

# Modelowanie procesów ewolucyjnych za pomocą automatów komórkowych

Gabriel Kaszewski

## 1. Streszczenie

Chciałem napisać symulację ewolucji populacji ofiar w środowisku; symulację zainspirowanymi automatami komórkowymi poprzez prostotę zasad, które prowadzą do złożonych zachowań. W pracy wykorzystałem język **Rust** z biblioteką **Bevy** do napisania symulacji oraz **Python** z pakietem bibliotek do analizy danych do wizualizacji wyników. Wynikiem pracy jest program, który symuluje ewolucję ofiar, użytkownik może wprowadzić różne parametry, które wpływają na zachowanie ewolucji i obserwować jak zmieniają się populacje ofiar w zależności od tych parametrów.

## 2. Wprowadzenie

Celem pracy jest zbadanie możliwości modelowania procesów ewolucyjnych przy wykorzystaniu automatów komórkowych i **Entity Component System**, który w dalszej części pracy będzie przedstawiany jako **ECS**. Praca ma na celu nie tylko pogłębienie teoretycznych podstaw modelowania ewolucji przy użyciu dyskretnych metod obliczeniowych, ale także popularyzację nowoczesnych technik programistycznych.

Symulację napisałem w języku Rust z wykorzystaniem biblioteki **Bevy**, która jest oparta na **ECS** i dostarcza wszystkie potrzebne komponenty do stworzenia projektu multimedialnego. Do wizualizacji danych użyłem języka **Python** z całym pakietem bibliotek do analizy danych takich jak **NumPy**, **Matplotlib**, **Pandas**.

## 3. Entity Component System

### 3.1. Wstęp

**ECS** to współczesna architektura oprogramowania stosowana głównie w grach komputerowych oraz symulacjach. Umożliwia ona elastyczne i wydajne zarządzanie złożonymi systemami. Główną ideą **ECS** jest oddzielenie danych (komponentów) od logiki (systemów) oraz traktowanie encji jako jedynie identyfikatorów, co pozwala na łatwiejsze skalowanie, modyfikację oraz optymalizację (np. w kontekście wielowątkowości). W tym rozdziale postaram się przybliżyć podstawowe pojęcia związane z **ECS** jego strukturę oraz zalety.

### 3.2. Encje

**Encje** (ang. *entities*) stanowią podstawowy element **ECS**. Są one reprezentowane najczęściej jako unikalne identyfikatory (np. liczby całkowite) i same w sobie nie zawierają żadnych danych, ani elementów logicznych. Encje są “nosicielami” komponentów, które definiują ich właściwości. Dzięki temu, encje zajmują mało miejsca w pamięci, a zarządzanie nimi - np. tworzenie, usuwanie czy modyfikacja - odbywa się w sposób efektywny, ponieważ nie wymaga to przeszukiwania złożonych struktur danych.

### 3.3. Komponenty

**Komponenty** (ang. *components*) to struktury danych, które zawierają właściwości lub stany encji. Każdy komponent jest dedykowany określonej właściwości obiektu, np. pozycji, prędkości czy “zdrowiu”. W **ECS** komponenty nie zawierają żadnej logiki, są one jedynie kontenerami na dane. Z racji tego, że ich główną rolą jest przechowywanie informacji, są one zazwyczaj proste i niezależne od siebie. Co więcej, komponenty powinny być rozdzielane na mniejsze, wyspecjalizowane jednostki. Dzięki temu systemy mogą operować na dokładnie tych danych, które są im potrzebne, co sprzyja modularności i łatwości wprowadzaniu zmian, a przez to wydajności.

### 3.4. Systemy

**Systemy** (ang. *systems*) to moduły odpowiedzialne za logikę działania symulacji albo gry. Operują one na zbiorach encji, które posiadają określone komponenty. Przykładowo, system odpowiedzialny za ruch będzie aktualizował pozycje encji, które posiadają komponent *Pozycja* oraz *Prędkość*. Systemy wykonują swoje operacje cyklicznie (np. w każdej klatce gry) i mogą być projektowane tak, aby działały niezależnie od siebie.

### 3.5. Świat

**Świat** w kontekście **ECS** to kontener, który przechowuje wszystkie encje, komponenty i systemy danego projektu. Stanowi centralny punkt, za pomocą którego systemy mogą uzyskać dostęp do danych i komunikować się między sobą.

### 3.6. Zalety Entity Component System

Architektura **ECS** posiada szereg korzyści:

- **Modularność:** Oddzielenie danych od logiki umożliwia łatwe modyfikowanie i rozszerzanie funkcjonalności bez wpływu na całą strukturę aplikacji.
- **Wydajność:** Komponenty są przechowywane w pamięci w sposób ciągły, co sprzyja lokalności danych i pozwala na efektywne operacje na nich, ponieważ procesor o wiele szybciej uzyska dostęp do danych, które znajdują się w tzw. *cache'u* niż z pamięci RAM.
- **Elastyczność:** Można łatwo dodawać lub usuwać funkcjonalności przez modyfikację lub dodanie nowych komponentów i systemów.
- **Skalowalność:** **ECS** doskonale nadaje się do obsługi dużej liczby encji, co jest szczególnie ważne w symulacjach oraz grach z wieloma interaktywnymi obiektami.
- **Łatwość debugowania i testowania:** Dzięki modułowej budowie, testowanie i debugowanie poszczególnych komponentów i systemów jest znacznie prostsze.

### 3.7. Wielowątkowość w Entity Component System

Jednym z kluczowych atutów **ECS** jest możliwość łatwego wykorzystania wielowątkowości. Dzięki wyraźnemu oddzieleniu systemów, które operują na niepowiązanych zestawach komponentów, można równolegle przetwarzanie danych w różnych wątkach. To podejście nie tylko zwiększa wydajność symulacji, ale także pozwala na lepsze wykorzystanie współczesnych procesorów wielordzeniowych. W praktyce oznacza to, że systemy nie muszą blokować siebie nawzajem, co znacznie poprawia skalowalność i responsywność aplikacji.

### 3.8. Podsumowanie

**ECS** to nowoczesne podejście do projektowania systemów, które wyróżnia się modularnością, wydajnością i elastycznością. Dzięki oddzieleniu encji, komponentów i systemów możliwe jest tworzenie skomplikowanych symulacji oraz gier w sposób przejrzysty i łatwy do skalowania. Dodatkową zaletą jest możliwość równoległego przetwarzania, co jest kluczowe w aplikacjach wymagających wysokiej wydajności. **ECS** stanowi doskonałą bazę do implementacji symulatorów oraz innych systemów, w których liczy się szybkie przetwarzanie dużej liczby obiektów, co czyni go idealnym narzędziem w kontekście bioinformatyki i modelowania ewolucyjnego.

## 4. Automaty komórkowe

### 4.1. Wstęp

**Automaty komórkowe** (ang. *cellular automata*) to dyskretnie modele obliczeniowe, w których przestrzeń symulacji dzielona jest na regularną siatkę komórek. Każda komórka może znajdować się w jednym, ze stanów, które należą do zbioru dyskretnego i ograniczonego, a jej ewolucja odbywa się według ustalonych reguł, zależnych od stanów sąsiadujących komórek. Metoda ta umożliwia badanie złożonych układów i procesów dynamicznych przy wykorzystaniu prostych reguł lokalnych, co czyni automaty komórkowe atrakcyjnym narzędziem w symulacjach biologicznych, fizycznych oraz społecznych.

Pierwsze idee dotyczące automatów komórkowych pojawiły się już w latach 40. XX wieku, gdy John von Neumann i Stanisław Ulam badali samoreplikujące się układy. Jednak prawdziwy rozwój tej dziedziny nastąpił w kolejnych dekadach, kiedy to naukowcy zaczęli systematycznie wykorzystywać te modele do badania dynamiki złożonych układów. Jednym z przełomowych momentów była publikacja *gry w życie* (ang. *Game of Life*) autorstwa Johna Conwayego w 1970 roku, która stała się symbolem możliwości generowania złożonych struktur przy użyciu bardzo prostych zasad [1]. W latach 80. i 90. automaty komórkowe znalazły szerokie zastosowanie w badaniach nad zjawiskami samoorganizacji oraz samoorganizującej się krytyczności (ang. *Self-Organized Criticality*) [2], czyli zdolności układów dynamicznych do spontanicznego przechodzenia w stan krytyczny. Stały się również inspiracją dla badań nad sztucznym życiem, modelując emergentne zachowania przypominające procesy biologiczne [3].

## 4.2. Definicja

Automat komórkowy definiuje się jako system składający się z trzech podstawowych elementów:

- **Siatka komórek:** Przestrzeń, w której każda komórka ma określoną pozycję (np. w układzie regularnym, takim jak kwadratowa lub heksagonalna siatka).
- **Zbiór stanów:** Dyskretny zbiór wartości, które mogą przyjmować poszczególne komórki (np. 0 lub 1, kolor, liczba, itp.).
- **Reguły przejścia:** Zbiór zasad, według których stan każdej komórki jest aktualizowany w kolejnych krokach czasowych, zależnie od stanów sąsiadów. Aktualizacja zwykle odbywa się synchronicznie dla wszystkich komórek.

Takie podejście umożliwia analizę, jak proste reguły lokalne mogą prowadzić do powstawania skomplikowanych, globalnych wzorców i struktur. [4]

## 4.3. Przykłady

Najbardziej znany przykładem automatu komórkowego jest gra w życie Johna Conwayego [1], w której proste zasady dotyczące narodzin, przetrwania i śmierci komórek prowadzą do złożonych, często nieprzewidywalnych zachowań. Inne przykłady obejmują:

- **Elementarne automaty komórkowe:** Badane przez Stephena Wolframa, gdzie komórki mają tylko dwa stany, a reguły są określone na podstawie stanu sąsiadów w jednym wymiarze. Przykłady takich reguł to reguła 30 czy reguła 110 [5].
- **Automaty oparte o inne struktury siatek:** Automaty działające na siatkach heksagonalnych lub trójwymiarowych, które mogą lepiej modelować niektóre procesy naturalne.
- **Specjalistyczne modele:** Automaty komórkowe stosowane w modelowaniu wzrostu tkanek, rozprzestrzeniania się epidemii czy dynamiki ruchu tłumu. [6], [7]

Te przykłady pokazują, że automaty komórkowe są niezwykle wszechstronnym narzędziem, które znalazło zastosowanie zarówno w teorii, jak i w praktycznych zastosowaniach.

## 5. Mój model

Zainspirowany automatami komórkowymi postanowiłem zrobić symulację ewolucji populacji ofiar.

Plansza, bądź świat w którym odbywa się symulacja jest dwuwymiarową siatką, gdzie każdy kafelek może być jednym z czterech rodzajów: woda, las, pustynia i trawa. Każdy typ terenu ma swoje własne właściwości jak np. **dostępność pożywienia, prędkość odnowy pożywienia**, jak szybko i chętnie ofiary poruszają się po nim.

W mojej symulacji mam dwa rodzaje ofiar: bierne i drapieżniki. Bierne ofiary dostają energię z jedzenia, które jest na danym kafelku. Drapieżnicy z kolei dostają energię z jedzenia biernych ofiar. Każda ofiara ma swoje cechy jak **energia, prędkość, rozmiar, próg rozmnażania, tolerancja terenu**, drapieżnicy mają dodatkowo **wydajność polowania i próg głodu**.

Ofiara i drapieżnik potrzebuje energii, by żyć. Jeśli zabraknie tego zasobu, jednostka ginie. Natomiast, jeśli ofiara przekroczy próg rozmnażania, to tworzy nową jednostkę. Co krok czasowy każda jednostka

zużywa energię, co więcej im większa bądź szybsza jednostka, tym więcej energii zużywa. Drapieżniki polują na ofiary, gdy ich energia spadnie poniżej progu głodu. Celem drapieżnika jest najbliższa ofiara. Każdy drapieżnik ma zasięg polowania, który wynosi jedną komórkę. Wydajność polowania wpływa na to ile energii drapieżnik dostanie z jedzenia.

W sytuacji, gdy na jednej komórce znajduje się więcej niż jedna ofiara, to pozywienie dostaje w pierwszej kolejności ofiara, która jest największa. Ilość uzyskanej energii z jedzenia również zależy od rodzaju terenu, na którym znajduje się ofiara i jego przystosowania do tego terenu. Natomiast jeśli na jednej komórce znajduje się więcej ofiar, bądź drapieżników niż ustalony limit to nadwyżka ginie z powodu przeludnienia.

Podczas rozmnażania ofiara dziedziczy cechy rodzica, ale również może wystąpić mutacja cech. Mutacja polega na zmianie cechy o losowa wartość z przedziału, który zależy od mutacji. Dziecko zaczyna z połową energii rodzica. Takie same zachowanie rozmnażania i mutacji występuje u drapieżników.

## 5.1. Implementacja

Kod źródłowy jest podzielony na dwie części: symulacja napisana w języku **Rust** z wykorzystaniem biblioteki **Bevy** oraz wizualizacja wyników w języku **Python** z wykorzystaniem bibliotek **Matplotlib**, **NumPy** i **Pandas**.

Zacznę od prezentacji kodu symulacji i jego objaśnienia.

## 5.2. Symulacja

```
use std::error::Error;
use std::fmt::Display;
use std::fs;
use std::fs::File;
use std::fs::OpenOptions;
use std::io::Write;

use bevy::prelude::*;
use bevy::utils::hashbrown::HashMap;
use noise::NoiseFn;
use noise::Perlin;
use rand::prelude::*;
use serde::Deserialize;
use serde::Serialize;
```

Listing 1: Importy

W listingu 1 przedstawione są importy, które są potrzebne do napisania symulacji. W symulacji wykorzystuję kilka bibliotek z biblioteki standardowej języka **Rust**, takich jak `std::error::Error` do obsługi błędów, `std::fs` do operacji na plikach, `std::io::Write` do zapisywania danych do pliku. Wykorzystuję również bibliotekę `bevy` do tworzenia gry, `noise` do generowania szumu, który później wykorzystuję do stworzenia planszy, która w miarę przypomina rzeczywisty świat, `rand` do generowania liczb losowych oraz `serde` do serializacji i deserializacji danych, które później wykorzystuję do wizualizacji wyników w języku **Python**.

```

#[derive(Deserialize, Debug, Serialize, Clone)]
struct BiomeDataConfig {
    food_availability: f32,
    max_food_availability: f32,
}

#[derive(Deserialize, Debug, Resource, Serialize, Clone)]
pub struct Config {
    width: usize,
    height: usize,
    initial_organisms: usize,
    initial_predators: usize,
    headless: bool,
    log_data: bool,
    forest: BiomeDataConfig,
    desert: BiomeDataConfig,
    water: BiomeDataConfig,
    grassland: BiomeDataConfig,
    initial_organism_energy: f32,
    initial_predator_energy: f32,
    initial_organism_speed: f32,
    initial_predator_speed: f32,
    initial_organism_size: f32,
    initial_predator_size: f32,
    initial_organism_reproduction_threshold: f32,
    initial_predator_reproduction_threshold: f32,
    initial_predator_hunting_efficiency: f32,
    initial_predator_satiation_threshold: f32,
    organism_mutability: f32,
    predator_mutability: f32,
    overcrowding_threshold_for_organisms: usize,
    overcrowding_threshold_for_predators: usize,
    max_total_entities: usize,
    seed: u64,
}

```

Listing 2: Struktury konfiguracyjne

W listingu 2 przedstawione są struktury konfiguracyjne, które są wykorzystywane do konfiguracji symulacji. Struktura `BiomeDataConfig` przechowuje informacje o dostępności pożywienia na danym terenie oraz maksymalnej dostępności pożywienia. Struktura `Config` przechowuje informacje o szerokości i wysokości planszy, liczbie początkowych ofiar i drapieżników, czy symulacja ma być uruchomiona w trybie bez okna, czy dane mają być zapisywane do pliku, a także parametry początkowe dla ofiar i drapieżników, takie jak *energia*, *prędkość*, *rozmiar*, *próg rozmnażania*, *wydajność polowania*, *próg głodu*, *mutowalność cech*, *próg przeludnienia* oraz *ziarno generatora liczb losowych*. Struktura ta jest serializowana i deserializowana za pomocą biblioteki `serde` oraz jest dostępna jako zasób w **Bevity**, co powoduje, że jest dostępna dla każdego systemu.

