

PROJEKT:

SYMULACJA MIGRACJI I ZMIAN POPULACJI WILKA SZAREGO

KOD KURSU: 120-ISI-1S-777

**PRZEDMIOT: SYMULACJA SYSTEMÓW DYSKRETNYCH
(SSD)**

Autorzy projektu

AMELIA ADAMCZUK

MAGDALENA BERNAT

Opiekun projektu

Dr inż. MARCIN PIEKARCZYK



AGH

EAIiIB / Katedra Informatyki Stosowanej

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
w Krakowie
Kraków, Polska

21 stycznia 2024 r.

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	4
4.1	Model matematyczny i model agentowy	4
4.1.1	Obliczanie rocznych zmian populacji	4
4.1.2	Prognozowanie przyszłej populacji	5
4.1.3	Aktualizacja populacji	5
4.2	Dyskretyzacja i kroki czasowe	6
4.3	Ogólny opis aplikacji	6
4.4	Obliczenia symulacyjne i wizualizacja wyników	7
5	REALIZACJA PRAKTYCZNA	8
5.1	Założenia projektowe	8
5.2	Oprogramowanie	9
6	REZULTATY SYMULACJI	10
7	DYSKUSJA WYNIKÓW	11
8	PODSUMOWANIE	12
	Bibliografia	13

1. CEL I ZAKRES PROJEKTU

1.1 Cel projektu

Celem projektu jest zbadanie dynamiki populacji wilków we wschodniej części Karpat Polskich w latach 2000–2020. Projekt koncentruje się na symulacji procesów ekologicznych, takich jak narodziny, zgony oraz migracje watah wilków, z uwzględnieniem wpływu czynników środowiskowych i antropogenicznych, takich jak dostęp do pożywienia oraz myślistwo. Aplikacja umożliwi wizualizację zmian populacji wilków w badanym okresie oraz analizę ich interakcji z siedliskami jeleni, oferując jednocześnie interfejs graficzny pozwalający użytkownikowi na dynamiczne dostosowanie parametrów symulacji i obserwację wyników w czasie rzeczywistym.

1.2 Oczekiwane rezultaty

- **Symulacja dynamiki populacji wilków:** Oczekuje się, że symulacja dostarczy realistycznych danych dotyczących zmian liczebności populacji wilków w zależności od parametrów środowiskowych oraz antropogenicznych.
- **Analiza interakcji wilków z siedliskami jeleni:** Rezultatem będzie szczegółowa obserwacja zależności pomiędzy rozmieszczeniem watah wilków a lokalizacją siedlisk jeleni, co pozwoli zrozumieć wpływ drapieżnictwa na zachowania zwierząt.
- **Wpływ parametrów na populację:** Użytkownik będzie mógł obserwować, jak zmiana parametrów (np. wskaźnik narodzin, śmiertelności czy intensywność polowań) wpływa na populację wilków w danym okresie czasu.
- **Prognozy populacji:** Aplikacja pozwoli na przewidywanie liczebności populacji wilków w kolejnych latach na podstawie modelu matematycznego, z uwzględnieniem oszacowanych danych historycznych.

2. CHARAKTERYSTYKA PROBLEMU

Modelowanie populacji wilków w Karpatach Wschodnich stanowi złożone zagadnienie, które wymaga uwzględnienia zarówno czynników środowiskowych, jak i antropogenicznych. W literaturze przedmiotu wykorzystuje się głównie modele agentowe (ABM, ang. Agent-Based Model), które pozwalają na realistyczne odwzorowanie dynamiki populacji poprzez symulację indywidualnych decyzji i interakcji między osobnikami.

W pracy *"An individual-based model for predicting dynamics of a newly established mexican wolf population"* [1] opisano zastosowanie ABM do prognozowania dynamiki populacji wilka meksykańskiego. Model uwzględniał wpływ strategii zarządzania i warunków środowiskowych, co podkreśla kluczowe znaczenie takich podejść dla reintrodukcji i wzrostu populacji. Praca ta stanowi inspirację do zastosowania podobnych metod w badaniach nad wilkiem szarym w Karpatach Polskich.

Z kolei DeAngelis i Diaz [2] podkreślili znaczenie integracji procesów decyzyjnych w modelach agentowych. Ich praca ukazuje, że uwzględnienie indywidualnych różnic behawioralnych może znacząco poprawić dokładność symulacji, co jest istotne w kontekście modelowania interakcji między watahami i środowiskiem.

