

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI, INFORMATYKI I

INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ

KIERUNEK INFORMATYKA I SYSTEMY INTELIGENTNE

Evolution of wildlife population

Autorzy projektu

KACPER MAJCHRZAK

NORBERT KLOCKIEWICZ

PATRYK KOŻUCH

Styczeń 2023

wersja 1

Spis treści

1	CEL I ZAKRES PROJEKTU	1
1.1	Cel Projektu	1
1.2	Oczekiwane rezultaty	1
2	CHARAKTERYSTYKA PROBLEMU	2
3	DANE PORÓWNAWCZE	3
4	MODEL FORMALNY	5
4.1	Problematyka	5
4.2	Definicja agenta	5
4.3	Zachowania indywidualne agentów	6
4.4	Interakcje pomiędzy agentami	7
4.5	Schemat interakcji agentów	8
4.6	Wizualizacja danych	8
4.7	Sposoby walidacji	10
5	REALIZACJA PRAKTYCZNA	11
5.1	Założenia projektowe	11
5.2	Oprogramowanie	14
5.3	Szczegóły implementacji	14
6	REZULTATY SYMULACJI	16
7	DYSKUSJA WYNIKÓW	19
8	PODSUMOWANIE	21

1 CEL I ZAKRES PROJEKTU

1.1 Cel Projektu

Przedmiotem naszego projektu jest szacowanie liczebności populacji wilka szarego (*Canis lupus*) w obszarze obejmującym Szwecję i Norwegię. W celu osiągnięcia tego celu wykorzystujemy model agentowy, który uwzględnia różne wielkości stad wilków, takie jak pojedyncze osobniki, pary i większe grupy. Nasza analiza opiera się również na kategoryzacji wiekowej wilków, obejmującej szczenięta, młode osobniki oraz dorosłe zwierzęta.

1.2 Oczekiwane rezultaty

W ramach tego badania priorytetem jest odwzorowanie siedliska wilków na badanym obszarze, co pozwoli nam uzyskać wiarygodne i precyzyjne dane dotyczące liczebności oraz specyfiki rozważanej populacji.

2 CHARAKTERYSTYKA PROBLEMU

Chcąc przygotować model symulujący ewolucję populacji wilków, porównaliśmy różnorodne systemy dyskretne [13]. Naszym wyborem stał się model agentowy, szeroko opisany w publikacji *Agent-based and individual-based modeling: a practical introduction* [12] oraz *Individual-Based Modeling and Ecology* [11], stawiającej na modelowanie środowisk naturalnych. Nasz model formalny populacji przygotowujemy w oparciu o *Ecological modeling: a common-sense approach to theory and practice* [7] oraz *Agent-based modeling: Population limits and large timescales* [9]. Jako teren wybraliśmy południowy obszar Szwecji. Do walidacji i parametryzacji modelu posłużyliśmy się już przeprowadzanymi badaniami w tych rejonach, opisanych w *Agent-based models predict patterns and identify constraints of large carnivore recolonizations, a case study of wolves in Scandinavia* [10], *Estimating wolf (*Canis lupus*) population size from number of packs and an individual based model* [6] oraz *Additional population viability analysis of the Scandinavian wolf population* [15]. Jako podstawową implementację wykorzystaliśmy poradnik opublikowany w magazynie internetowym *Towards Data Science* [8].

3 DANE PORÓWNAWCZE

Jako dane wejściowe oraz walidacyjne użyliśmy informacji o liczebności populacji zawartych w raportach na temat wybranego gatunku wilka zawartych w artykule opisującym stan gatunku na terenie Skandynawii [10]. Jeżeli chodzi o dane wejściowe, wykorzystaliśmy informacje z artykułu [16] opisującego stan populacji w zimie 2002-2003, ponieważ zawiera on szczegółowe informacje o statusie społecznym poszczególnych osobników. Artykuły z kolejnych lat nie zawierają takowej informacji, z tego powodu zamierzamy wykorzystać je jako dane walidacyjne, gdyż głównym celem naszej symulacji jest wyznaczanie liczby watah oraz liczebności całego gatunku na wybranym terenie.

Dane z zimy 2002 - 2003:

- Liczebność populacji: 84-100 osobników
- Liczba stad: 8
- Liczba wilków należących do stada: 43 - 51
- Liczba par: 9
- Inne wilki(szczeniaki oraz niedorosłe): 10 - 18
- Liczba włóczęg: 12

Dane od lat 2002 do 2014 zostały umieszczone w tabeli: 1.

Rok	Liczba Wilków	Liczba Stad
2002	84-100	8
2003	101-120	8
2004	135-152	11
2005	141-160	14
2006	136-169	15
2007	166-210	17
2008	213-252	20
2009	252-291	29
2010	289-325	28
2011	258-332	31
2012	350-410	33
2013	316-520	39
2014	364-598	43

Tabela 1: Dane na temat liczby populacji w kolejnych latach

Ulv i Skandinavia: Statusrapport for vinteren 2002-2003 [16].

4 MODEL FORMALNY

4.1 Problematyka

Przedmiotem naszego projektu jest **szacowanie liczebności populacji wilka szarego** (*Canis lupus*) w obszarze obejmującym Szwecję i Norwegię. W celu osiągnięcia tego celu wykorzystaliśmy model agentowy, który uwzględnia różne wielkości stad wilków, takie jak pojedyncze osobniki, pary i większe grupy. Nasza analiza oparła się również na kategoryzacji wiekowej wilków, obejmującej szczenięta, młode osobniki oraz dorosłe zwierzęta. Do wykonania modelu użyliśmy framework'u MESA który bazuje na modelu agentowym. Tworząc nasz model wzorowaliśmy się na artykule [6].