Ziarno jest potrzebne, by symulacja była deterministyczna, a dane były zawsze takie same, co jest ważne przy testowaniu i reprodukowaniu wyników. Plik konfiguracyjny jest w formacie **TOML** i wygląda następująco:

```

width = 100
height = 100
initial_organisms = 5
initial_predators = 2
headless = false
log_data = true
initial_organism_energy = 3.0
initial_predator_energy = 15.0
initial_organism_speed = 1.0
initial_predator_speed = 1.5

```

```
initial_organism_size = 1.2
initial_predator_size = 1.0
initial_organism_reproduction_threshold = 5.0
initial_predator_reproduction_threshold = 16.0
initial_predator_hunting_efficiency = 1.5
initial_predator_satiation_threshold = 14.0
organism_mutability = 0.1
predator_mutability = 0.05
overcrowding_threshold_for_organisms = 25
overcrowding_threshold_for_predators = 10
seed = 420692137
max_total_entities = 10000

[forest]
food_availability = 0.2
max_food_availability = 2600.0
temperature = 20.0
humidity = 0.6

[desert]
food_availability = 0.01
max_food_availability = 300.0
temperature = 35.0
humidity = 0.1

[water]
food_availability = 0.0
max_food_availability = 0.0
temperature = 15.0
humidity = 0.9

[grassland]
food_availability = 0.1
max_food_availability = 1500.0
temperature = 25.0
humidity = 0.4
```

Dzięki temu, że symulacja wczytuje plik konfiguracyjny, można łatwo zmieniać parametry symulacji bez konieczności zmiany kodu źródłowego i ponownej komplikacji programu.

```

#[derive(Debug, Clone, PartialEq, Eq, Hash, Serialize, Copy)]
pub enum Biome {
    Forest,
    Desert,
    Water,
    Grassland,
}

#[derive(Debug, Clone, Serialize)]
pub struct Tile {
    pub biome: Biome,
    pub temperature: f32,
    pub humidity: f32,
    pub food_availabilty: f32,
}

#[derive(Debug, Resource, Serialize, Clone)]
pub struct World {
    pub width: usize,
    pub height: usize,
    pub grid: Vec<Vec<Tile>>,
}

```

Listing 3: Struktury reprezentujące świat

W listingu 3 przedstawione są struktury reprezentujące świat, w którym odbywa się symulacja. Enum `Biome` reprezentuje rodzaje terenów, które mogą występować na planszy, takie jak las, pustynia, woda, łąka. Struktura `Tile` reprezentuje pojedynczy kafelek na planszy i przechowuje informacje o rodzaju terenu, temperaturze, wilgotności oraz dostępności pożywienia. Struktura `World` przechowuje informacje o szerokości i wysokości planszy oraz dwuwymiarową tablicę kafelków. `World` jest zasobem w **Bevy**, co oznacza, że jest dostępny dla wszystkich systemów, podobnie jak `Config`.

```

impl Display for Biome {
    fn fmt(&self, f: &mut std::fmt::Formatter<'_>) -> std::fmt::Result {
        match self {
            Biome::Forest => write!(f, "Forest"),
            Biome::Desert => write!(f, "Desert"),
            Biome::Water => write!(f, "Water"),
            Biome::Grassland => write!(f, "Grassland"),
        }
    }
}

impl Tile {
    pub fn regenerate_food(&mut self, config: &Config) {
        match self.biome {
            Biome::Forest => {
                if self.food_availability > config.forest.max_food_availability {
                    return;
                }

                self.food_availability += config.forest.food_availability;
            }
            Biome::Desert => {
                if self.food_availability > config.desert.max_food_availability {
                    return;
                }

                self.food_availability += config.desert.food_availability;
            }
            Biome::Grassland => {
                if self.food_availability > config.grassland.max_food_availability {
                    return;
                }

                self.food_availability += config.grassland.food_availability;
            }
            _ => {}
        }
    }
}

```

Listing 4: Implementacje metod dla struktur Biome i Tile

```

impl World {
    pub fn new(width: usize, height: usize, random_seed: u64) -> Self {
        let mut rng = StdRng::seed_from_u64(random_seed);
        let seed = rng.gen::<u32>();

        let perlin = Perlin::new(seed);
        let scale = 10.0;

        let mut grid = vec![vec![]; height];
        for y in 0..height {
            for x in 0..width {
                let noise_value = perlin.get([x as f64 / scale, y as f64 / scale]);

                let biome = if noise_value < -0.3 {
                    Biome::Water
                } else if noise_value < -0.1 {
                    Biome::Desert
                } else if noise_value < 0.5 {
                    Biome::Grassland
                } else {
                    Biome::Forest
                };

                grid[y].push(Tile {
                    biome,
                    temperature: 20.0,
                    humidity: 0.5,
                    food_availability: rng.gen_range(1.0..100.0),
                });
            }
        }

        Self {
            width,
            height,
            grid,
        }
    }
}

impl Default for World {
    fn default() -> Self {
        Self::new(10, 10, 0)
    }
}

```

Listing 5: Implementacje metod dla struktury World

W listingach 4 i 5 przedstawione są implementacje metod dla struktur `Biome` i `Tile` oraz `World`. Metoda `Display` dla `Biome` pozwala na wyświetlenie nazwy terenu w bardziej przyjazny dla użytkownika sposób. Metoda `regenerate_food` dla `Tile` pozwala na odnowienie pożywienia na danym kafelku w zależności od rodzaju terenu. Jedzenie nie odnawia się w nieskończoność, jeśli zostanie osiągnięty limit dla danego terenu, żywność nie jest dalej odnawiana. Dla wody nie odnawiam jedzenia, ponieważ w mojej implementacji założyłem, że woda nie jest terenem, na którym mogą żyć jednostki. Metoda `new` dla `World` tworzy nowy świat o podanej szerokości i wysokości, generując teren na podstawie szumu **Perlin'a** z wykorzystaniem ziarna generatora liczb losowych. Metoda `Default` dla `World` tworzy domyślny świat o szerokości 10 i wysokości 10 z ziarem 0. Dzięki wykorzystaniu szumu **Perlin'a** teren jest bardziej naturalny i przypomina rzeczywisty świat, a jaki rodzaj terenu występuje na danym kafelku zależy od wartości szumu. Dla wartości szumu mniejszych niż -0.3 teren jest wodny, dla wartości mniejszych niż -0.1 pustynny, dla wartości mniejszych niż 0.5 łąkowy, a dla pozostałych las.

Dla każdego kafelka generuję również temperaturę, wilgotność oraz dostępność pożywienia, która jest losowa.

```
#[derive(Component, Serialize, Clone)]
pub struct Organism {
    pub energy: f32,
    pub speed: f32,
    pub size: f32,
    pub reproduction_threshold: f32,
    pub biome_tolerance: HashMap<Biome, f32>,
}

#[derive(Component, Serialize, Copy, Clone)]
pub struct Predator {
    pub energy: f32,
    pub speed: f32,
    pub size: f32,
    pub reproduction_threshold: f32,
    pub hunting_efficiency: f32,
    pub satiation_threshold: f32,
}

#[derive(Component, Debug, Serialize, Copy, Clone)]
pub struct Position {
    pub x: usize,
    pub y: usize,
}

#[derive(Component)]
pub struct TileComponent {
    pub biome: Biome,
}
```

Listing 6: Komponenty w symulacji

W listingu 6 przedstawione są struktury reprezentujące jednostki. Struktura `Organism` reprezentuje ofiarę i przechowuje informacje o energii, prędkości, rozmiarze, progu rozmnażania oraz tolerancji terenu. Tolerancja terenu jest mapą, która przechowuje informacje o tolerancji ofiary na dany teren. Struktura `Predator` reprezentuje drapieżnika i przechowuje informacje o energii, prędkości, rozmiarze, progu rozmnażania, wydajności polowania oraz progu głodu. Struktura `Position` przechowuje informacje o pozycji jednostki na planszy. Struktura `TileComponent` przechowuje informacje o rodzaju terenu na danym kafelku. Ten komponent jest wykorzystywany do wyświetlania odpowiedniego koloru kafelka w zależności od rodzaju terenu na planszy. Wszystkie te struktury są **komponentami** w ECS i są dostępne dla systemów.

```
#[derive(Default, Resource, Serialize)]
pub struct Generation(pub usize);

const TILE_SIZE_IN_PIXELS: f32 = 32.0;
```

Listing 7: Zasób przechowujący informacje o generacji oraz stała przechowująca rozmiar kafelka w pikselach

W powyższym listingu przedstawiony jest zasób `Generation`, który przechowuje informacje o aktualnym pokoleniu w symulacji oraz stała `TILE_SIZE_IN_PIXELS`, która przechowuje rozmiar kafelka w pikselach.

```

fn main() {
    let config = get_config();

    println!("{}:", config);

    let headless = config.headless;
    let mut app = App::new();

    match headless {
        true => {
            app.add_plugins(MinimalPlugins);
        }
        false => {
            app.add_plugins(DefaultPlugins);
        }
    }

    app.insert_resource(World::new(config.width, config.height, config.seed))
        .insert_resource(config)
        .insert_resource(Generation(0))
        .add_systems(
            Startup,
            (
                spawn_world,
                spawn_organisms,
                spawn_predators,
                initialize_log_file,
            ),
        )
        .add_systems(Update, hunting)
        .add_systems(
            Update,
            (
                render_organisms,
                render_predators,
                organism_movement,
                predator_movement,
                organism_sync,
                predator_sync,
                despawn_dead_organisms,
                despawn_dead_predators,
                regenerate_food,
                consume_food,
                overcrowding,
                biome_adaptation,
                reproduction,
                predator_reproduction,
                increment_generation,
                log_organism_data,
                log_world_data,
                handle_camera_movement,
            )
            .after(hunting),
        )
        .run();
}

```

Listing 8: Główna funkcja programu

W listingu 8 przedstawiona jest główna funkcja programu, od której zaczyna się wykonywanie kodu. Na samym początku wczytywany jest plik konfiguracyjny i wypisywana jest jego treść do punktu wyjścia. Następnie pobieram z ustawień konfiguracyjnych flagę, która odpowiada za to czy symulacja powinna być uruchomiona w trybie bezokienkowym czy okienkowym. Tworzę zmienną

app, która przechowuje aplikację **Bevy**. W zależności od wartości flagi dodaję odpowiednie wtyczki. Wtyczka `MinimalPlugins` dodaje minimalny zestaw wtyczek, który jest potrzebny do uruchomienia symulacji w trybie bezokienkowym, a wtyczka `DefaultPlugins` dodaje domyślny zestaw wtyczek, który jest potrzebny do uruchomienia symulacji w trybie okienkowym. Następnie wstawiam zasób `World` z nowym światem, któremu przekazuję ustawienia z pliku konfiguracyjnego, zasób `Config` z ustawieniami konfiguracyjnymi, zasób `Generation` z aktualnym pokoleniem oraz dodaję systemy, które mają zostać wykonane w trakcie działania symulacji. Są dwie kategorie systemów `Startup` i `Update`, systemy należące do grupy `Startup` zostaną odpalone tylko raz na początku symulacji, a systemy z grupy `Update` będą wykonywane w każdej klatce gry. Systemy z grupy `Startup` odpowiadają za inicjalizację symulacji oraz potrzebnych plików do zapisywania danych. Systemy z grupy `Update` odpowiadają za aktualizację stanu symulacji, ruch jednostek, polowanie, rozmnażanie, zapisywanie danych, obsługę kamery oraz usuwanie martwych jednostek. Na końcu uruchamiam symulację za pomocą metody `run`. Systemy są wykonywane równolegle, co pozwala na zwiększenie wydajności symulacji. Poza systemem `hunting`, który jest wykonywany przed systemami: `render_organisms`, `render_predators`, `organism_movement`, `predator_movement`, `organism_sync`, `predator_sync`, `despawn_dead_organisms`, `despawn_dead_predators`, `regenerate_food`, `consume_food`, `overcrowding`, `biome_adaptation`, `reproduction`, `predator_reproduction`, `increment_generation`, `log_organism_data`, `log_world_data`, `handle_camera_movement`. Jest to spowodowane tym, że gdy ofiara zostanie zjadzona, to musi zniknąć z planszy, przez co czasami gdy system odpowiedzialny za polowanie się wykonywał to próbował zjeść ofiarę, który już nie istniała i powodowało to błąd krytyczny w programie. W ten sposób unikam tego problemu. Niestety powoduje to, że planer (ang. *scheduler*) musi wykonać więcej pracy i może to wpływać na wydajność symulacji.

```

fn spawn_world(
    mut commands: Commands,
    world: Res<World>,
    mut meshes: ResMut<Assets<Mesh>>,
    mut materials: ResMut<Assets<ColorMaterial>>,
) {
    let tile_size = Vec2::new(TILE_SIZE_IN_PIXELS, TILE_SIZE_IN_PIXELS);

    let shape = meshes.add(Rectangle::new(tile_size.x, tile_size.y));

    for (y, row) in world.grid.iter().enumerate() {
        for (x, tile) in row.iter().enumerate() {
            let color = match tile.biome {
                Biome::Forest => Color::hsl(120.0, 1.0, 0.1),
                Biome::Desert => Color::hsl(60.0, 1.0, 0.5),
                Biome::Water => Color::hsl(240.0, 1.0, 0.5),
                Biome::Grassland => Color::hsl(100.0, 1.0, 0.7),
            };

            commands
                .spawn((Mesh2d(shape.clone()), MeshMaterial2d(materials.add(color))))
                .insert(TileComponent {
                    biome: tile.biome.clone(),
                })
                .insert(Transform {
                    translation: Vec3::new(x as f32 * tile_size.x, y as f32 * tile_size.y, 0.0),
                    ..Default::default()
                });
        }
    }

    let center_x = world.width as f32 * TILE_SIZE_IN_PIXELS / 2.0;
    let center_y = world.height as f32 * TILE_SIZE_IN_PIXELS / 2.0;

    commands.spawn((
        Camera2d::default(),
        Transform::from_xyz(center_x, center_y, 10.0),
    ));
}