Obie prace dostarczają teoretycznych podstaw do opracowania modelu, który pozwoli na szczegółową analizę dynamiki populacji wilków w Karpatach oraz ocenę wpływu różnych strategii zarządzania na ich liczebność.

3. DANE PORÓWNAWCZE

W celu walidacji naszego modelu wykorzystano dane referencyjne dotyczące liczebności wilków w Karpatach, pozyskane z dostępnej literatury i raportów ekologicznych. Dane te zostały odpowiednio przeskalowane, aby odzwierciedlały populację wilków w polskiej części Karpat Wschodnich, która obejmuje około połowy całkowitego obszaru Karpat.

Przykładowo, dostępne raporty wskazują, że w roku 2000 na terenie całych Karpat znajdowało się około 200 wilków, a w roku 2001 liczba ta wzrosła do 250. Na potrzeby naszego modelu oszacowano, że w polskiej części Karpat Wschodnich liczebność wynosiła połowę tych wartości, tj. odpowiednio 100 wilków w 2000 roku i 125 wilków w 2001 roku.

Decyzja na wykorzystanie szacunkowych danych wynikała z ograniczonej dostępności informacji o liczbie wilków na tym terenie w badanych latach. Brak systematycznych badań, różnice w metodologii zbierania danych, a także fakt, że wilki przemieszczają się między różnymi obszarami, sprawiają, że precyzyjne oszacowanie liczebności w poszczególnych latach jest wyzwaniem. Mimo to, dostępne dane szacunkowe stanowią wartościowy punkt odniesienia dla kalibracji i walidacji naszego modelu oraz pozwalają na porównanie wyników symulacji z rzeczywistymi trendami populacyjnymi.

4. MODEL FORMALNY

4.1 Model matematyczny i model agentowy

4.1.1 Obliczanie rocznych zmian populacji

W celu odwzorowania dynamiki historycznej populacji, roczne zmiany liczby osobników oblicza się jako różnicę populacji w kolejnych latach, znormalizowaną przez różnicę czasu:

$$\Delta P_{\text{roczne}} = \frac{P_k - P_p}{t_k - t_p}, \quad \text{dla } t_p, t_k \in \text{danych historycznych} \quad (4.1)$$

gdzie:

- P_p i P_k – populacja początkowa i końcowa dla danego okresu,
- t_p i t_k – rok początkowy i końcowy danego okresu.

Dla każdego roku w danym przedziale czasowym zakłada się stałą zmianę roczną, którą model zaokrągla do liczby całkowitej. Populacja w kolejnych latach jest obliczana na podstawie wcześniej wyznaczonych zmian rocznych:

$$P(t+1) = P(t) + \Delta P_{\text{roczne}} \quad (4.2)$$

gdzie:

- $P(t)$ – populacja w roku t ,
- ΔP_{roczne} – roczna zmiana populacji dla danego przedziału czasowego.

4.1.2 Prognozowanie przyszłej populacji

Dla lat poza zakresem danych historycznych populacja jest prognozowana przy użyciu równania logistycznego:

$$P(t+1) = P(t) + r \cdot P(t) \cdot \left(1 - \frac{P(t)}{K}\right) \quad (4.3)$$

gdzie:

- $P(t)$ – populacja w roku t ,
- r – tempo wzrostu populacji obliczone na podstawie danych historycznych,
- K – pojemność środowiska (maksymalna liczba osobników, którą ekosystem może utrzymać, tutaj $K = 150$).

Model logistyczny uwzględnia ograniczenia środowiskowe, które spowalniają wzrost populacji w miarę zbliżania się do K .

4.1.3 Aktualizacja populacji

Podczas symulacji model oblicza różnicę (Δ) między prognozowaną liczbą wilków a aktualną populacją w modelu:

$$\Delta = P_{\text{prog}} - P_{\text{aktualna}} \quad (4.4)$$

Delta jest rozkładana pomiędzy istniejące watahy w modelu w formie narodzin lub śmierci wilków.

Każda wataha reprezentowana jest jako niezależny agent, który porusza się po dwuwymiarowej siatce oraz zmienia swoją liczebność na podstawie wyników modelu matematycznego populacji. Jeśli liczba wilków w danej grupie przekracza 10, następuje podział watahy na dwóch niezależnych agentów.