4.2 Definicja agenta

Cechy agenta Jako agenta definiujemy pojedynczego osobnika w populacji wilków. Osobnik taki posiada następujące cechy: identyfikator, status (żywy/martwy), płeć, wiek, status społeczny, identyfikator grupy do której należy, wiek osiągnięcia dorosłości, wiek w którym zacznie oznaczać swoje terytorium (=założy jednoosobowe stado), wiek w którym po raz pierwszy posiadał potomstwo oraz wiek w chwili śmierci.

Status społeczny Jako status społeczny, definiujemy jedną z następujących wartości:

- Szczeniak (*pup*) - osobnik w wieku 0-12 miesięcy, będący członkiem stada, w którym się narodził.
- Niedorosły (*subadult*) - osobnik w wieku powyżej 12 miesięcy, pozostający członkiem stada, w którym się narodził.
- Włóczęga (*vagrant*) - osobnik, który opuścił swoje stado, ale nie osiedlił się jeszcze.
- Dorosły (*adult*) - osobnik dorosły, należący do stada. Przy czym, osobnik taki może:

- założyć jednoosobowe stado, ale bez partnera (tylko osobnik żeński).
- należeć do stada wraz z partnerką, ale nie posiadać jeszcze potomków.
- należeć do stada oraz przynajmniej raz posiadać potomstwo.

Stado Jako stado określamy grupę, która posiada wyznaczone terytorium oraz minimum jednego osobnika *Alfa*. Stado może posiadać maksymalnie jednego osobnika *Alfa* danej płci. Osobniki *Alfa* odpowiadają za reprodukcję wewnątrz stada. Zazwyczaj stado ogranicza się do pary oraz jej potomstwa.

Podsumowanie cech agenta znajduje się w tabeli 2.

Cecha	Zakres wartości	Wartość początkowa	Zmienia się w czasie
status	żywy/martwy	żywy	tak
płeć	żeńską/męską	losowo	nie
wiek	0-84 (miesiące)	0	tak
status społeczny	pup/subadult/vagrant/adult	pup	tak
Wiek oddzielenia od stada	10-84 (miesiące)	losowo	nie
Wiek osiedlenia	> Wiek oddzielenia	losowo	nie
Wiek pierwszego potomstwa	> Wiek oddzielenia	-	Ustalany w momencie posiadania pierwszego potomstwa
Wiek śmierci	1-84 (miesiące)	-	Ustalany w momencie śmierci

Tabela 2: Podsumowanie cech agenta

4.3 Zachowania indywidualne agentów

Agenty indywidualnie wykazują następujące zachowania i własności:

- Wiek agenta jest liczony w miesiącach.
- Wiek jest aktualizowany z każdym krokiem (=miesiąc).
- Szczęnię może odłączyć się od stada po 10 miesiącach.

- Wiek szczenięcy kończy się dla agenta po 12 miesiącach życia. Zostaje on wtedy *włóczęgą* lub *niedorośłym* jeżeli zostanie on w swoim stadzie.
- Niedorośły przy odłączeniu się od stada zostaje włóczęgą.
- Włóczęga nie oznacza swojego terytorium (nie zakłada stada).
- Włóczęga staje się *dorośłym* kiedy zaczyna znaczyć swoje terytorium (założyć stado).
Może to zrobić tylko żeński osobnik.
- Tylko włóczęga może szukać partnera.
- Jeżeli osobnik osiągnie wiek 7 lat ginie ze starości.

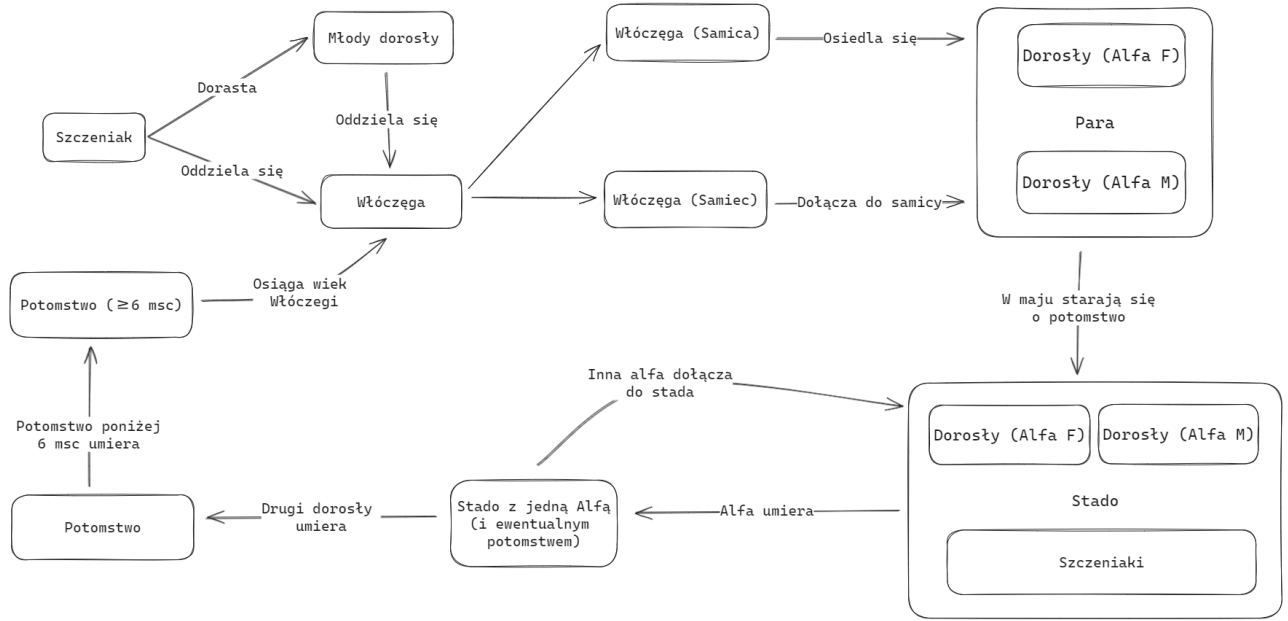
4.4 Interakcje pomiędzy agentami

Agenty w interakcji z innymi agentami wykazują następujące zachowania:

- Gdy agent połączy się w parę z drugim agentem starają się o potomstwo.
- Narodziny potomstwa odbywają się w maju.
- Jeżeli parze agentów uda się mieć potomstwo w każdym kolejnym roku będą mieć młode.
- Jeżeli obydwu osobnika *Alfa* zginą stado się rozpada, a potomstwo jeżeli ma mniej niż 6 miesięcy, ginie.
- Jeżeli w stadzie brakuje osobnika *Alfa* to dołącza do niej *włóczęga*

4.5 Schemat interakcji agentów

Schemat 1 przedstawia interakcje pomiędzy agentami oraz cykl życia agenta. Zawiera on informacje o tym jaki status społeczny może osiągnąć agent oraz kiedy w niego przechodzi.



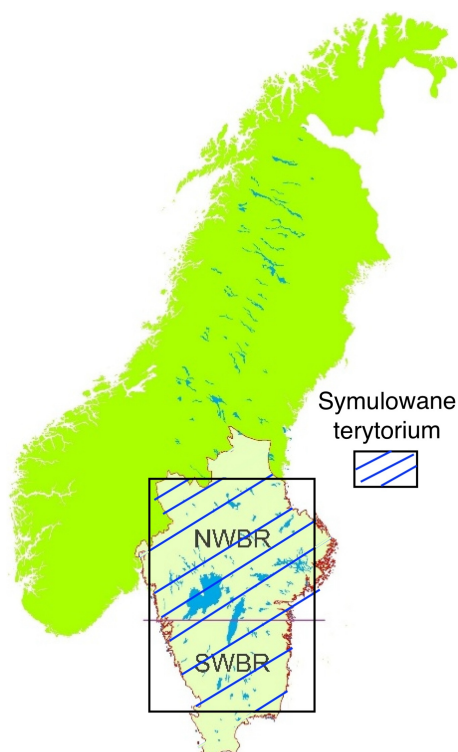
Rysunek 1: Schemat interakcji agentów

4.6 Wizualizacja danych

Predykcje modelu zostały zwizualizowane na siatce dyskretnej, symulującej środowisko skandynawskie. Poszczególne statusy społeczne wilków rozróżnione zostały osobnymi kolorami:

- Niebieskim - Szczenięta (*pups*)
- Żółtym - niedorosłe osobniki (*subadults*)
- Zielonym - włóczęgi (*vagrants*)
- Czerwonym - dorośli (*adults*)

Jako siatkę, przyjęliśmy prostokątne terytorium o rozmiarze 240 x 180 komórek. Odo-
powiada to obszarowi o rozmiarach 600 km x 450km znajdującemu się na południu Szwecji.
Obszar ten znajduje się na rysunku 2.



Rysunek 2: Symulowane terytorium
bazując na [10]

Biorąc pod uwagę odległość, jaką może pokonać wilk w ciągu miesiąca (ponad 1000 km, dziennie to do nawet 39 km [5]) jest ona mniejsza niż odległość pomiędzy dwoma najbardziej oddalonymi punktami w symulowanym obszarze. W związku z tym, zakładamy, że w ciągu jednego kroku wilki mogą się poruszyć do dowolnego, niezajętego punktu na siatce. Dodatkowo, wilki, które się osiedlą nie zmieniają swojego położenia, a ich stado porusza się wokół nich w z góry zdefiniowanej odległości.

Wilk zajmuje dokładnie jedną komórkę siatki. W danej komórce może znajdować się maksymalnie jeden wilk.

Biorąc pod uwagę terytorium, jakie zajmuje jedno stado (od 100-540 km^2 [14]), przyjęliśmy powierzchnię terytorium dla stada 306,25 km^2 , równą obszarowi wyznaczonemu na siatce dyskretnej o wymiarze 7x7 komórek.

Rozmiary elementy wizualizacji zostały zawarte w tabeli 3:

Element	Rozmiar rzeczywisty km	Rozmiar w symulacji (jednostek)
Siatka	600 x 450	240 x 180
Komórka siatki	2,5 x 2,5	1 x 1
Terytorium stada	17,5 x 17,5	7x7