```

Listing 9: System tworzący świat

W listingu 9 przedstawiony jest system `spawn_world`, który odpowiada za stworzenie świata na podstawie danych z zasobu `World`. Dla każdego kafelka na planszy tworzony jest odpowiedni kolor w zależności od rodzaju terenu. Następnie tworzony jest kafelek na planszy z odpowiednim kolorem i pozycją. Na końcu tworzona jest kamera, która śledzi planszę. Kamera znajduje się w środku planszy i ma wysokość 10.0 jednostek.

```

fn spawn_organisms(mut commands: Commands, world: Res<World>, config: Res<Config>) {
    let mut rng = StdRng::seed_from_u64(config.seed);
    let organism_count = config.initial_organisms;

    for _ in 0..organism_count {
        let x = rng.gen_range(0..world.width);
        let y = rng.gen_range(0..world.height);

        let tile_biome = &world.grid[y][x].biome;

        let biome_tolerance = get_biome_tolerance(tile_biome, config.seed);

        commands.spawn((
            Organism {
                energy: config.initial_organism_energy,
                speed: config.initial_organism_speed,
                size: config.initial_organism_size,
                reproduction_threshold:
                    config.initial_organism_reproduction_threshold,
                biome_tolerance,
            },
            Position { x, y },
        ));
    }
}

```

Listing 10: System tworzący ofiary

```

fn get_biome_tolerance(tile_biome: &Biome, seed: u64) -> HashMap<Biome, f32> {
    let mut biome_tolerance = HashMap::new();
    let mut rng = StdRng::seed_from_u64(seed);

    for biome in &[Biome::Forest, Biome::Desert, Biome::Water, Biome::Grassland] {
        let tolerance = if *biome == *tile_biome {
            rng.gen_range(1.0..1.5)
        } else {
            rng.gen_range(0.1..0.8)
        };

        biome_tolerance.insert(biome.clone(), tolerance);
    }

    biome_tolerance
}

```

Listing 11: Funkcja generująca tolerancję terenu dla ofiary

Listing 10 przedstawia system `spawn_organisms`, który odpowiada za stworzenie ofiar na planszy. Dla każdego ofiary losowana jest pozycja na planszy. Następnie dla każdego ofiary tworzona jest tolerancja terenu na podstawie rodzaju terenu, na którym znajduje się ofiara. Tolerancja terenu jest mapą, która przechowuje informacje o tolerancji ofiary na dany teren. Im bliżej tolerancji terenu do 1.0, tym ofiara lepiej przystosowany jest do danego terenu. Im bliżej tolerancji terenu do 0.0, tym ofiara gorzej przystosowany jest do danego terenu. Tolerancja terenu jest losowana z przedziału [0.1, 0.8] dla terenów, na których ofiara nie znajduje się oraz z przedziału [1.0, 1.5] dla terenu, na którym ofiara znajduje się. W ten sposób ofiary są bardziej przystosowane do terenu, na którym się znajdują.

```

fn spawn_predators(mut commands: Commands, world: Res<World>, config: Res<Config>) {
    let mut rng = StdRng::seed_from_u64(config.seed);
    let predator_count = config.initial_predators;

    for _ in 0..predator_count {
        let x = rng.gen_range(0..world.width);
        let y = rng.gen_range(0..world.height);

        commands.spawn((
            Predator {
                energy: config.initial_predator_energy,
                speed: config.initial_predator_speed,
                size: config.initial_predator_size,
                reproduction_threshold:
                    config.initial_predator_reproduction_threshold,
                hunting_efficiency: config.initial_predator_hunting_efficiency,
                satiation_threshold: config.initial_predator_satiation_threshold,
            },
            Position { x, y },
        ));
    }
}

```

Listing 12: System tworzący drapieżniki

Listing 12 przedstawia system `spawn_predators`, który odpowiada za stworzenie drapieżników na planszy. Dla każdego drapieżnika losowana jest pozycja na planszy. Następnie dodaję drapieżnika na planszę z odpowiednimi parametrami początkowymi.

```

fn render_organisms(
    mut commands: Commands,
    query: Query<(Entity, &Position), (Without<Predator>, Without<Mesh2d>)>,
    mut meshes: ResMut<Assets<Mesh>>,
    mut materials: ResMut<Assets<ColorMaterial>>,
) {
    let tile_size = Vec2::new(TILE_SIZE_IN_PIXELS, TILE_SIZE_IN_PIXELS);
    let organism_size = Vec2::new(16.0, 16.0);

    let shape = meshes.add(Circle::new((organism_size.x) / 2.0));

    let color = Color::linear_rgb(0.0, 155.0, 12.0);

    for (entity, position) in query.iter() {
        commands.entity(entity).insert((
            Mesh2d(shape.clone()),
            MeshMaterial2d(materials.add(color)),
            Transform::from_xyz(
                position.x as f32 * tile_size.x,
                position.y as f32 * tile_size.y,
                1.0,
            ),
        )));
    }
}

```

Listing 13: System wyświetlający ofiary

```

fn render_predators(
    mut commands: Commands,
    query: Query<(Entity, &Position), (Without<Organism>, Without<Mesh2d>)>,
    mut meshes: ResMut<Assets<Mesh>>,
    mut materials: ResMut<Assets<ColorMaterial>>,
) {
    let tile_size = Vec2::new(TILE_SIZE_IN_PIXELS, TILE_SIZE_IN_PIXELS);
    let organism_size = Vec2::new(16.0, 16.0);

    let color = Color::srgb(255.0, 0.0, 0.0);
    let shape = meshes.add(Rectangle::new(organism_size.x, organism_size.y));

    for (entity, position) in query.iter() {
        commands.entity(entity).insert(
            Mesh2d(shape.clone()),
            MeshMaterial2d(materials.add(color)),
            Transform::from_xyz(
                position.x as f32 * tile_size.x,
                position.y as f32 * tile_size.y,
                1.0,
            ),
        );
    }
}

```

Listing 14: System wyświetlający drapieżniki

Listingi 13 i 14 przedstawiają systemy `render_organisms` i `render_predators`, które odpowiadają za wyświetlenie ofiar i drapieżników na planszy. Dla każdego ofiary i drapieżnika tworzony jest odpowiedni kolor i kształt, a następnie tworzony jest odpowiedni obiekt na planszy z odpowiednim kolorem i pozycją. Organizmy są wyświetlane jako koła, a drapieżniki jako prostokąty. Organizmy są zielonkawe, a drapieżniki czerwone. W tych systemach argumenty funkcji są wyjątkowe dla ECS. `Query` jest strukturą, która przechowuje zbiór encji, które spełniają określone kryteria. W tym przypadku zwraca encje, które dla systemu `render_organisms` nie posiadają komponentu `Predator` oraz `Mesh2d`, a dla systemu `render_predators` nie posiadają komponentu `Organism` oraz `Mesh2d`. Natomiast posiadają komponent `Position`. Dzięki temu system dostaje tylko te encje, które zawierają tylko te dane, które są mu potrzebne do działania.

```

fn organism_movement(
    mut query: Query<(&mut Position, &mut Organism)>,
    world: Res<World>,
    config: Res<Config>,
) {
    let directions: Vec<isize, isize> = vec![
        (-1, -1),
        (0, -1),
        (1, -1),
        (-1, 0),
        (1, 0),
        (-1, 1),
        (0, 1),
        (1, 1),
    ];
}

let mut rng = StdRng::seed_from_u64(config.seed);

for (mut position, mut organism) in query.iter_mut() {
    if organism.energy <= 0.0 {
        continue;
    }
}

```

```

let mut best_direction = (0, 0);
let mut best_cost = f32::MAX;

for (dx, dy) in directions.iter() {
    let new_x = (position.x as isize + dx).clamp(0, (world.width - 1) as
isize) as usize;
    let new_y = (position.y as isize + dy).clamp(0, (world.height - 1) as
isize) as usize;
    let tile = &world.grid[new_y][new_x];

    let base_cost = match tile.biome {
        Biome::Water => 100.0,
        Biome::Desert => 50.0,
        Biome::Grassland => 10.0,
        Biome::Forest => 20.0,
    };

    let tolerance =
organism.biome_tolerance.get(&tile.biome).unwrap_or(&1.0);
    let cost = base_cost / tolerance;

    let cost = cost + rng.gen_range(0.0..5.0);

    if cost < best_cost {
        best_cost = cost;
        best_direction = (*dx, *dy);
    }
}

position.x =
    (position.x as isize + best_direction.0).clamp(0, (world.width - 1) as
isize) as usize;
position.y =
    (position.y as isize + best_direction.1).clamp(0, (world.height - 1) as
isize) as usize;

let energy_to_consume = 0.1 * organism.speed * organism.size;

organism.energy -= energy_to_consume;

let tile = &world.grid[position.y][position.x];
if tile.biome == Biome::Water {
    organism.energy = -1.0;
}
}
}

```

Listing 15: System odpowiedzialny za ruch ofiar

W listingu 15 przedstawiony jest system `organism_movement`, który odpowiada za ruch ofiar na planszy. Dla każdego ofiary losowana jest nowa pozycja na planszy. Następnie dla każdego ofiary obliczam najlepszy kierunek ruchu na podstawie kosztu ruchu. Koszt ruchu zależy od rodzaju terenu, na którym znajduje się ofiara oraz tolerancji terenu. Im większa tolerancja terenu, tym mniejszy koszt ruchu. Im mniejsza tolerancja terenu, tym większy koszt ruchu. Koszt ruchu jest losowany z przedziału [0.0, 5.0]. Następnie obliczam nową pozycję ofiary na planszy oraz obliczam zużytą energię na podstawie prędkości i rozmiaru ofiary. Jeśli ofiara znajduje się na wodzie, to ustawiam jego energię na -1.0, co oznacza, że ofiara umiera. W ten sposób ofiary są bardziej przystosowane do terenu, na którym się znajdują. Ruch jest dozwolony w 8 kierunkach: góra, dół, lewo, prawo oraz po skosach. Energia ofiary zmniejsza się w zależności od prędkości i rozmiaru ofiary. Im większa prędkość i rozmiar ofiary, tym więcej energii zużywa na ruch.

```

fn predator_movement(
    mut predator_query: Query<(&mut Position, &mut Predator)>,
    prey_query: Query<(&Position, &Organism), Without<Predator>>,
    world: Res<World>,
    config: Res<Config>,
) {
    let directions: Vec<(isize, isize)> = vec![
        (-1, -1),
        (0, -1),
        (1, -1),
        (-1, 0),
        (1, 0),
        (-1, 1),
        (0, 1),
        (1, 1),
    ];
    let mut rng = StdRng::seed_from_u64(config.seed);

    for (mut predator_position, mut predator) in predator_query.iter_mut() {
        if predator.energy <= 0.0 {
            continue;
        }

        let mut closest_prey: Option<&Position> = None;
        let mut min_distance = f32::MAX;
        let predator_range_attack = 1.0;

        for (prey_position, _) in prey_query.iter() {
            let dx = predator_position.x as f32 - prey_position.x as f32;
            let dy = predator_position.y as f32 - prey_position.y as f32;
            let distance = dx * dx + dy * dy;

            if distance < min_distance && distance <= predator_range_attack {
                min_distance = distance;
                closest_prey = Some(prey_position);
            }
        }

        if let Some(prey_position) = closest_prey {
            let dx = prey_position.x as isize - predator_position.x as isize;
            let dy = prey_position.y as isize - predator_position.y as isize;

            predator_position.x = (predator_position.x as isize + dx.signum())
                .clamp(0, (world.width - 1) as isize) as usize;
            predator_position.y = (predator_position.y as isize + dy.signum())
                .clamp(0, (world.height - 1) as isize) as usize;
        } else {
            let mut best_direction = (0, 0);
            let mut best_cost = f32::MAX;

            for (dx, dy) in directions.iter() {
                let new_x = (predator_position.x as isize + dx).clamp(0, (world.width
- 1) as isize)
                    as usize;
                let new_y = (predator_position.y as isize + dy)
                    .clamp(0, (world.height - 1) as isize) as usize;

                let tile = &world.grid[new_y][new_x];

                let cost = match tile.biome {
                    Biome::Water => 100.0,
                    Biome::Desert => 10.0,

```

```

        Biome::Grassland => 5.0,
        Biome::Forest => 6.0,
    };

    let cost = cost + rng.gen_range(0.0..5.0);

    if cost < best_cost {
        best_cost = cost;
        best_direction = (*dx, *dy);
    }
}

predator_position.x = (predator_position.x as isize + best_direction.0
    .clamp(0, (world.width - 1) as isize) as usize;
predator_position.y = (predator_position.y as isize + best_direction.1)
    .clamp(0, (world.height - 1) as isize) as usize;
}

predator.energy -= 0.1 * predator.speed * predator.size;
}
}

```

Listing 16: System odpowiedzialny za ruch drapieżników

System `predator_movement` przedstawiony w listingu 16 odpowiada za ruch drapieżników na planszy. Dla każdego drapieżnika obliczam najbliższą ofiarę. Jeśli ofiara znajduje się w zasięgu ataku drapieżnika, to drapieżnik rusza w jej kierunku. Jeśli ofiara nie znajduje się w zasięgu ataku drapieżnika, to drapieżnik rusza w losowym kierunku. Ruch drapieżnika jest dozwolony w 8 kierunkach: góra, dół, lewo, prawo oraz po skosach. Energia drapieżnika zmniejsza się w zależności od prędkości i rozmiaru drapieżnika. Im większa prędkość i rozmiar drapieżnika, tym więcej energii zużywa na ruch. Jeśli drapieżnik znajdzie się na wodzie, to ustawiam jego energię na -1.0, co oznacza, że drapieżnik umiera. Dystans jest dystansem euklidesowym między drapieżnikiem a ofiarą.

