał się dobrym narzędziem do przewidzenia stężenia smogu pomiędzy pomiarami czujników. Jest to jednak wymagający obliczeniowo algorytm, z czego wynika kilku sekundowe oczekiwanie na kolejną klatkę symulacji.

Po porównaniu naszej kilkugodzinnej propagacji z propagacjami na innych stronach możemy zauważyć, że nasze wartości nie odbiegają znacznie od wartości prognozowanych na portalach zajmujących się badaniem jakości powietrza. Jest to znaczny sukces tego projektu, ponieważ do określenia wartości prognozowanych został użyty prosty opis zależności oparty o dokonane obserwacje. Oczywiście symulacja nie jest idealna wizualnie (różnice w kolorach w odpowiednich godzinach), jednak wartości dokładne mieszczą się w przewidywanych przedziałach. Ewentualne błędy mogą wynikać z doboru danych wejściowych lub przyjętych skali zanieczyszczeń. Nasza skala jest zbliżona do skali obowiązującej na airly.com.

Możliwości rozwoju

Program mógłby zostać rozszerzony o automatyczne wczytywanie danych z portali takich jak Airly zajmujących się zbieraniem rzeczywistych pomiarów zanieczyszczeń. Propagacja mogłaby zyskać na zastosowaniu bardziej zaawansowanych zależności między stężeniem smogu, a warunkami atmosferycznymi. Występuje również możliwość wzięcia pod uwagę innych czynników atmosferycznych takich jak *ciśnienie* oraz dokładniejsza analiza źródeł emisji zanieczyszczeń. Symulacja mogłaby zostać rozszerzona na inne lub większe obszary geograficzne.

Literatura

- [1] Friederike Hülsmann. *Integrated agent-based transport simulation and air pollution modelling in urban areas-the example of Munich*.
- [2] Hajto M. J., Godłowska J., Kaszowski W., Tomaszewska A.M. *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, 2012.
<http://smog.imgw.pl/home>
- [3] Mgr inż. Jarosław Siewior. *Wykorzystanie modeli statystycznych do oceny i prognozowania stężeń zanieczyszczeń powietrza na przykładzie Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego*. Rozprawa doktorska.
- [4] Zahari Zlatev. *Computer Treatment of Large Air Pollution Models*.
- [5] *Air Pollution Information System UK*.
<http://www.apis.ac.uk/air-pollution-modelling>
- [6] Ministerstwo Środowiska, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska. *Wskazówki metodyczne dotyczące modelowania matematycznego w systemie zarządzania jakością powietrza*. Warszawa, 2003.
- [7] Aman Tyagi, Preetvanti Singh. *Applying Kriging Approach on Pollution Data using GIS Software*.
- [8] Stijn Janssen, Frans Fierens, Gerwin Dumont, Clemens Mensink. *RIO: A NOVEL APPROACH FOR AIR POLLUTION MAPPING*.
- [9] Andrzej Brandyk, Grzegorz Majewski, Laura Poretta. *Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW, Zakład Hydrologii i Zasobów Wodnych, Zakład Meteorologii i Klimatologii*.
- [10] Mapa czujników Airly oraz artykuły zamieszczone na stronie.
<https://airly.eu/pl>
<https://airly.eu/pl/pogoda-a-smog-czy-i-jak-warunki-pogodowe-wplywaja-na-smog>
- [11] System Prognozowania Rozprzestrzeniania Zanieczyszczeń Powietrza propagacje dla Krakowa i Małopolski oraz artykuły zamieszczone na stronie
<http://smog.imgw.pl/home>
- [12] Ocena jakości powietrza Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska (GIOŚ) propagacje dla Polski
<http://powietrze.gios.gov.pl>