Wykorzystane modele umożliwiają odwzorowanie złożonej dynamiki przestrzennej i demograficznej watah wilków, a także symulowanie zarówno zmian wynikających z historycznych trendów, jak i prognozowanie przyszłej dynamiki populacji wilków w realistycznych warunkach środowiskowych.

4.2 Dyskretyzacja i kroki czasowe

W modelu dyskretnym czas jest podzielony na kroki, z których każdy odpowiada jednemu lub dwóm tygodniom lub całemu miesiącowi w zależności od wyboru użytkownika. Taki podział umożliwia szczegółową analizę dynamiki populacji wilka w kolejnych momentach czasowych oraz monitorowanie zmian liczebności i rozmieszczenia watah na siatce przestrzennej. W każdym kroku czasowym obliczane są:

1. Zmiany liczebności watahy:

- W tygodniach przypadających na wiosnę (kwiecień-maj) model oblicza liczbę nowo narodzonych osobników na podstawie liczebności watahy i wskaźnika rozrodu. W zimowych miesiącach (listopad-luty) uwzględniana jest zwiększona śmiertelność, wynikająca z trudnych warunków środowiskowych.

2. Migracja watah:

- Wilki mogą przemieszczać się do sąsiednich elementów siatki w poszukiwaniu lepszych warunków (np. większej dostępności zasobów lub mniejszego zagęszczenia watah). Przemieszczenia są obliczane w każdym kroku czasowym, w oparciu o lokalne warunki środowiskowe.

3. Aktualizacja liczebności:

- Po uwzględnieniu rozrodu, śmiertelności i aktualnej pozycji na siatce liczebność każdej watahy jest aktualizowana, z uwzględnieniem ograniczeń środowiskowych. Jeśli liczba osobników przekracza 10, dzielą się one wtedy na dwie niezależne watahy.

4.3 Ogólny opis aplikacji

Aplikacja została zaprojektowana z myślą o analizie i wizualizacji dynamiki populacji wilka szarego. Umożliwia ona symulację zmian liczebności i rozmieszczenia watah wilków w czasie, w oparciu o wprowadzone parametry środowiskowe oraz dane historyczne.

Funkcje aplikacji:

- Konfiguracja parametrów symulacji: Użytkownik będzie mógł dostosować takie parametry, jak współczynniki rozrodu czy śmiertelności, myślistwo oraz dostępność pożywienia.

- **Symulacja dynamiki populacji:** Model populacji będzie iteracyjnie obliczał liczebność watah, uwzględniając procesy ekologiczne, takie jak rozród, śmiertelność i migracja, w zadanym zakresie czasowym (od 2000 roku).
- **Wizualizacja wyników:** Wyniki symulacji będą przedstawiane w formie mapy pokazującej rozmieszczenie watah na siatce przestrzennej. Dodatkowo, obok mapy można będzie obserwować liczbę odpowiadającą całkowitej liczebności populacji w danym okresie.

4.4 Obliczenia symulacyjne i wizualizacja wyników

Główna logika symulacyjna została zaimplementowana w module backendowym, który obsługuje obliczenia związane z dynamiką populacji wilków oraz interakcją agentów w modelu środowiskowym. Użytkownik wprowadza parametry symulacji za pośrednictwem interfejsu graficznego, a backend przetwarza te dane w celu przeprowadzenia symulacji oraz generowania wizualizacji.

Po zakończeniu obliczeń wyniki symulacji są przekazywane do modułu wizualizacji, który umożliwia prezentację danych w czytelny i interaktywny sposób. Moduł wizualizacyjny został zaimplementowany przy użyciu biblioteki Pygame, co umożliwia dynamiczne rysowanie siatki środowiska oraz agentów w formie ikon graficznych. Poszczególne elementy wizualizacji obejmują:

- **Siatkę środowiska:** Dwuwymiarowa siatka, na której przedstawiane są pozycje watah.
- **Ikony watah:** Watahy wilków są reprezentowane przez skalowane grafiki, co ułatwia identyfikację ich lokalizacji.
- **Liczebność watah:** Obok każdej ikony wyświetlana jest liczba wilków w danej watasze.