W obu systemach `organism_movement` i `predator_movement` sprawdzam czy dana jednostka posiada dodatnią energię, by w ogóle mogła się ruszać.

```

fn despawn_dead_organisms(mut commands: Commands, query: Query<(Entity, &Organism)>)
{
    for (entity, organism) in query.iter() {
        if organism.energy <= 0.0 {
            commands.entity(entity).despawn_recursive();
        }
    }
}

fn despawn_dead_predators(mut commands: Commands, query: Query<(Entity, &Predator)>)
{
    for (entity, predator) in query.iter() {
        if predator.energy <= 0.0 {
            commands.entity(entity).despawn_recursive();
        }
    }
}

```

Listing 17: Systemy usuwające martwe jednostki

W listingu 17 przedstawione są systemy `despawn_dead_organisms` i `despawn_dead_predators`, które odpowiadają za usuwanie martwych jednostek z planszy. Dla każdej jednostki sprawdzam czy jej energia jest mniejsza lub równa 0.0. Jeśli tak, to usuwam jednostkę z planszy. Warto zauważyć, że używam metody `despawn_recursive`, która usuwa jednostkę wraz z jej dziećmi. Dzięki temu, jeśli jednostka posiada jakieś dzieci, to również zostaną one usunięte z planszy.

```

fn organism_sync(mut query: Query<&Position, &mut Transform, &Organism>) {
    for (position, mut transform, organism) in query.iter_mut() {
        transform.translation.x = position.x as f32 * TILE_SIZE_IN_PIXELS;
        transform.translation.y = position.y as f32 * TILE_SIZE_IN_PIXELS;
        transform.scale = Vec3::new(organism.size, organism.size, 1.0);
    }
}

fn predator_sync(mut query: Query<&Position, &mut Transform, &Predator>) {
    for (position, mut transform, predator) in query.iter_mut() {
        transform.translation.x = position.x as f32 * TILE_SIZE_IN_PIXELS;
        transform.translation.y = position.y as f32 * TILE_SIZE_IN_PIXELS;
        transform.scale = Vec3::new(predator.size, predator.size, 1.0);
    }
}

```

Listing 18: Systemy synchronizujące pozycję jednostek

W listingu 18 przedstawione są systemy `organism_sync` i `predator_sync`, które odpowiadają za synchronizację pozycji jednostek na planszy. Dla każdej jednostki ustawiam odpowiednią pozycję oraz skalę. Pozycja jednostki jest obliczana na podstawie pozycji jednostki na planszy, a skala jednostki jest obliczana na podstawie rozmiaru jednostki.

```

fn regenerate_food(mut world: ResMut<World>, config: Res<Config>) {
    for row in world.grid.iter_mut() {
        for tile in row.iter_mut() {
            tile.regenerate_food(&config);
        }
    }
}

```

Listing 19: System odnawiający pożywienie na planszy

W listingu 19 przedstawiony jest system `regenerate_food`, który odpowiada za odnowienie pożywienia na planszy. Dla każdego kafelka na planszy odnawiam pożywienie na podstawie ustawień konfiguracyjnych. Pożywienie odnawia się w zależności od rodzaju terenu. Im bardziej żyzny teren, tym więcej pożywienia jest odnawiane.

```

fn consume_food(mut world: ResMut<World>, mut query: Query<(Entity, &mut Organism,
&Position)>) {
    let mut organisms_by_tile: HashMap<(usize, usize), Vec<(Entity, Mut<Organism>)> =
        HashMap::new();

    for (entity, organism, position) in query.iter_mut() {
        organisms_by_tile
            .entry((position.x, position.y))
            .or_default()
            .push((entity, organism));
    }

    for ((x, y), organisms) in organisms_by_tile.iter_mut() {
        let tile = &mut world.grid[*y][*x];
        if tile.food_availability < 0.0 {
            continue;
        }

        organisms.sort_by(|a, b| {
            b.1.size
                .partial_cmp(&a.1.size)
                .unwrap_or(std::cmp::Ordering::Equal)
        });
    }
}

```

```

        let mut remaining_food = tile.food_availability;
        for (_, organism) in organisms.iter_mut() {
            if remaining_food <= 0.0 {
                break;
            }

            let food_needed = organism.size * 0.2 * organism.speed;

            let food_consumed = food_needed.min(remaining_food);
            remaining_food -= food_consumed;
            organism.energy += food_consumed * 2.0;

            tile.food_availability -= food_consumed;
        }
    }
}

```

Listing 20: System spożywania dla ofiar

W listingu 20 przedstawiony jest system `consume_food`, który odpowiada za spożywanie jedzenia przez ofiary. Na początku zbieram ofiary na danym kafelku. Następnie sprawdzam czy na danym kafelku jest dostępne jedzenie. Jeśli nie ma jedzenia, to przechodzę do następnego kafelka. Potem sortuję ofiary na danym kafelku od największego do najmniejszego. Następnie tworzę zmienną, która przechowuje informację o tym ile jedzenia zostało na danym kafelku. Potem dla każdego ofiary obliczam ile jedzenia potrzebuje na podstawie rozmiaru oraz prędkości ofiary. Odejmuję od dostępnego jedzenia ilość jedzenia, którą zjadł ofiara. Następnie dodaję energię organizmowi na podstawie zjedzonego jedzenia pomnożonego przez arbitralną wartość 2.0. Na końcu odejmuję zjedzone jedzenie od dostępnego jedzenia na kafelku. Jeśli ofiara zje więcej jedzenia niż jest dostępne na kafelku, to zje tylko tyle ile jest dostępne. Natomiast jak jedzenie na kafelku się skończy, to ofiary nie będą mogły zjeść jedzenia z tego kafelka.

```

fn biome_adaptation(mut query: Query<(&mut Organism, &Position)>, world: Res<World>)
{
    for (mut organism, position) in query.iter_mut() {
        let tile = &world.grid[position.y][position.x];
        let tolerance = organism.biome_tolerance.get(&tile.biome).unwrap_or(&1.0);

        match tile.biome {
            Biome::Forest => {
                organism.energy += 0.1 * tolerance;
            }
            Biome::Desert => {
                organism.energy -= 0.1 / tolerance;
            }
            Biome::Water => {
                organism.energy -= f32::MAX;
            }
            Biome::Grassland => {
                organism.energy += 0.05 * tolerance;
            }
        }
    }
}

```

Listing 21: System adaptacji do terenu dla ofiar

W listingu 21 przedstawiony jest system `biome_adaptation`, który odpowiada za adaptację ofiar do terenu. Ten system odpowiada za bierne wpływanie na energię ofiar. W zależności od rodzaju terenu, na którym znajduje się ofiara, energia ofiary zmniejsza się lub zwiększa. Lasy są bogate w jedzenie, więc ofiary zyskują energię, pustynie są ubogie w jedzenie, więc ofiary tracą energię, woda nie jest dobrym miejscem dla ofiar, więc ofiary tracą całą energię, łąki są dobre do pasienia, więc ofiary zyskują

energię. Tolerancja terenu wpływa na to, jak bardzo ofiara jest przystosowany do danego terenu, co z kolei zwiększa bądź zmniejsza ilość zyskanej lub utraconej energii.

```
fn reproduction(
    mut commands: Commands,
    mut query: Query<(&mut Organism, &Position)>,
    predators_query: Query<&Predator>,
    world: Res<World>,
    config: Res<Config>,
) {
    let organisms_count = query.iter().count();
    let predators_count = predators_query.iter().count();
    let total_entities = organisms_count + predators_count;

    if total_entities >= config.max_total_entities {
        return;
    }

    let mut rng = StdRng::seed_from_u64(config.seed);

    for (mut organism, position) in query.iter_mut() {
        if organism.energy > organism.reproduction_threshold {
            let mutation_factor = config.organism_mutability;

            let tile_biome = &world.grid[position.y][position.x].biome;

            let mut biome_tolerance = get_biome_tolerance(tile_biome, config.seed);
            for (_, tolerance) in biome_tolerance.iter_mut() {
                *tolerance *= 1.0 + rng.gen_range(-mutation_factor..mutation_factor);
            }

            let reproduction_threshold = organism.reproduction_threshold
                * (1.0 + rng.gen_range(-mutation_factor..mutation_factor));

            let size = organism.size * (1.0 + rng.gen_range(
                -mutation_factor..mutation_factor));
            let speed = (organism.speed * (1.1 + rng.gen_range(
                -mutation_factor..mutation_factor)))
                - (size * 0.1);

            let child = Organism {
                energy: organism.energy / 2.0,
                speed: speed,
                size: size,
                reproduction_threshold,
                biome_tolerance,
            };

            let x_offset = rng.gen_range(-1..=1);
            let y_offset = rng.gen_range(-1..=1);

            let child_position = Position {
                x: (position.x as isize + x_offset).clamp(0, world.width as isize - 1) as usize,
                y: (position.y as isize + y_offset).clamp(0, world.height as isize - 1) as usize,
            };

            commands.spawn((child, child_position));
            organism.energy /= 2.0;
        }
    }
}
```

```
    }
}
```

Listing 22: System rozmnażania dla ofiar

W listingu 22 przedstawiony jest system reproduction, który odpowiada za rozmnażanie ofiar. Dla każdego ofiary sprawdzam czy jego energia jest większa od progu reprodukcji. Jeśli tak, to tworzę nowego potomka na podstawie ustawień konfiguracyjnych. Następnie losuję mutacje dla nowego potomka. Mutacje są losowane z przedziału [-mutation\_factor, mutation\_factor]. Następnie tworzę nowego potomka na podstawie mutacji. Potomek ma połowę energii rodzica, prędkość, rozmiar oraz próg reprodukcji są mutowane. Następnie losuję pozycję potomka w sąsiedztwie rodzica. Na końcu zmniejszam energię rodzica o połowę. Dzięki temu ofiary mogą się rozmnażać i przekazywać swoje cechy potomstwu.

Jeśli liczba ofiar i drapieżników przekroczy maksymalną liczbę jednostek na planszy, to nie będą mogły się rozmnażać. Dzięki temu ograniczam liczbę jednostek na planszy.

```
fn hunting(
    mut commands: Commands,
    mut predator_query: Query<(&mut Predator, &Position)>,
    prey_query: Query<(Entity, &Position, &Organism), Without<Predator>>,
) {
    for (mut predator, predator_position) in predator_query.iter_mut() {
        if predator.energy >= predator.satiation_threshold {
            continue;
        }

        for (prey_entity, prey_position, prey) in prey_query.iter() {
            if predator_position.x == prey_position.x && predator_position.y == prey_position.y {
                let energy_gained = prey.size * predator.hunting_efficiency;
                predator.energy += energy_gained;
                commands.entity(prey_entity).try_despawn_recursive();
                break;
            }
        }
    }
}
```

W listingu 23 przedstawiony jest system hunting odpowiedzialny za polowanie drapieżników na ofiary. Dla każdego drapieżnika sprawdzam czy jego energia jest mniejsza od progu sytości. Jeśli tak, to sprawdzam czy drapieżnik znajduje się na tym samym kafelku co ofiara. Jeśli tak, to drapieżnik zjada ofiarę i zyskuje energię na podstawie rozmiaru ofiary oraz efektywności polowania drapieżnika. Następnie usuwam ofiarę z planszy. Dzięki temu drapieżnicy mogą polować na ofiary i zyskiwać energię.

```
fn predator_reproduction(
    mut commands: Commands,
    mut query: Query<(&mut Predator, &Position)>,
    organisms_query: Query<&Organism>,
    world: Res<World>,
    config: Res<Config>,
) {
    let predators_count = query.iter().count();
    let organisms_count = organisms_query.iter().count();
    let total_entities = predators_count + organisms_count;

    if total_entities >= config.max_total_entities {
        return;
    }
```

```
let mut rng = StdRng::seed_from_u64(config.seed);

for (mut predator, position) in query.iter_mut() {
    if predator.energy > predator.reproduction_threshold {
        let mutation_factor = config.predator_mutability;

        let size = predator.size * (1.0 + rng.gen_range(-mutation_factor..mutation_factor));
        let speed = predator.speed * (1.1 + rng.gen_range(-mutation_factor..mutation_factor))
            - (size * 0.1);

        let child = Predator {
            energy: predator.energy / 2.0,
            speed: speed,
            size: size,
            hunting_efficiency: predator.hunting_efficiency
                * (1.0 + rng.gen_range(-mutation_factor..mutation_factor)),
            satiation_threshold: predator.satiation_threshold
                * (1.0 + rng.gen_range(-mutation_factor..mutation_factor)),
            reproduction_threshold: predator.reproduction_threshold
                * (1.0 + rng.gen_range(-mutation_factor..mutation_factor)),
        };

        let x_offset = rng.gen_range(-1..=1);
        let y_offset = rng.gen_range(-1..=1);

        let child_position = Position {
            x: (position.x as isize + x_offset).clamp(0, world.width as isize - 1) as usize,
            y: (position.y as isize + y_offset).clamp(0, world.height as isize - 1) as usize,
        };

        commands.spawn((child, child_position));

        predator.energy /= 2.0;
    }
}
```

Listing 24: System rozmnażania dla drapieżników

System rozmnażania dla drapieżników przedstawiony w listingu 24 działa analogicznie do systemu rozmnażania dla ofiar. Dla każdego drapieżnika sprawdzam czy jego energia jest większa od progu reprodukcji. Jeśli tak, to tworzę nowego potomka na podstawie ustawień konfiguracyjnych. Następnie losuję mutacje dla nowego potomka. Mutacje są losowane z przedziału [-mutation\_factor, mutation\_factor]. Następnie tworzę nowego potomka na podstawie mutacji. Potomek ma połowę energii rodzica, prędkość, rozmiar, efektywność polowania, próg sytości oraz próg reprodukcji są mutowane. Następnie losuję pozycję potomka w sąsiedztwie rodzica. Na końcu zmniejszam energię rodzica o połowę. Dzięki temu drapieżniki mogą się rozmnażać i przekazywać swoje cechy potomstwu.

Analogicznie do systemu reprodukcji ofiar, u drapieżników również sprawdzana jest ilość jednostek na planszy. Jeśli liczba jednostek przekroczy maksymalną liczbę jednostek na planszy, to drapieżnicy nie będą mogli się rozmnażać.

```
fn overcrowding(
    mut query: Query<(&mut Organism, &Position)>,
    mut predator_query: Query<(&mut Predator, &Position)>,
    config: Res<Config>,
) {
    let overcrowding_threshold for organisms =
```

```

config.overnesting_threshold_for_organisms;
    let overnesting_threshold_for_predators =
config.overnesting_threshold_for_predators;

    let mut organisms_by_tile: HashMap<usize, usize>, Vec<Mut<Organism>>> =
HashMap::new();

    for (organism, position) in query.iter_mut() {
        organisms_by_tile
            .entry((position.x, position.y))
            .or_default()
            .push(organism);
    }

    for (_, organisms) in organisms_by_tile.iter_mut() {
        if organisms.len() > overnesting_threshold_for_organisms {
            organisms.sort_by(|a, b| {
                a.energy
                    .partial_cmp(&b.energy)
                    .unwrap_or(std::cmp::Ordering::Equal)
            });

            let num_to_remove = organisms.len() -
overnesting_threshold_for_organisms;
            for organism in organisms.iter_mut().take(num_to_remove) {
                organism.energy = -1.0;
            }
        }
    }

    let mut predators_by_tile: HashMap<usize, usize>, Vec<Mut<Predator>>> =
HashMap::new();

    for (predator, position) in predator_query.iter_mut() {
        predators_by_tile
            .entry((position.x, position.y))
            .or_default()
            .push(predator);
    }

    for (_, predators) in predators_by_tile.iter_mut() {
        if predators.len() > overnesting_threshold_for_predators {
            predators.sort_by(|a, b| {
                a.energy
                    .partial_cmp(&b.energy)
                    .unwrap_or(std::cmp::Ordering::Equal)
            });

            let num_to_remove = predators.len() -
overnesting_threshold_for_predators;
            for predator in predators.iter_mut().take(num_to_remove) {
                predator.energy = -1.0;
            }
        }
    }
}

```

Listing 25: System przeludnienia

System przeludnienia przedstawiony w listingu 25 odpowiada za usuwanie jednostek z planszy, gdy przekroczeniu zostanie maksymalna liczba jednostek na kafelku. Dla każdego kafelka na planszy zbieram ofiary i drapieżniki. Następnie sprawdzam czy liczba ofiar na kafelku przekracza próg przeludnienia dla ofiar. Jeśli tak, to sortuję ofiary na kafelku od najmniej energii do największej energii.