Tabela 3: Rozmiary elementów wizualizacji

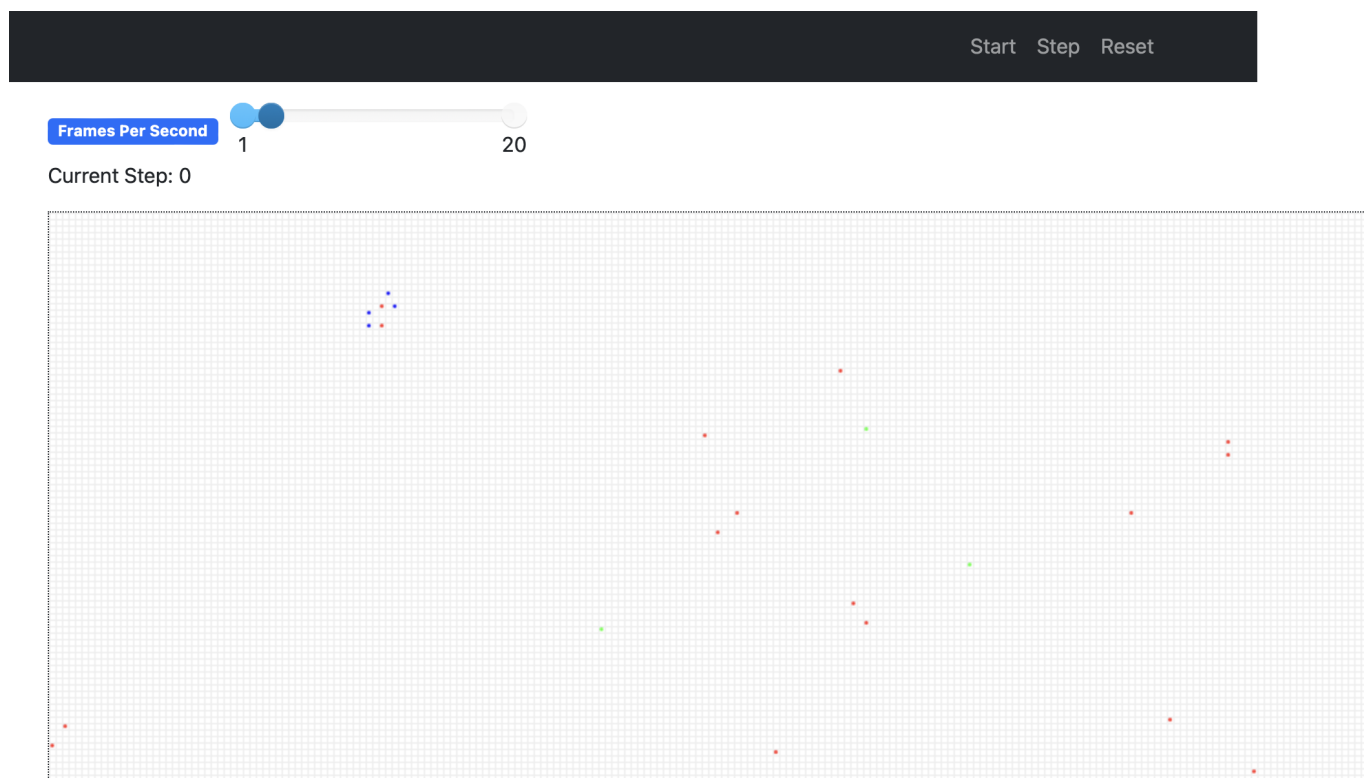
4.7 Sposoby walidacji

Celem naszej symulacji było wyznaczenie zmian w liczebności populacji wybranego gatunku wilka na terenie Szwecji i Norwegii. Jako początek symulacji zdecydowaliśmy się wybrać rok 2002. Powodem takiej decyzji jest brak informacji o podziale osobników na statusy społeczne w kolejnych latach. Natomiast jesteśmy w posiadaniu informacji o liczebności populacji (bez podziału na status społeczny konkretnych osobników) w kolejnych latach *Ulv i Skandinavia: Statusrapport for vinteren 2002-2003* [16]. Dzięki temu mogliśmy przeprowadzić walidację modelu porównując liczebność populacji, która została wygenerowana przez nasz model z faktyczną liczbą osobników wybranego gatunku w danym roku.