Dzięki intuicyjnemu interfejsowi użytkownik ma możliwość:

- Dostosowania parametrów symulacji, takich jak np. dostęp do pożywienia czy współczynnik rozrodu,
- Wyboru zakresu kroków symulacji oraz regulowania jej prędkości,
- Obserwowania w czasie rzeczywistym zmian pozycji watah na siatce oraz analizowania dynamiki populacji.

5. REALIZACJA PRAKTYCZNA

5.1 Założenia projektowe

Projekt opiera się na określonych wymaganiach i założeniach obejmujących zarówno ograniczenia techniczne, jak i specyfikę analizowanego problemu.

1. Obszar analizy

- Symulacja dotyczy wyłącznie wilków w polskiej części Karpat Wschodnich.
- Populacja wilków na tym obszarze jest szacunkowa, a dane wejściowe opierają się na skalowaniu danych dla całych Karpat.

2. Zakres czasowy

- Symulacja obejmuje głównie lata 2000–2020, przy czym model może przewidywać również przyszłe lata w oparciu o zebrane dane i założenia modelu logistycznego.

3. Modelowanie agentowe

- Każda wataha wilków jest modelowana jako odrębny agent poruszający się po siatce, podejmujący decyzje w oparciu o warunki środowiskowe i interakcje z innymi watahami.

4. Warunki środowiskowe

- Symulacja uwzględnia ograniczenia dostępności pożywienia oraz wpływ interakcji między watahami a siedliskami jeleni.
- Rozmiar siatki oraz liczba kroków symulacji w roku mogą być zmieniane w zależności od potrzeb analizy.

5. Założenia dotyczące populacji

- Maksymalna liczba wilków w symulowanym regionie została ograniczona do 150, co odzwierciedla naturalne limity środowiskowe.
- Wzrost i spadek populacji są determinowane przez czynniki takie jak wskaźniki urodzeń, śmiertelności, dostępność pożywienia oraz polowania.

6. Ograniczenia techniczne

- Dane wejściowe dotyczące początkowej liczby wilków i ich rozmieszczenia na siatce są ustalone w kodzie i nie uwzględniają pełnej zmienności rzeczywistych danych środowiskowych.

7. Ograniczenia modelu

- Model nie rozróżnia indywidualnych wilków w watachach, analizując jedynie ich łączną liczebność.
- Wpływ czynników klimatycznych i katastrof naturalnych nie jest brany pod uwagę.

5.2 Oprogramowanie

W projekcie wykorzystano następujące oprogramowanie i biblioteki:

- **Python** – główny język programowania projektu.
- **PyQt5** – do tworzenia graficznego interfejsu użytkownika.
- **pygame** – do wizualizacji symulacji, w tym siatek, ikon wilków i siedlisk jeleni.
- **math, numpy, random** – do obliczeń matematycznych, losowości i operacji numerycznych.
- **threading** – do obsługi wielowątkowości w symulacji.

Zastosowanie tych narzędzi pozwoliło na stworzenie funkcjonalnej symulacji wraz z dynamiczną wizualizacją.

6. REZULTATY SYMULACJI

W celu oceny modelu przeprowadzono symulacje w kilku różnych scenariuszach, porównując wyniki modelu z oszacowanymi danymi dla wybranych lat. Wyniki przedstawiono w tabeli (Tab. 6.1) zawierającej następujące informacje:

- *year* - Wybrane lata, dla których dostępne są oszacowane dane populacji wilków.
- *original* - Szacunkowe dane dla tych lat używane w modelu matematycznym.
- *total* - Wyniki trzech symulacji przeprowadzonych przy standardowych parametrach, odzwierciedlających rzeczywiste warunki.
- *dr:150* - Wyniki trzech symulacji z wartością wskaźnika śmiertelności (*death rate*) ustawioną na 150%, symulujące zwiększoną śmiertelność w populacji wilków.
- *dr:50* - Wyniki trzech symulacji z wartością wskaźnika śmiertelności (*death rate*) ustawioną na 50%, symulujące obniżoną śmiertelność w populacji wilków.

Tabela 6.1: Wyniki eksperymentalne dla trzech scenariuszy symulacji.