Następnie usuwam ofiary, które przekraczają próg przeludnienia dla ofiar. Analogicznie postępuję z drapieżnikami. Dzięki temu ograniczam liczbę jednostek na kafelku.

```
fn increment_generation(mut generation: ResMut<Generation>) {
    generation.0 += 1;
}
```

Listing 26: System inkrementacji numeru pokolenia

W listingu 26 przedstawiony jest najkrótszy system w całym programie. System `increment_generation` odpowiada za inkrementację numeru pokolenia.

```
fn initialize_log_file(config: Res<Config>) {
    if !config.log_data {
        return;
    }

    let world_file = File::create("world_data.jsonl").expect("Failed to create log file");
    world_file.set_len(0).expect("Failed to clear log file");
}
```

W listingu 27 przedstawiony jest system `initialize_log_file`, który odpowiada za inicjalizację pliku danych symulacji. Jeśli w konfiguracji ustawiono, że dane mają być zapisywane do pliku, to tworzę plik `world_data.jsonl` i czyszczę go. Format pliku `jsonl` to format JSON, w którym każda linia to osobny obiekt JSON. Dzięki temu mogę łatwo parsować plik JSON linia po linii i dodatkowo ułatwia to zapis danych do pliku wraz z postępem symulacji.

```
fn log_world_data(
    config: Res<Config>,
    world: Res<World>,
    generation: Res<Generation>,
    organisms_query: Query<(&Organism, &Position)>,
    predators_query: Query<(&Predator, &Position)>,
) {
    if !config.log_data {
        return;
    }

    let mut file = OpenOptions::new()
        .create(true)
        .append(true)
        .open("world_data.jsonl")
        .expect("Failed to open log file");

    let organisms_with_position = organisms_query
        .iter()
        .map(|(organism, position)| OrganismWithPosition {
            organism: organism.clone(),
            position: position.clone(),
        })
        .collect::<Vec<_>>();

    let predators_with_position = predators_query
        .iter()
        .map(|(predator, position)| PredatorWithPosition {
            predator: predator.clone(),
            position: position.clone(),
        })
        .collect::<Vec<_>>();

    let export_data = ExportData {
        generation: generation.0,
```

```

        world: world.clone(),
        config: config.clone(),
        organisms: organisms_with_position,
        predators: predators_with_position,
    };

    let json = serde_json::to_string(&export_data).expect("Failed to serialize
data");

    writeln!(file, "{}", json).expect("Failed to write to log file");
}

```

W listingu 28 przedstawiony jest system `log_world_data`, który odpowiada za zapis danych symulacji do pliku. Jeśli w konfiguracji ustawiono, że dane mają być zapisywane do pliku, to otwieram plik `world_data.jsonl` w trybie dodawania i tworzenia pliku, a następnie zapisuję dane symulacji do pliku. Dane symulacji zawierają numer pokolenia, stan planszy, ustawienia konfiguracyjne, ofiary oraz drapieżniki na planszy. Dane są zapisywane w formacie JSON.

```

fn handle_camera_movement(
    mut query: Query<(&mut Transform, &Camera)>,
    keys: Res<ButtonInput<KeyCode>>,
) {
    for (mut transform, _) in query.iter_mut() {
        let mut translation = transform.translation;

        if keys.pressed(KeyCode::KeyW) {
            translation.y += 5.0;
        }
        if keys.pressed(KeyCode::KeyS) {
            translation.y -= 5.0;
        }
        if keys.pressed(KeyCode::KeyA) {
            translation.x -= 5.0;
        }
        if keys.pressed(KeyCode::KeyD) {
            translation.x += 5.0;
        }

        transform.translation = translation;
    }
}

```

System `handle_camera_movement` odpowiada za obsługę ruchu kamery przy pomocy klawiszy WSAD.

```

fn load_config() -> Result<Config, Box<dyn Error>> {
    let exe_dir = std::env::current_exe()
        .expect("Failed to get current executable path")
        .parent()
        .expect("Executable must be in a directory")
        .to_path_buf();

    let config_path = exe_dir.join("config.toml");

    let config = fs::read_to_string(config_path)?;
    let config: Config = toml::from_str(&config)?;

    Ok(config)
}

```

```

fn default_config() -> Config {

```

```

Config {
    width: 10,
    height: 10,
    initial_organisms: 10,
    initial_predators: 1,
    headless: false,
    log_data: false,
    forest: BiomeDataConfig {
        food_availability: 1.0,
        max_food_availability: 100.0,
    },
    desert: BiomeDataConfig {
        food_availability: 1.0,
        max_food_availability: 100.0,
    },
    water: BiomeDataConfig {
        food_availability: 1.0,
        max_food_availability: 100.0,
    },
    grassland: BiomeDataConfig {
        food_availability: 1.0,
        max_food_availability: 100.0,
    },
    initial_organism_energy: 100.0,
    initial_predator_energy: 100.0,
    initial_organism_speed: 1.0,
    initial_predator_speed: 1.0,
    initial_organism_size: 1.0,
    initial_predator_size: 1.0,
    initial_organism_reproduction_threshold: 100.0,
    initial_predator_reproduction_threshold: 100.0,
    initial_predator_hunting_efficiency: 1.0,
    initial_predator_satiation_threshold: 100.0,
    organism_mutability: 0.1,
    predator_mutability: 0.1,
    overcrowding_threshold_for_organisms: 10,
    overcrowding_threshold_for_predators: 10,
    seed: 0,
    max_total_entities: 1000,
}
}

fn get_config() -> Config {
#[cfg(target_arch = "wasm32")]
let config = default_config();
#[cfg(not(target_arch = "wasm32"))]
let config = load_config().expect("Failed to load config file");

config
}

```

Listing 30: Funkcje do obsługi konfiguracji

W listingu 30 przedstawione są funkcje do obsługi konfiguracji. Funkcja `load_config` wczytuje konfigurację z pliku `config.toml`. Funkcja `default_config` zwraca domyślną konfigurację, jeśli nie uda się wczytać konfiguracji z pliku. Funkcja `get_config` zwraca konfigurację. Jeśli program jest uruchomiony w przeglądarce, to zwracana jest domyślna konfiguracja. W przeciwnym przypadku zwracana jest wczytana konfiguracja z pliku.

### 5.3. Wizualizacja

Teraz omówię kod odpowiedzialny za wizualizację danych i ich obróbkę. Kod jest napisany w języku **Python**.

```
import json
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
```

Listing 31: Importowanie bibliotek

W pierwszej kolejności importuję potrzebne biblioteki do wizualizacji danych. Biblioteka `json` jest potrzebna do wczytania danych z pliku JSON, biblioteka `numpy` do operacji na macierzach, biblioteka `pandas` do operacji na danych, biblioteka `matplotlib` do tworzenia wykresów, a biblioteka `seaborn` do tworzenia wykresów statystycznych jak wykres mapy cieplnej.

```
jsonl_file = "world_data.jsonl"
generations = []
organism_count = 0
predator_count = 0
width, height = None, None

gen_list = []
organism_counts = []
predator_counts = []
biome_counts = {"Forest": [], "Desert": [], "Water": [], "Grassland": []}

heatmap_grid = None
last_snapshot = None

organism_avg_size_list = []
organism_avg_speed_list = []
organism_avg_energy_list = []
predator_avg_size_list = []
predator_avg_speed_list = []
predator_avg_energy_list = []
organism_avg_reproduction_threshold_list = []
predator_avg_reproduction_threshold_list = []
predator_avg_hunting_efficiency_list = []
predator_avg_satiation_threshold_list = []

average_food_per_generation = []
```

Listing 32: Inicjalizacja zmiennych

W powyższym listingu tworzę zmienne, które będą mi potrzebne do stworzenia wykresów. Zmienna `jsonl_file` przechowuje ścieżkę do pliku z danymi. Zmienne `generations`, `organism_count`, `predator_count`, `width`, `height` przechowują informacje o pokoleniach, liczbie ofiar, liczbie drapieżników, szerokości i wysokości planszy. Zmienna `gen_list` przechowuje listę pokoleń, `organism_counts` i `predator_counts` przechowują listę liczby ofiar i drapieżników w każdym pokoleniu. Zmienna `biome_counts` przechowuje liczbę kafelków z danym rodzajem terenu w każdym pokoleniu. Zmienna `heatmap_grid` przechowuje mapę cieplną, a `last_snapshot` ostatni stan planszy. Pozostałe zmienne przechowują średnie wartości cech ofiar i drapieżników w każdym pokoleniu.

```
with open(jsonl_file, 'r') as f:
    for line in f:
        if not line.strip():
            continue
        data = json.loads(line.strip())
        last_snapshot = data

        generation = data["generation"]
        generations.append(generation)
        organism_count = len(data["organisms"])
        predator_count = len(data["predators"])
```

```

        if width is None:
            width, height = data["config"]["width"], data["config"]["height"]
            heatmap_grid = np.zeros((height, width))

        gen_list.append(generation)
        organism_counts.append(organism_count)
        predator_counts.append(predator_count)

        if organism_count > 0:
            organism_avg_size_list.append(np.mean([o["organism"]["size"] for o in
data["organisms"]]))
            organism_avg_speed_list.append(np.mean([o["organism"]["speed"] for o in
data["organisms"]]))
            organism_avg_energy_list.append(np.mean([o["organism"]["energy"] for o in
data["organisms"]]))
            organism_avg_reproduction_threshold_list.append(np.mean([o["organism"]
["reproduction_threshold"] for o in data["organisms"]]))
        else:
            organism_avg_size_list.append(0)
            organism_avg_speed_list.append(0)
            organism_avg_energy_list.append(0)
            organism_avg_reproduction_threshold_list.append(0)

        if predator_count > 0:
            predator_avg_size_list.append(np.mean([p["predator"]["size"] for p in
data["predators"]]))
            predator_avg_speed_list.append(np.mean([p["predator"]["speed"] for p in
data["predators"]]))
            predator_avg_energy_list.append(np.mean([p["predator"]["energy"] for p in
data["predators"]]))
            predator_avg_reproduction_threshold_list.append(np.mean([p["predator"]
["reproduction_threshold"] for p in data["predators"]]))
            predator_avg_hunting_efficiency_list.append(np.mean([p["predator"]
["hunting_efficiency"] for p in data["predators"]]))
            predator_avg_satiation_threshold_list.append(np.mean([p["predator"]
["satiation_threshold"] for p in data["predators"]]))
        else:
            predator_avg_size_list.append(0)
            predator_avg_speed_list.append(0)
            predator_avg_energy_list.append(0)
            predator_avg_reproduction_threshold_list.append(0)
            predator_avg_hunting_efficiency_list.append(0)
            predator_avg_satiation_threshold_list.append(0)

        for org in data["organisms"]:
            x, y = org["position"]["x"], org["position"]["y"]
            heatmap_grid[y, x] += 1
        for pred in data["predators"]:
            x, y = pred["position"]["x"], pred["position"]["y"]
            heatmap_grid[y, x] += 1

        biome_tally = {"Forest": 0, "Desert": 0, "Water": 0, "Grassland": 0}
        for org in data["organisms"]:
            max_biome = max(org["organism"]["biome_tolerance"], key=org["organism"]
["biome_tolerance"].get)
            biome_tally[max_biome] += 1
            for biome in biome_counts:
                biome_counts[biome].append(biome_tally[biome])

        total_food = sum(tile["food_availability"] for row in data["world"]["grid"]
for tile in row)
        average_food_per_generation.append(total_food / (width * height))
    
```

```

if len(gen_list) % 100 == 0:
    print(f"Processed {len(gen_list)} generations...")

```

Listing 33: Przetwarzanie danych

Wczytuję dane z pliku `world_data.jsonl` i przetwarzam je, co ważne dane przetwarzane są linijką po linijce co jest istotne, gdyż plik może być bardzo duży i w przeciwnym wypadku program mógłby zużyć dużo pamięci, której komputer niekoniecznie posiada. Wczytuję dane o pokoleniu, liczbę ofiar, liczbę drapieżników, szerokości i wysokości planszy. Tworzę mapę cieplną planszy, a także obliczam średnie wartości cech ofiar i drapieżników w każdym pokoleniu. Obliczam również liczbę kafelków z danym rodzajem terenu w każdym pokoleniu oraz średnią ilość jedzenia na planszy. Dodatkowo co 100 pokoleń wypisuję informację o przetworzonych pokoleniach.

```

plt.figure(figsize=(10, 5))
plt.plot(gen_list, organism_counts, label="Organisms", color="lime", linewidth=2)
plt.plot(gen_list, predator_counts, label="Predators", color="red", linewidth=2)
plt.xlabel("Generation")
plt.ylabel("Population")
plt.title("Population Over Time")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.savefig('population_trends.png')

```

Listing 34: Wykres populacji w czasie

Na powyższym wykresie przedstawiam populację ofiar i drapieżników w czasie. Na osi X znajduje się numer pokolenia, a na osi Y liczba jednostek. Wykres przedstawia zmiany populacji ofiar i drapieżników w czasie.

```

plt.figure(figsize=(8, 6))
sns.heatmap(heatmap_grid, cmap="hot", square=True)
plt.title("Population Heatmap")
plt.xlabel("X")
plt.ylabel("Y")
plt.savefig('population_heatmap.png')

```

Listing 35: Mapa cieplna populacji

Na powyższym wykresie przedstawiam mapę cieplną populacji. Im jaśniejszy kolor, tym więcej jednostek na danym kafelku. Wykres przedstawia rozmieszczenie jednostek na planszy.

```

plt.figure(figsize=(10, 5))
sns.histplot(organism_avg_energy_list, bins=30, color="lime", alpha=0.7,
label="Organisms", kde=True)
sns.histplot(predator_avg_energy_list, bins=30, color="red", alpha=0.7,
label="Predators", kde=True)
plt.xlabel("Energy Levels")
plt.ylabel("Frequency")
plt.title("Energy Distribution of Organisms and Predators")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.savefig("energy_distribution.png")

```

Listing 36: Rozkład energii ofiar i drapieżników

Na powyższym wykresie przedstawiam rozkład energii ofiar i drapieżników. Na osi X znajduje się poziom energii, a na osi Y częstotliwość. Wykres przedstawia rozkład energii ofiar i drapieżników.

```

df_biomes = pd.DataFrame(biome_counts, index=generations)
df_biomes.plot(kind="area", stacked=True, figsize=(10, 6), colormap="coolwarm",
alpha=0.7)
plt.xlabel("Generation")
plt.ylabel("Organism Count")
plt.title("Biome Preference Trends Over Generations")

```

```

plt.legend(title="Biome")
plt.grid(True)
plt.savefig("biome_trends.png")