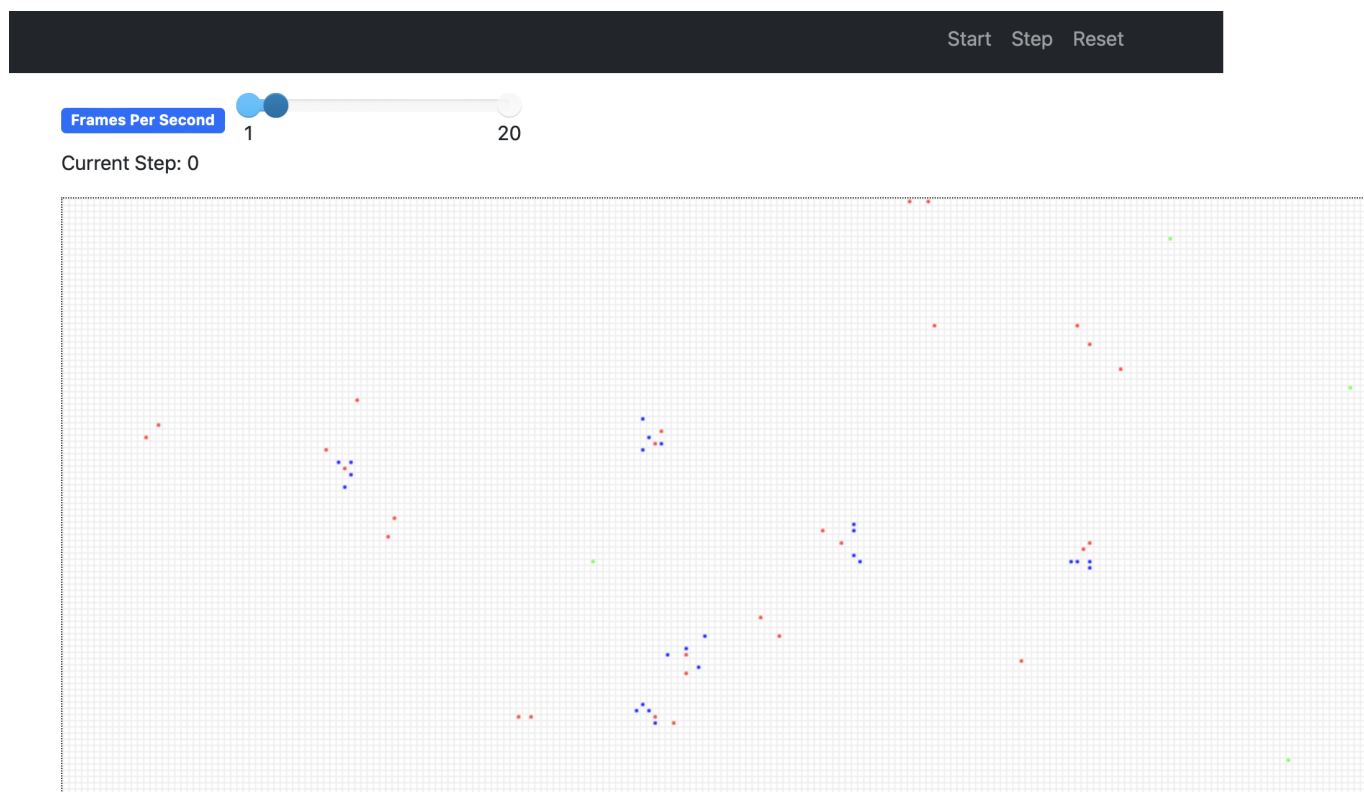
5 REALIZACJA PRAKTYCZNA

5.1 Założenia projektowe

Jako zespół naszym głównym założeniem było jak najbardziej dokładne odwzorowanie danych uzyskanych przez model stworzony przez autorów artykułu naukowego, na podstawie którego oparliśmy nasz projekt. Jednym z ograniczeń była ilość danych walidacyjnych, przez co nie można określić czy nasz model odwzorowuje zachowanie populacji w pełnym zakresie. Parametry przeżywalności dla wilków zostały przyjęte identycznie, jak w pracy [6]. Dodatkowo, ze względu na stosunkowo niewielkie symulowane terytorium, przyjęliśmy że wilk jest w stanie przebyć całe terytorium w jednym kroku czasowym aby dołączyć do stada. Jako krok czasowy przyjęliśmy 1 miesiąc. Naszych agentów na początku symulacji rozmieszczamy na siatce dyskretnej w sposób losowy co zostało zamieszczone na rysunku 3 oraz rysunku 4.



Rysunek 3: Ułożenie 1



Rysunek 4: Ułożenie 2

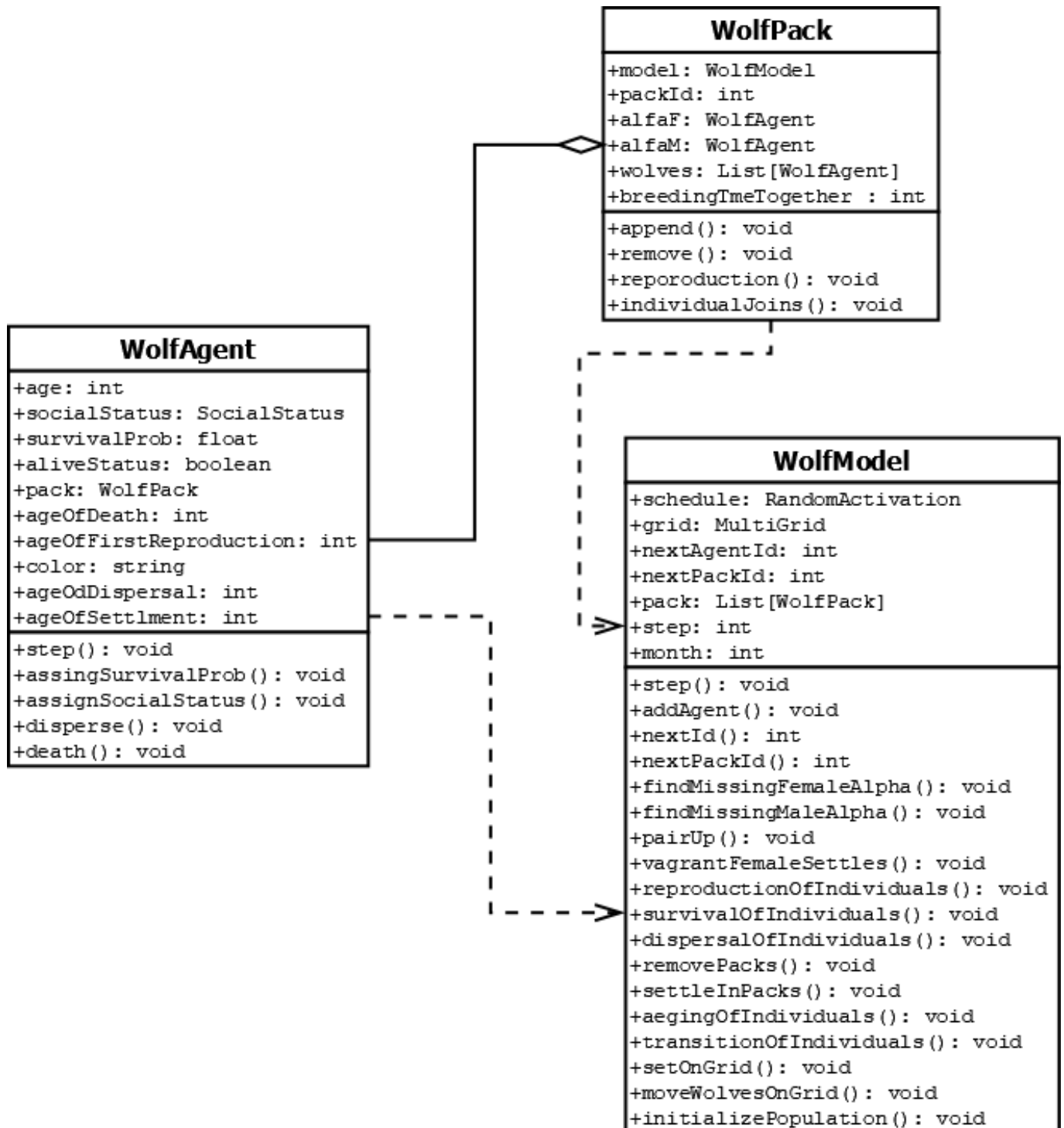
5.2 Oprogramowanie

Naszą aplikację stworzyliśmy w języku Python (w wersji 3.10). Wykorzystaliśmy też dodatkowe biblioteki takie jak:

- Mesa w wersji 2.1.1 [3]
- Matplotlib w wersji 3.8.0 [2]
- Numpy w wersji 1.26.0 [4]
- w celu ułatwienia prototypowania Jupyter Notebook oraz Jupyter Server [1]

5.3 Szczegóły implementacji

W naszej implementacji wyodrębniliśmy wilka jako agenta, stado jako klasę do której wilk może należeć, oraz model w którym odbywa się cała symulacja. Na rysunku 5 umieściliśmy diagram klas który opisuje naszą implementację:

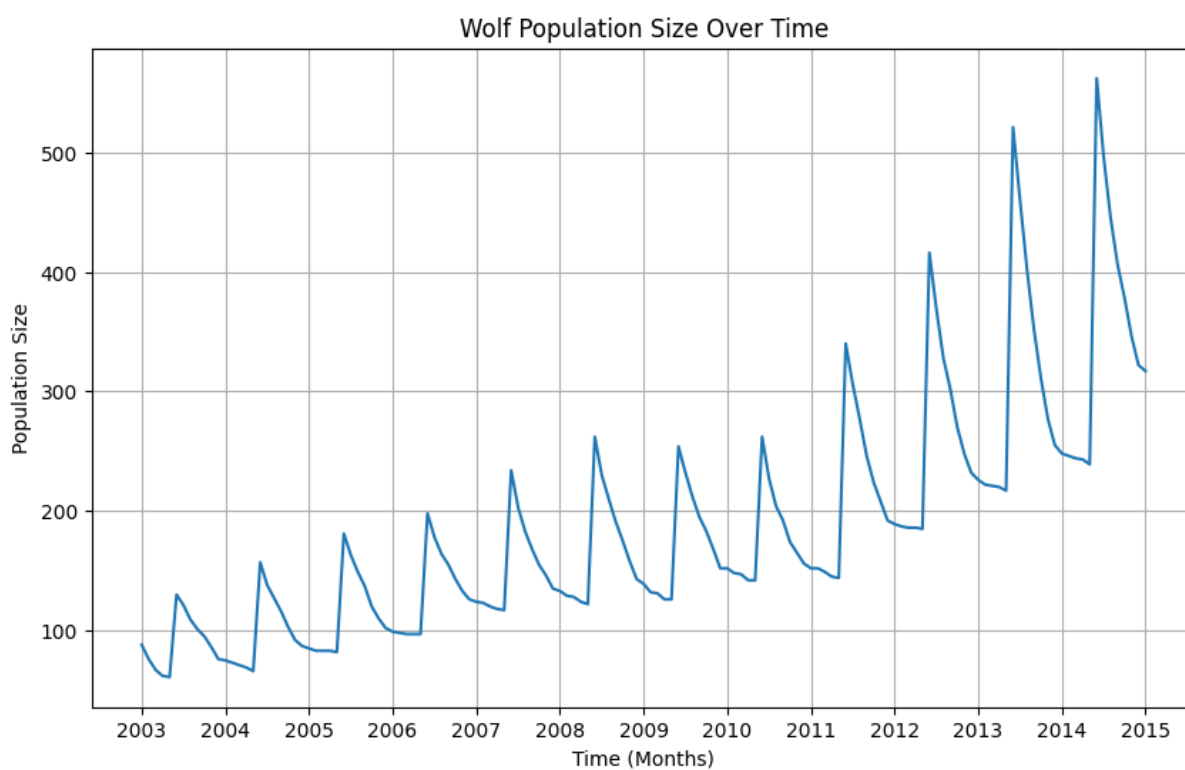


Rysunek 5: Diagram Klas

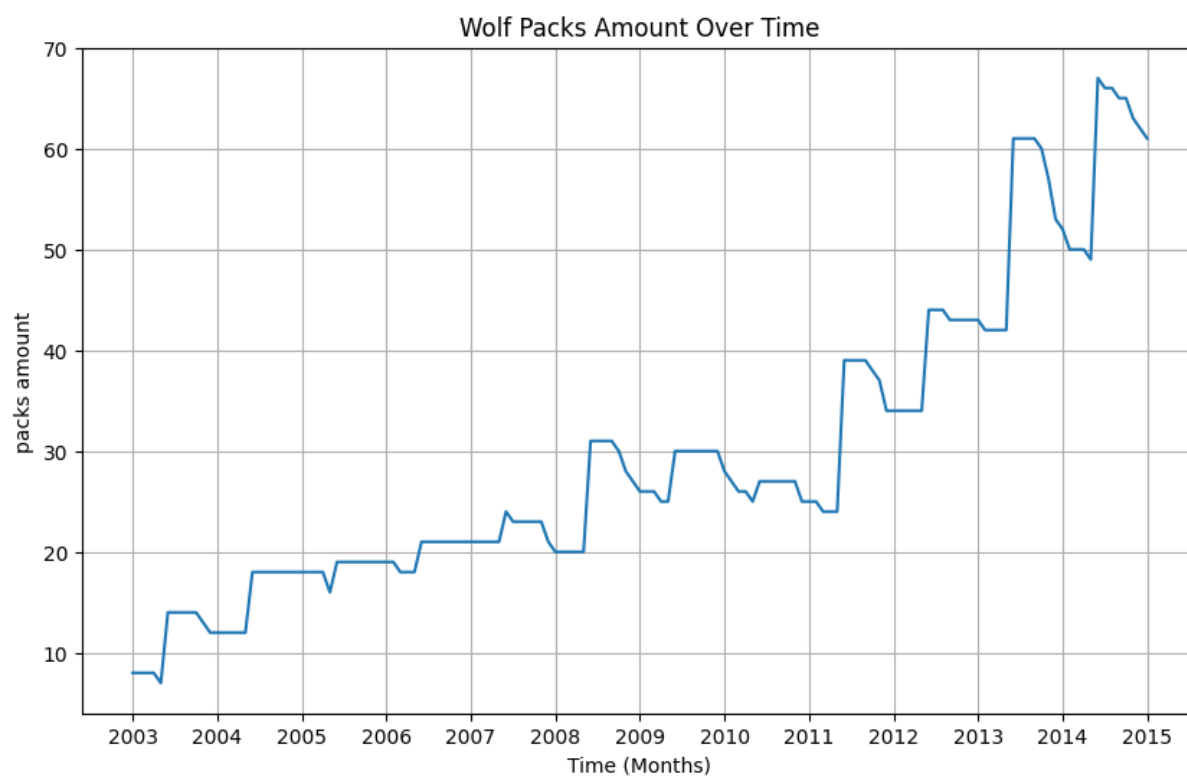
6 REZULTATY SYMULACJI

Rezultaty naszej symulacji przedstawiliśmy za pomocą wizualizacji zapewnionej przez framework MESA. Na wykresach znajdują się informacje na temat:

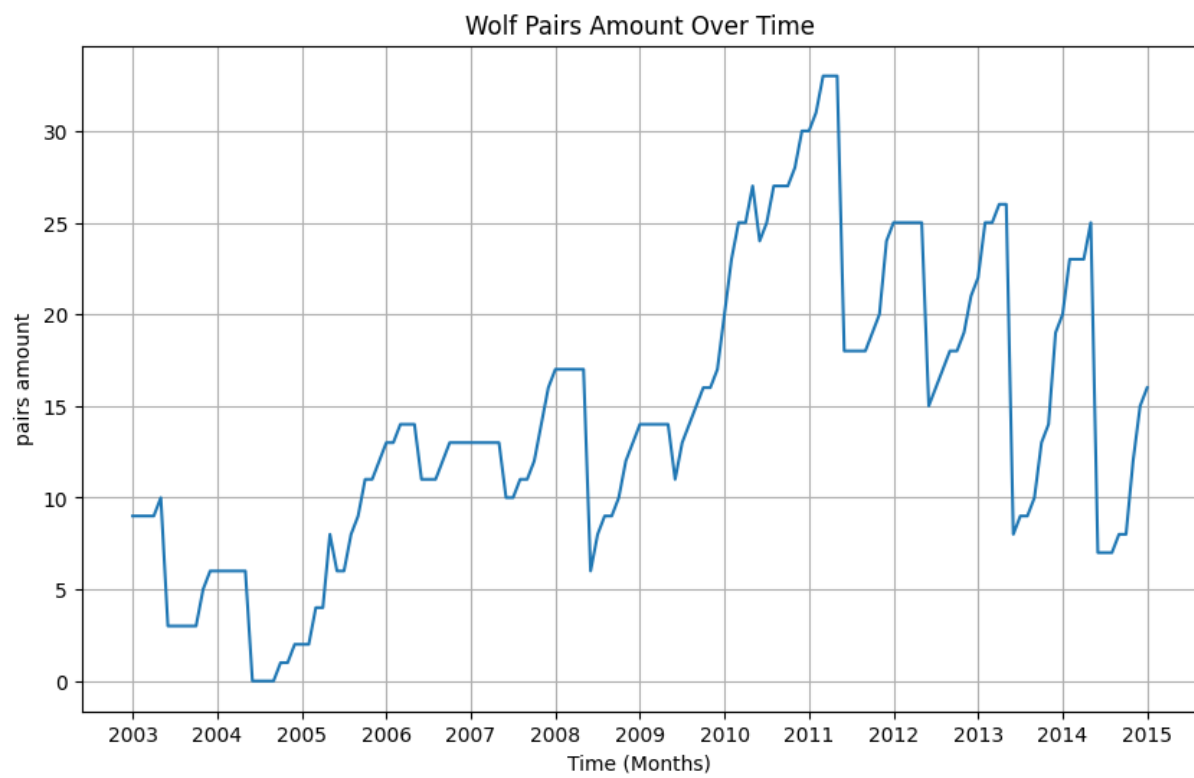
- Populacji wilków 6
- Liczby watah 7
- Liczby par 8



Rysunek 6: Wykres populacji wilków



Rysunek 7: Wykres liczby watah



Rysunek 8: Liczba par

7 DYSKUSJA WYNIKÓW

Naszą symulację uruchomiliśmy dziesięciokrotnie. Obliczyliśmy średnią oraz odchylenie standardowe. Przygotowaliśmy porównanie danych walidacyjnych wraz z uzyskanymi rezultatami. Znajdują się one w tabeli 4.

Rok	Rzeczywista Liczba Wilków	Symulowana Liczba Wilków	Rzeczywista Liczba Stad	Symulowana Liczba Stad
2002	84-100	88	8	8
2003	101-120	129-142	8	11-14
2004	135-152	144-163	11	13-15
2005	141-160	166-194	14	16-17
2006	136-169	198-229	15	18-21
2007	166-210	234-269	17	21-25
2008	213-252	249-278	20	26-29
2009	252-291	268-299	29	28-32
2010	289-325	304-349	28	31-34
2011	258-332	340-391	31	35-40
2012	350-410	391-472	33	38-46
2013	316-520	479-578	39	44-55
2014	364-598	550-675	43	53-66

Tabela 4: Walidacja wyników.