<i>year</i>	<i>original</i>	<i>total</i>	<i>dr : 150</i>	<i>dr : 50</i>
2001	125	126, 125, 132	106, 105, 111	131, 140, 138
2002	150	162, 150, 150	135, 132, 140	150, 150, 151
2005	108	112, 111, 110	103, 108, 101	114, 119, 115
2007	102	102, 103, 105	99, 99, 95	114, 111, 109
2010	104	105, 105, 105	99, 99, 95	117, 115, 117

7. DYSKUSJA WYNIKÓW

Wyniki symulacji wskazują, że opracowany model w znacznym stopniu odzwierciedla dynamikę populacji wilków w badanym obszarze Karpat Polskich w latach 2000–2020. Uzyskane rezultaty w scenariuszach przy standardowych parametrach są zbieżne z oszacowanymi danymi, co potwierdza poprawność zastosowanego podejścia.

Odchylenia obserwowane w wynikach symulacji wynikają z wprowadzenia elementów losowości w modelu. Liczba narodzin wilków czy wpływ myślistwa są wyliczane na podstawie realistycznych zakresów, ale ostateczna wartość jest losowana w każdym kroku, co wprowadza pewną zmienność.

Analiza scenariuszy z podwyższonym i obniżonym wskaźnikiem śmiertelności (*death rate*) ukazuje, jak istotne są zmiany parametrów środowiskowych i zarządzania dla dynamiki populacji. Zwiększona śmiertelność prowadzi do zauważalnych spadków liczebności, podczas gdy obniżona pozwala populacji na stabilny wzrost.

Wnioskiem z przeprowadzonych badań jest potwierdzenie, że model w dużym stopniu odwzorowuje rzeczywiste zjawisko, a wprowadzone uproszczenia oraz losowość parametrów są akceptowalne i oddają naturalną zmienność środowiskową. Dalsze modyfikacje modelu mogą zmierzać w kierunku bardziej precyzyjnego uwzględnienia interakcji między watahami oraz środowiskowych ograniczeń.

8. PODSUMOWANIE

Projekt miał na celu stworzenie symulacji dynamiki populacji wilków w wybranej części Karpat Polskich w latach 2000–2020, bazując na podejściu agentowym i modelu matematycznym. Dzięki opracowanemu modelowi udało się uzyskać realistyczne wyniki, które w znacznym stopniu pokrywają się z oszacowanymi danymi referencyjnymi. Wprowadzenie elastycznych parametrów, takich jak wskaźnik śmiertelności czy dostępność pożywienia, pozwoliło na analizę wpływu różnych czynników środowiskowych i zarządzania na dynamikę populacji.

W trakcie realizacji projektu napotkano jednak wyzwania związane z trudnym dostępem do danych referencyjnych dla badanej lokalizacji i okresu. Problem ten rozwiązano poprzez szacowanie danych na podstawie dostępnych informacji z większego obszaru. Kolejną trudnością było zapewnienie odpowiedniego balansu między realizmem a wydajnością symulacji, co osiągnięto poprzez wprowadzenie elementów losowości, takich jak liczba narodzin czy wpływ myślistwa.

Stworzony model, mimo swoich zalet, ma również ograniczenia. Elementy losowości w niektórych przypadkach mogą prowadzić do większych odchyłeń od danych referencyjnych, co może być rozważone w przyszłych pracach. Dodatkowo, interakcje między watahami i wpływ bardziej złożonych czynników środowiskowych nie zostały w pełni uwzględnione, co otwiera możliwości dla dalszego rozwoju modelu.

Efektem praktycznym projektu jest narzędzie symulacyjne, które pozwala na analizę populacji wilków w zmieniających się warunkach środowiskowych. W przyszłości model mógłby zostać rozszerzony o lepsze odwzorowanie migracji wilków, większą interaktywność użytkownika czy integrację z rzeczywistymi danymi pozyskiwanymi w czasie rzeczywistym. Dalsze badania mogłyby również skupić się na analizie długoterminowych scenariuszy, takich jak wpływ zmian klimatycznych czy zarządzania populacją na skalę międzynarodową.

Bibliografia

- [1] J. V. Gedir and J. W. C. III, “An individual-based model for predicting dynamics of a newly established mexican wolf (*canis lupus baileyi*) population — final report,” *U.S. Geological Survey*, pp. 5–14, 2018.
- [2] D. L. DeAngelis and S. G. Diaz, “Decision-making in agent-based modeling: A current review and future prospectus,” *Frontiers in Ecology and Evolution*, vol. 6, 2018.