```

Listing 37: Trendy preferencji terenowych w czasie

Na powyższym wykresie przedstawiam trendy preferencji terenowych ofiar w czasie. Na osi X znajduje się numer pokolenia, a na osi Y liczba jednostek. Wykres przedstawia zmiany preferencji terenowych ofiar w czasie. Każdy kolor odpowiada innemu rodzajowi terenu.

```

plt.figure(figsize=(10, 5))
plt.plot(gen_list, average_food_per_generation, label="Avg Food Availability",
color="orange", linewidth=2)
plt.xlabel("Generation")
plt.ylabel("Average Food Availability")
plt.title("Food Availability Trends Over Generations")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.savefig("food_trends.png")

```

Listing 38: Trendy dostępności jedzenia w czasie

Na powyższym wykresie przedstawiam trendy dostępności jedzenia w czasie. Na osi X znajduje się numer pokolenia, a na osi Y średnia dostępność jedzenia. Wykres przedstawia zmiany dostępności jedzenia w czasie.

```

food_grid = np.array([[tile["food_availability"] for tile in row] for row in
last_snapshot["world"]["grid"]])
plt.figure(figsize=(8, 6))
sns.heatmap(food_grid, cmap="YlGnBu", square=True)
plt.title(f"Food Availability Heatmap (Generation {last_snapshot['generation']})")
plt.xlabel("X Position")
plt.ylabel("Y Position")
plt.savefig("food_heatmap.png")

```

Listing 39: Mapa cieplna dostępności jedzenia

Na powyższym wykresie przedstawiam mapę cieplną dostępności jedzenia. Im jaśniejszy kolor, tym więcej jedzenia na danym kafelku. Wykres przedstawia dostępność jedzenia na planszy w ostatnim pokoleniu.

```

fig, axes = plt.subplots(3, 1, figsize=(10, 12))
axes[0].plot(gen_list, organism_avg_size_list, label="Organisms - Avg Size",
color="lime", linewidth=2)
axes[0].plot(gen_list, predator_avg_size_list, label="Predators - Avg Size",
color="red", linewidth=2)
axes[0].set_ylabel("Size")
axes[0].set_title("Evolution of Size Over Generations")
axes[0].legend()
axes[0].grid(True)

axes[1].plot(gen_list, organism_avg_speed_list, label="Organisms - Avg Speed",
color="blue", linewidth=2)
axes[1].plot(gen_list, predator_avg_speed_list, label="Predators - Avg Speed",
color="orange", linewidth=2)
axes[1].set_ylabel("Speed")
axes[1].set_title("Evolution of Speed Over Generations")
axes[1].legend()
axes[1].grid(True)

axes[2].plot(gen_list, organism_avg_energy_list, label="Organisms - Avg Energy",
color="yellow", linewidth=2)
axes[2].plot(gen_list, predator_avg_energy_list, label="Predators - Avg Energy",
color="blue", linewidth=2)

```

```

axes[2].set_xlabel("Generation")
axes[2].set_ylabel("Energy")
axes[2].set_title("Evolution of Energy Over Generations")
axes[2].legend()
axes[2].grid(True)

plt.tight_layout()
plt.savefig("traits_evolution.png")

```

Listing 40: Wykresy ewolucji cech ofiar i drapieżników

Na powyższych wykresach przedstawiam ewolucję cech ofiar i drapieżników w czasie. Na pierwszym wykresie przedstawiam średni rozmiar ofiar i drapieżników w czasie. Na drugim wykresie przedstawiam średnią prędkość ofiar i drapieżników w czasie. Na trzecim wykresie przedstawiam średnią energię ofiar i drapieżników w czasie.

```

df = pd.DataFrame({
    "Generation": generations,
    "Organism Size": organism_avg_size_list,
    "Predator Size": predator_avg_size_list,
    "Organism Speed": organism_avg_speed_list,
    "Predator Speed": predator_avg_speed_list,
    "Organism Energy": organism_avg_energy_list,
    "Predator Energy": predator_avg_energy_list,
})

plt.figure(figsize=(8, 6))
sns.scatterplot(x="Organism Speed", y="Predator Speed", hue="Generation",
size="Generation", sizes=(20, 200), data=df, palette="coolwarm")
plt.xlabel("Organism Speed")
plt.ylabel("Predator Speed")
plt.title("Correlation Between Organism and Predator Speed")
plt.legend(title="Generation", bbox_to_anchor=(1, 1))
plt.savefig("correlation_speed.png")

```

Listing 41: Korelacja między prędkościami ofiar i drapieżników

```

plt.figure(figsize=(8, 6))
sns.scatterplot(x="Organism Size", y="Predator Size", hue="Generation",
size="Generation", sizes=(20, 200), data=df, palette="coolwarm")
plt.xlabel("Organism Size")
plt.ylabel("Predator Size")
plt.title("Correlation Between Organism and Predator Size")
plt.legend(title="Generation", bbox_to_anchor=(1, 1))
plt.savefig("correlation_size.png")

```

Listing 42: Korelacja między rozmiarami ofiar i drapieżników

```

plt.figure(figsize=(10, 5))
plt.plot(gen_list, organism_avg_reproduction_threshold_list, label="Organisms - Reproduction Threshold", color="lime", linewidth=2)
plt.plot(gen_list, predator_avg_reproduction_threshold_list, label="Predators - Reproduction Threshold", color="red", linewidth=2)
plt.xlabel("Generation")
plt.ylabel("Reproduction Threshold")
plt.title("Reproduction Threshold Evolution Over Generations")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.savefig("reproduction_threshold_trends.png")

```

Listing 43: Trendy progu reprodukcji w czasie

```

plt.figure(figsize=(10, 5))
plt.plot(gen_list, predator_avg_hunting_efficiency_list, label="Predators - Hunting Efficiency", color="blue", linewidth=2)
plt.xlabel("Generation")

```

```
plt.ylabel("Hunting Efficiency")
plt.title("Predator Hunting Efficiency Over Generations")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.savefig("hunting_efficiency_trends.png")
```

Listing 44: Trendy efektywności polowania drapieżników w czasie

Powyższe listingi tworzą wykresy korelacji między różnymi cechami ofiar i drapieżników, takimi jak prędkość, rozmiar, energia, próg reprodukcji oraz efektywność polowania. Wykresy przedstawiają zmiany tych cech w czasie.

```
df = pd.DataFrame({
    "Generation": generations,
    "Organism Reproduction Threshold": organism_avg_reproduction_threshold_list,
    "Predator Hunting Efficiency": predator_avg_hunting_efficiency_list
})

plt.figure(figsize=(8, 6))
sns.scatterplot(x="Organism Reproduction Threshold", y="Predator Hunting Efficiency",
                 hue="Generation", size="Generation", sizes=(20, 200), data=df,
                 palette="coolwarm")
plt.xlabel("Organism Reproduction Threshold")
plt.ylabel("Predator Hunting Efficiency")
plt.title("Correlation Between Reproduction and Hunting Efficiency")
plt.legend(title="Generation", bbox_to_anchor=(1, 1))
plt.savefig("correlation_reproduction_hunting.png")
```

Listing 45: Korelacja między progiem reprodukcji ofiar i efektywnością polowania drapieżników

Listing 45 przedstawia korelację między progiem reprodukcji ofiar i efektywnością polowania drapieżników. Na osi X znajduje się próg reprodukcji ofiar, a na osi Y efektywność polowania drapieżników. Wykres przedstawia korelację między tymi dwoma cechami.

## 5.4. Wyniki

Przedstawię kilka scenariuszy symulacji z różnymi ustawieniami konfiguracyjnymi.

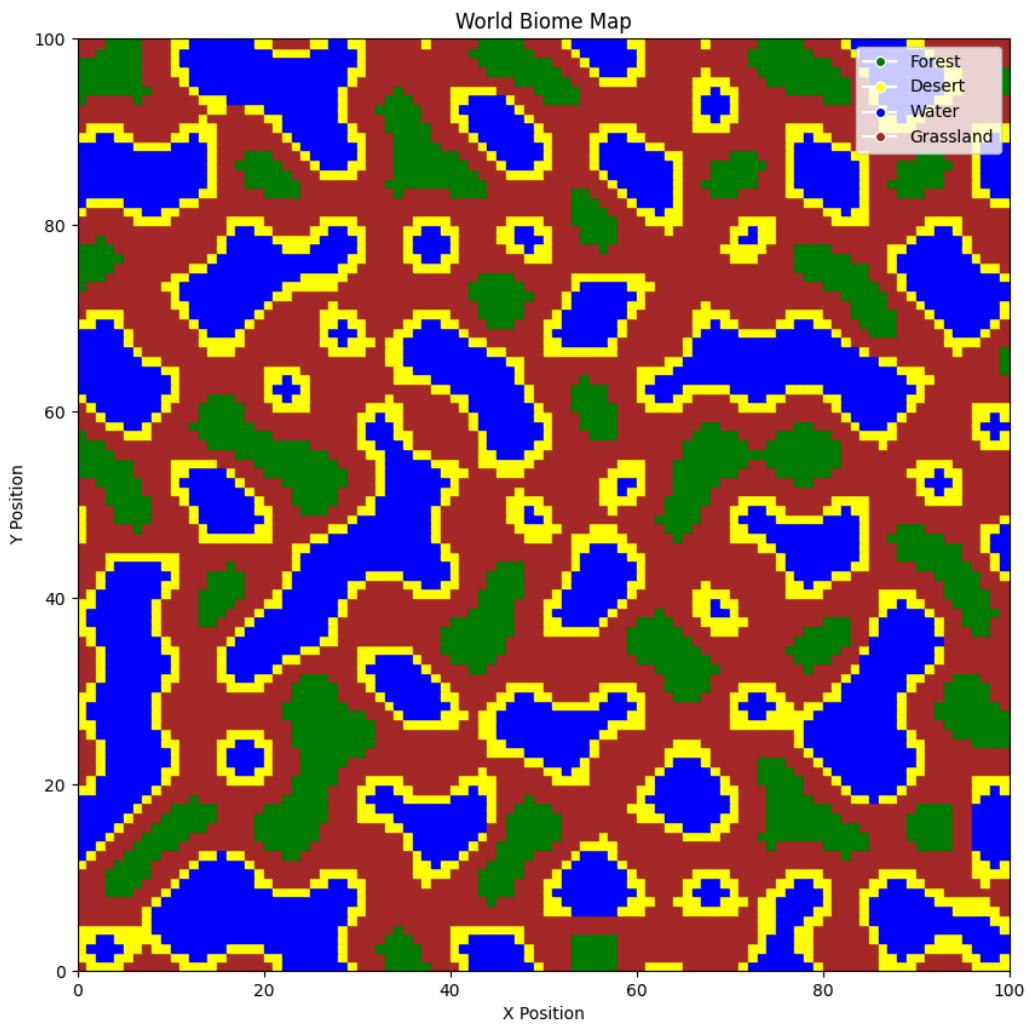


Figure 1: Plansza świata z rodzajami terenów

#### 5.4.1. Scenariusz 1 - Wpływ poziomu mutacji na adaptację populacji

Sprawdzam jak zmienia się zdolność przetrwania ofiar i drapieżników w zależności od poziomu mutacji.

- Konfiguracja pierwszego wariantu scenariusza (bardzo niski poziom mutacji):
  - Początkowa liczba ofiar: 5
  - Początkowa liczba drapieżników: 5
  - Poziom mutacji ofiar: 0.01
  - Poziom mutacji drapieżników: 0.01
- Konfiguracja drugiego wariantu scenariusza (niski poziom mutacji):
  - Początkowa liczba ofiar: 5
  - Początkowa liczba drapieżników: 5
  - Poziom mutacji ofiar: 0.05
  - Poziom mutacji drapieżników: 0.05
- Konfiguracja trzeciego wariantu scenariusza (średni poziom mutacji):
  - Początkowa liczba ofiar: 5
  - Początkowa liczba drapieżników: 5

- ▶ Poziom mutacji ofiar: 0.1
- ▶ Poziom mutacji drapieżników: 0.1
- Konfiguracja czwartego wariantu scenariusza (wysoki poziom mutacji):
  - ▶ Początkowa liczba ofiar: 5
  - ▶ Początkowa liczba drapieżników: 5
  - ▶ Poziom mutacji ofiar: 0.2
  - ▶ Poziom mutacji drapieżników: 0.2

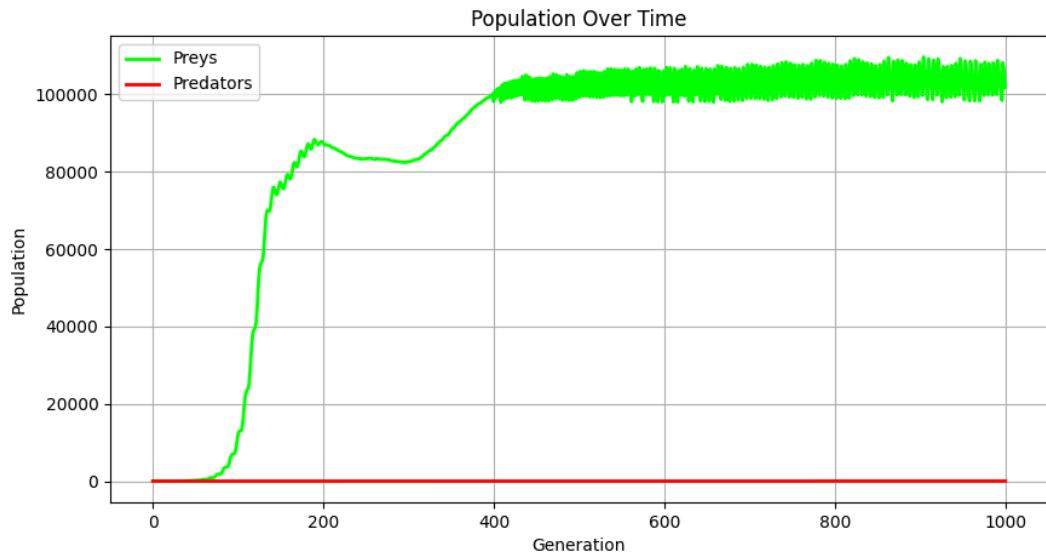


Figure 2: Wykres populacji ofiar i drapieżników w czasie (bardzo niski poziom mutacji)