Tabela 4, przedstawiająca dane dotyczące liczby wilków i stad w latach 2002-2014, stanowi kluczowy element w analizie i walidacji wyników naszej symulacji. Po pierwsze, zauważalna jest ogólna zgodność trendów między rzeczywistymi danymi a wynikami symulacji, co wskazuje na adekwatność modelu symulacyjnego. Warto zwrócić uwagę na to, jak

model radzi sobie z prognozowaniem dynamiki populacji wilków i stad w różnych okresach.

Analizując dokładniej dane, widzimy, że w niektórych latach, takich jak 2003 czy 2005, różnica między rzeczywistymi a symulowanymi danymi jest większa. Może to sugerować, że w tych konkretnych okresach zaszyły czynniki, które nie zostały w pełni ujęte w modelu symulacyjnym. Możliwe, że zmienne środowiskowe lub inne nieprzewidziane zdarzenia miały wpływ na rzeczywistą wielkość populacji.

Odchylenie standardowe oraz średnia z dziesięciu symulacji pozwalają na ocenę spójności i niezawodności modelu. Niewielkie odchylenie standardowe świadczy o stabilności wyników symulacji, co jest pożądane w kontekście walidacji modelu.

Warto również zwrócić uwagę na to, jak symulacja radzi sobie z przewidywaniem liczby stad w porównaniu do liczby wilków. Wydaje się, że model jest bardziej precyzyjny w przewidywaniu liczby stad niż indywidualnych wilków, co może wynikać z natury modelowanych procesów ekologicznych.

8 PODSUMOWANIE

Na podstawie zwróconych danych jesteśmy w stanie stwierdzić że nasz model używając danych wejściowych dostarczonych przez skandynawskie służby zajmujące się ochroną wybranego gatunku wilka bardzo dobrze poradził sobie z symulacją odnawiającej się populacji. Dane wygenerowane przez nasz model są bardzo podobne do realnych danych zbieranych przez wyżej wymienioną organizację. Wykresy które udało nam się zwizualizować odpowiadają również wykresom zamieszczonym w artykule naukowym [6], na którym oparliśmy nasz projekt. Biorąc pod uwagę powyższe argumenty, uważamy iż zamierzone cele udało nam się zrealizować. Naszym zdaniem projekt nie ma zbyt dużego pola do rozwoju, gdyż dane na temat populacji wybranego gatunku wilka są bardzo ograniczone, natomiast sama architektura modelu mogłaby być użyta w celu symulacji innych odradzających się gatunków, dla których dostępne jest więcej danych wejściowych.

Literatura

- [1] Jupyter. <https://jupyter.org/>. Accessed: 2024-01-12.
- [2] Matplotlib. <https://matplotlib.org/>. Accessed: 2024-01-12.
- [3] Mesa. https://mesa.readthedocs.io/en/stable/apis/api_main.html. Accessed: 2024-01-12.
- [4] Numpy. <https://numpy.org/>. Accessed: 2024-01-12.
- [5] Rong Ke Anastasia Kirilyuk, Vadim E. Kirilyuk. Long-distance dispersal of wolves in the dauria ecoregion. *Mammal Research*, 2010.
- [6] Guillaume Chapron, Camilla Wikenros, Olof Liberg, Petter Wabakken, Øystein Flagstad, Cyril Milleret, Johan Månsson, Linn Svensson, Barbara Zimmermann, Mikael Åkesson, and Håkan Sand. Estimating wolf (*canis lupus*) population size from number of packs and an individual based model. *Ecological Modelling*, 339:33–44, 2016. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304380016303179>.
- [7] William E Grant and Todd M Swannack. *Ecological modeling: a common-sense approach to theory and practice*. John Wiley & Sons, 2011.
- [8] Bassel Karami. Intro to agent based modeling. <https://towardsdatascience.com/intro-to-agent-based-modeling-3eea6a070b72>. Accessed: 2023-11-15.
- [9] J.-H. Niemann, S. Winkelmann, S. Wolf, and C. Schütte. Agent-based modeling: Population limits and large timescales. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 31(3):033140, 03 2021. <https://doi.org/10.1063/5.0031373>.
- [10] Mariano R. Recio, Alexander Singer, Petter Wabakken, and Håkan Sand. Agent-based models predict patterns and identify constraints of large carnivore recolonizations,

- a case study of wolves in scandinavia. *Biological Conservation*, 251:108752, 2020.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0006320720308107>.
- [11] Steven F Railsback and Volker Grimm. *Individual-Based Modeling and Ecology*. Princeton university press, 2005.
 - [12] Steven F Railsback and Volker Grimm. *Agent-based and individual-based modeling: a practical introduction*. Princeton university press, 2019.
 - [13] Hiroki Sayama. *Introduction to the modeling and analysis of complex systems*. Open SUNY Textbooks, 2015.
 - [14] Joanne M. Thurber and Rolf O. Peterson. Effects of Population Density and Pack Size on the Foraging Ecology of Gray Wolves. *Journal of Mammalogy*, 74(4):879–889, 11 1993.
 - [15] Michael W Bruford. *Additional population viability analysis of the Scandinavian wolf population*. Naturvårdsverket, 2015.
 - [16] Petter Wabakken, Åke Aronson, Håkan Sand, Håvard Rønning, and Ilpo Kojola. Ulv i skandinavia: Statusrapport for vinteren 2002-2003. 2004.