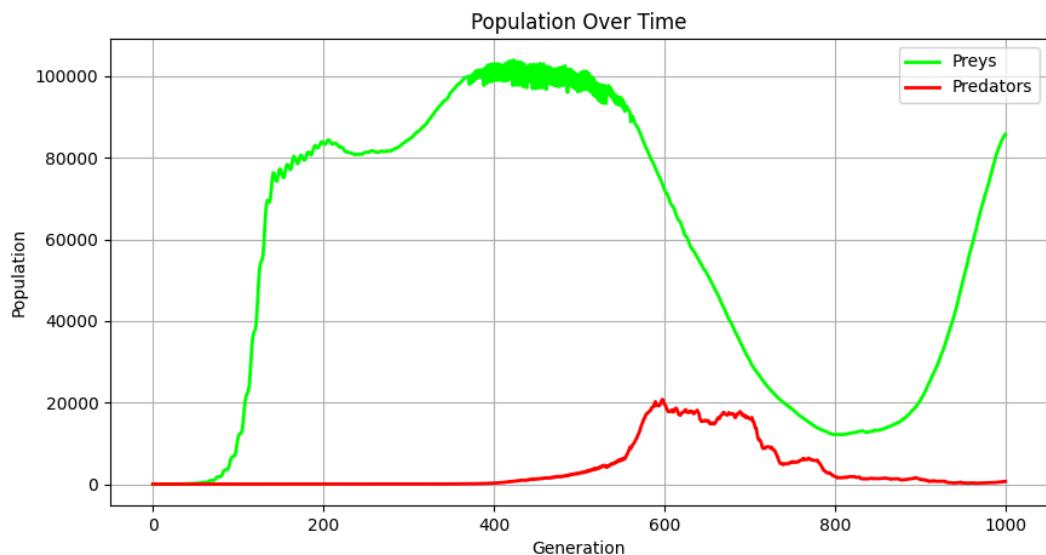


Figure 3: Wykres populacji ofiar i drapieżników w czasie (niski poziom mutacji)

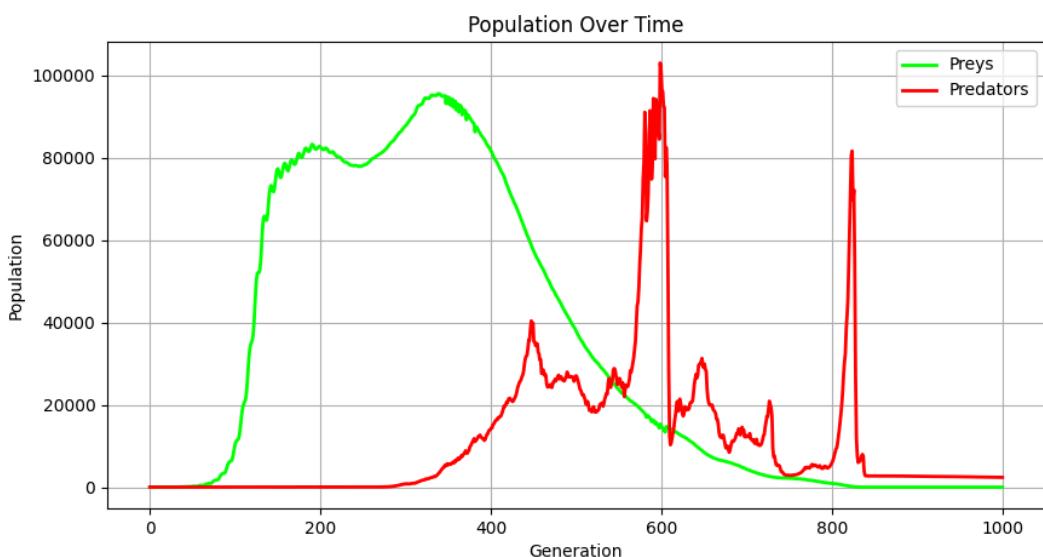


Figure 4: Wykres populacji ofiar i drapieżników w czasie (średni poziom mutacji)

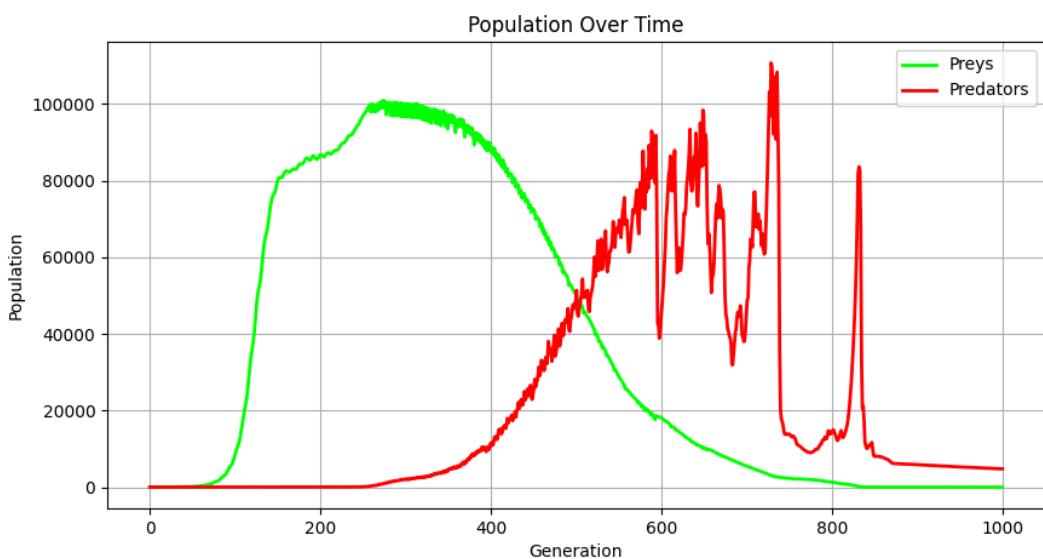


Figure 5: Wykres populacji ofiar i drapieżników w czasie (wysoki poziom mutacji)

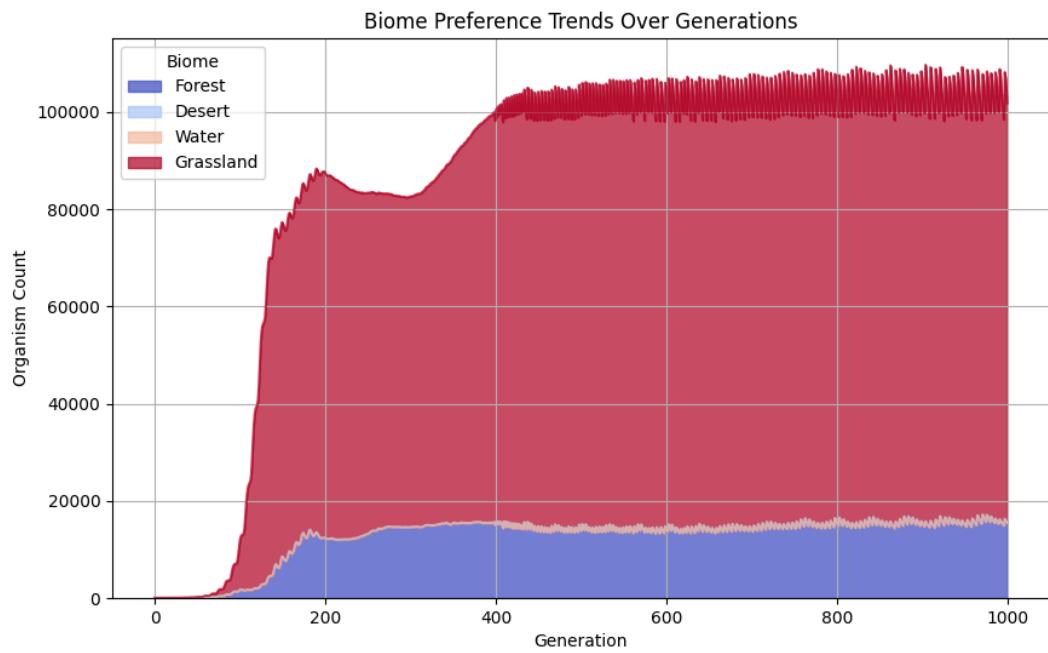


Figure 6: Trendy preferencji terenowych ofiar w czasie (bardzo niski poziom mutacji)

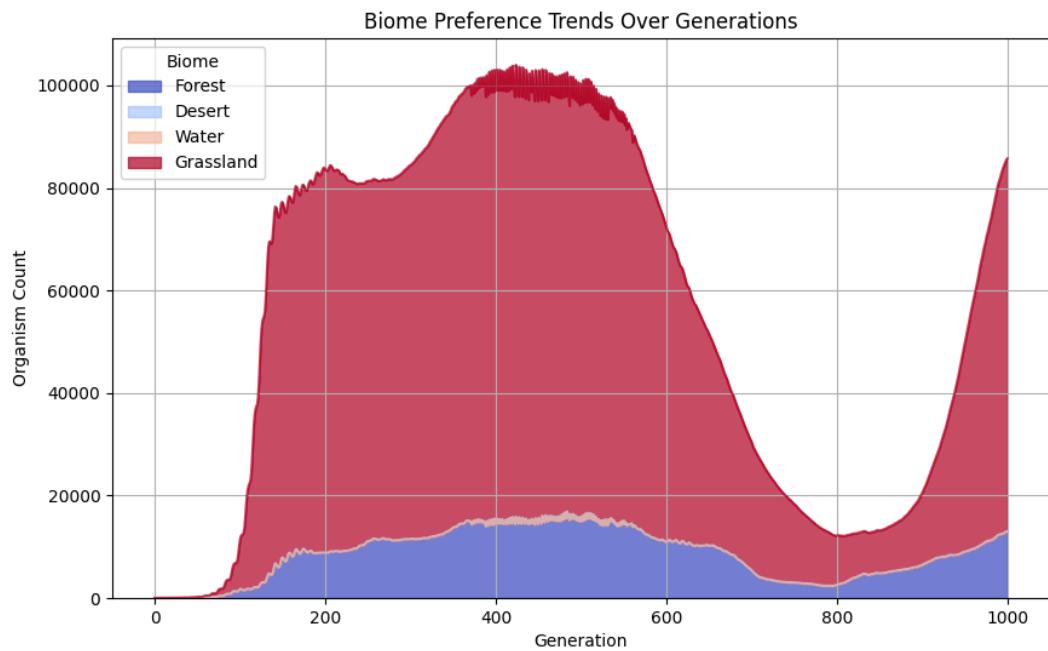


Figure 7: Trendy preferencji terenowych ofiar w czasie (niski poziom mutacji)

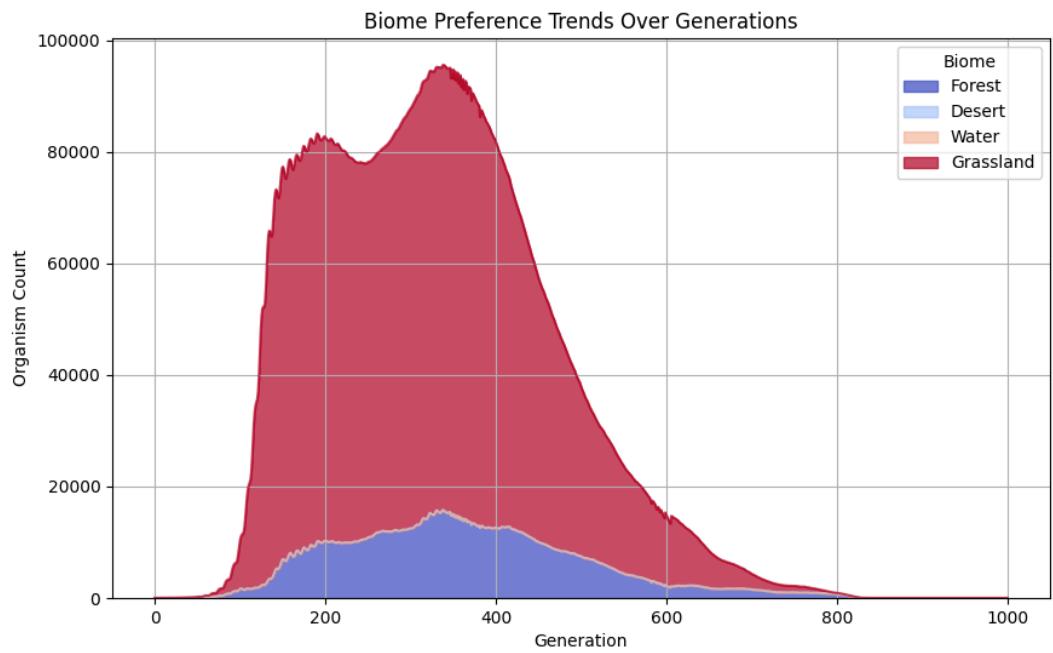


Figure 8: Trendy preferencji terenowych ofiar w czasie (średni poziom mutacji)

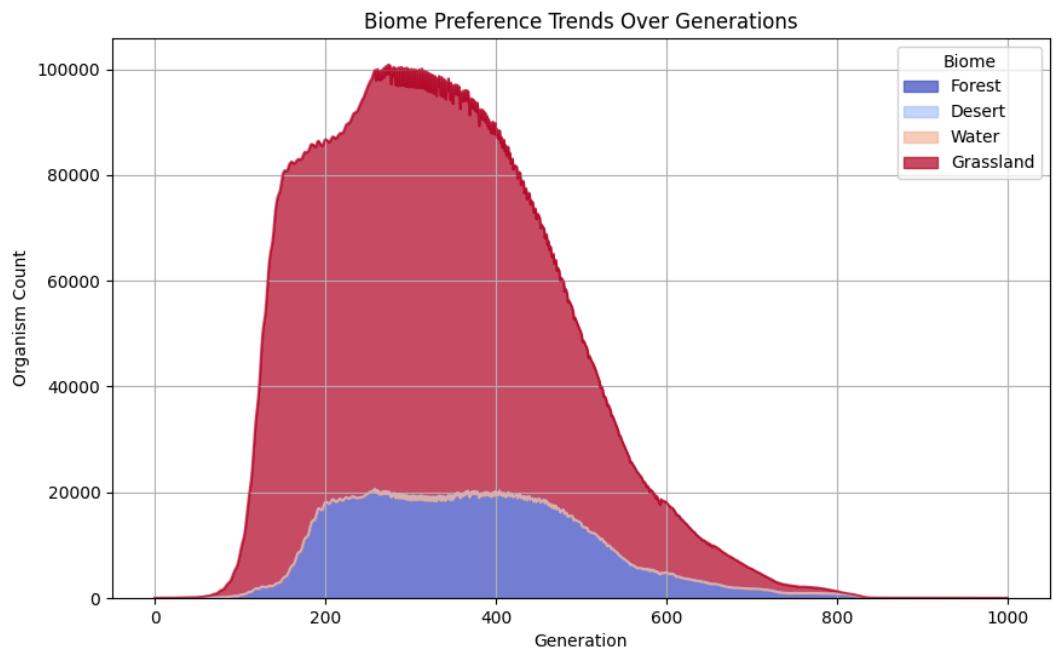


Figure 9: Trendy preferencji terenowych ofiar w czasie (wysoki poziom mutacji)

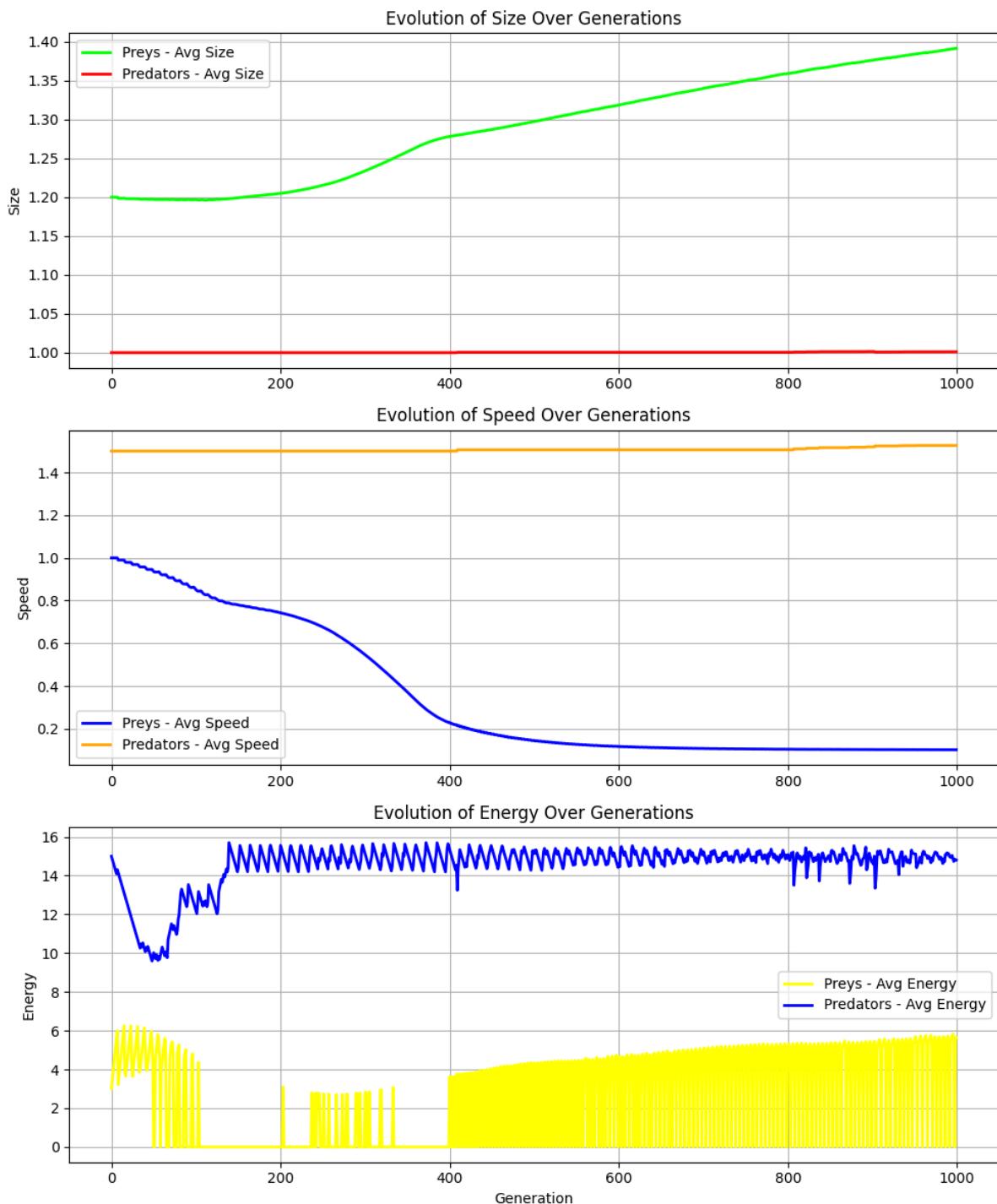


Figure 10: Ewolucja cech ofiar i drapieżników w czasie (bardzo niski poziom mutacji)

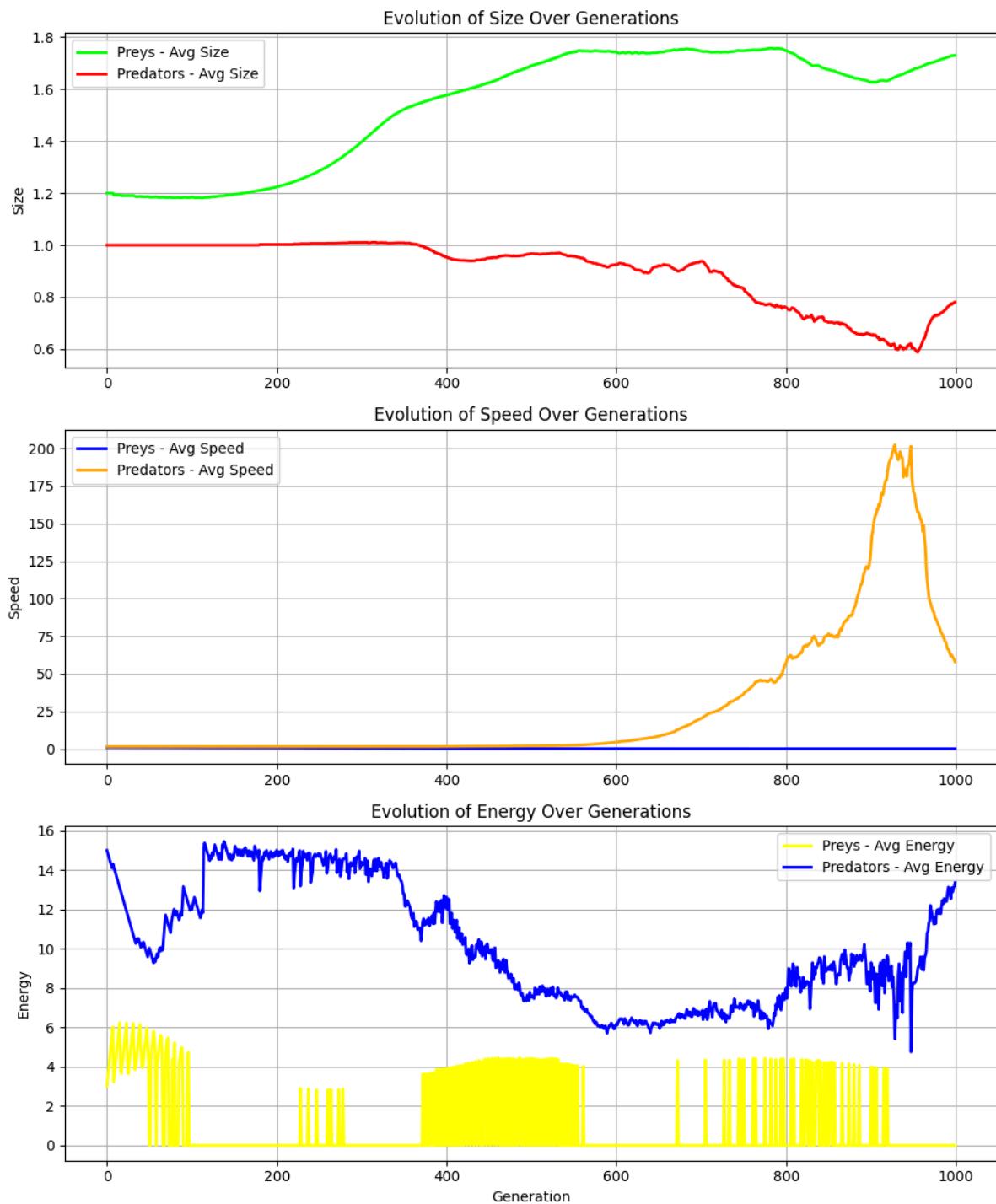


Figure 11: Ewolucja cech ofiar i drapieżników w czasie (niski poziom mutacji)

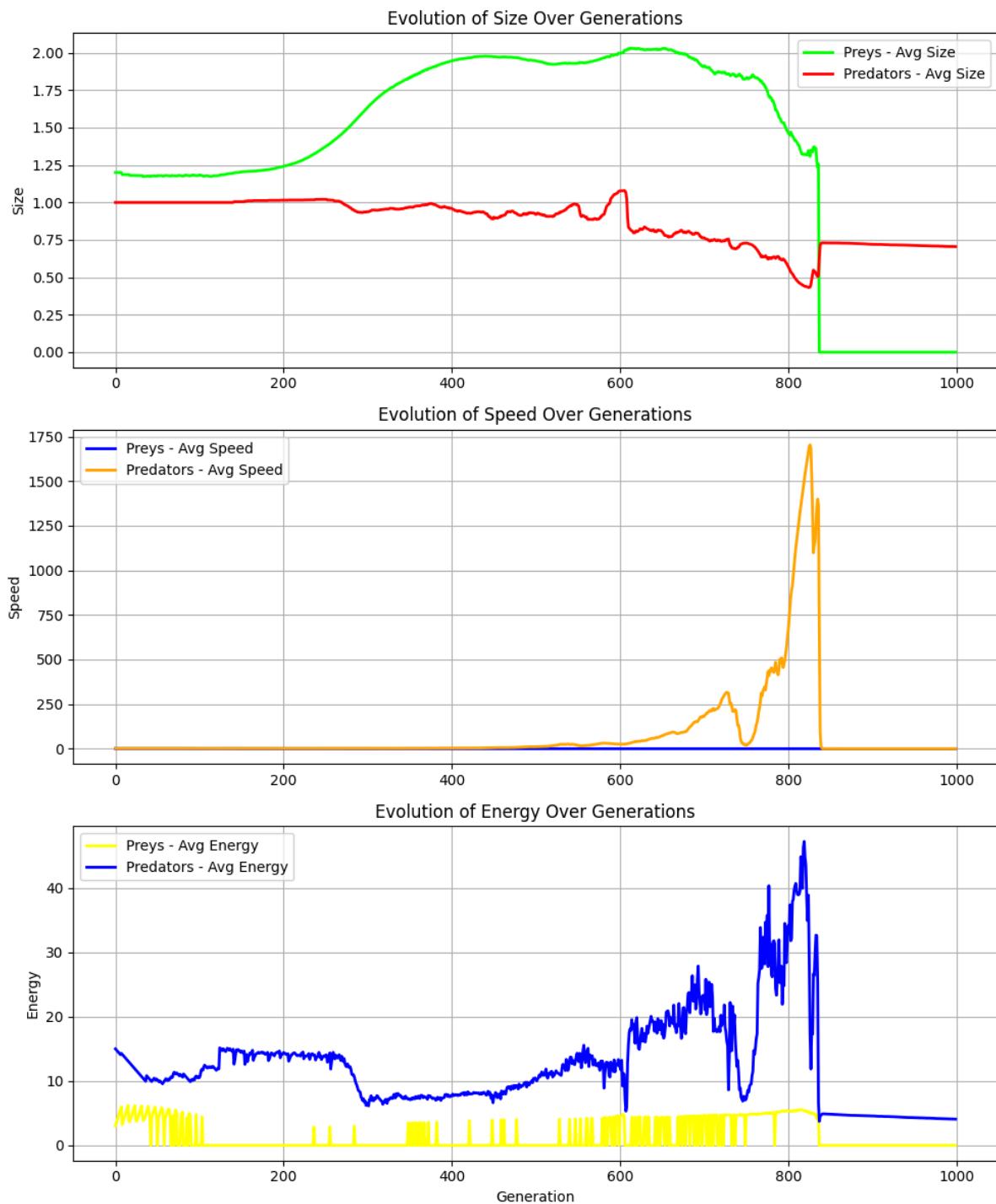


Figure 12: Ewolucja cech ofiar i drapieżników w czasie (średni poziom mutacji)

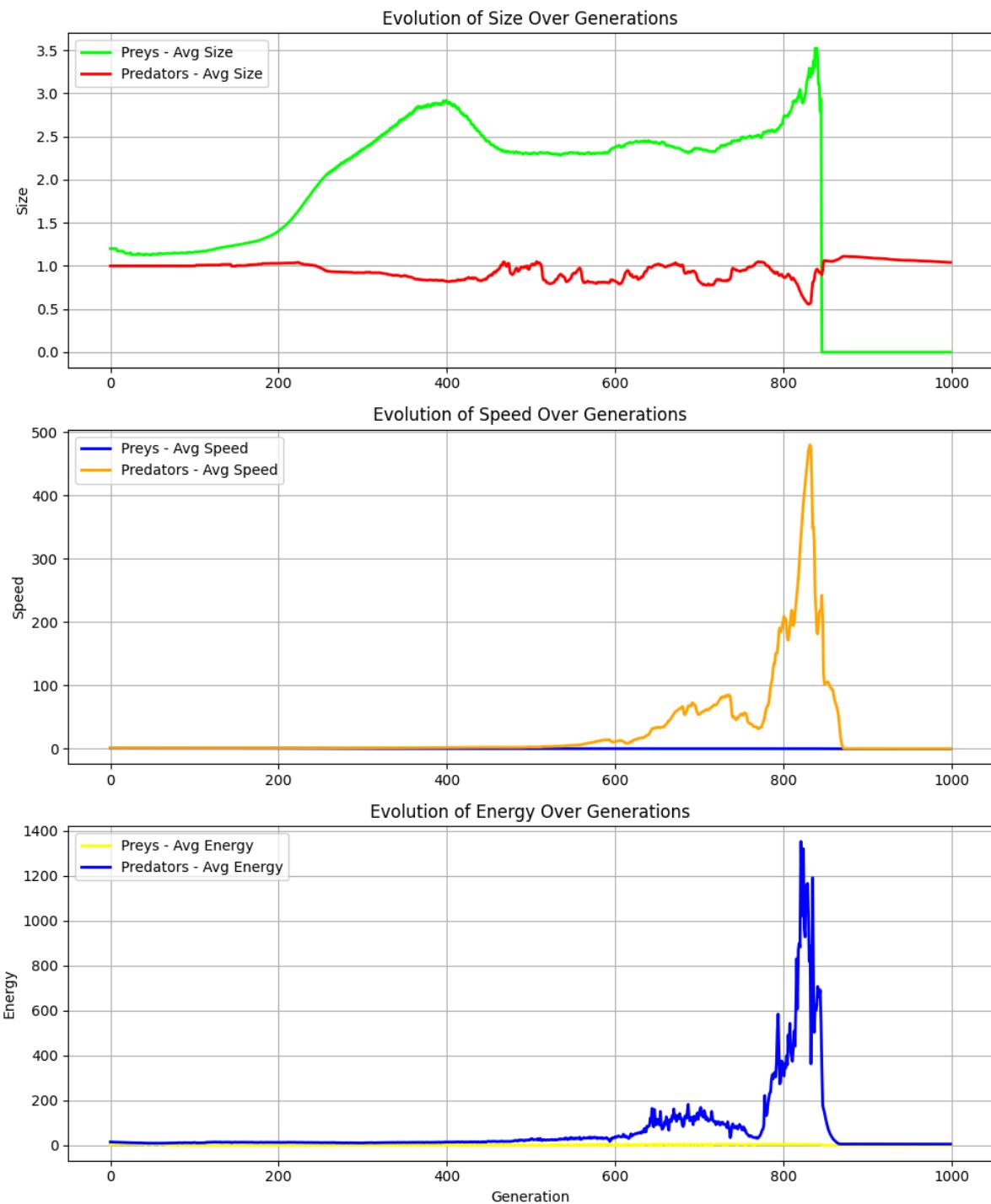


Figure 13: Ewolucja cech ofiar i drapieżników w czasie (wysoki poziom mutacji)

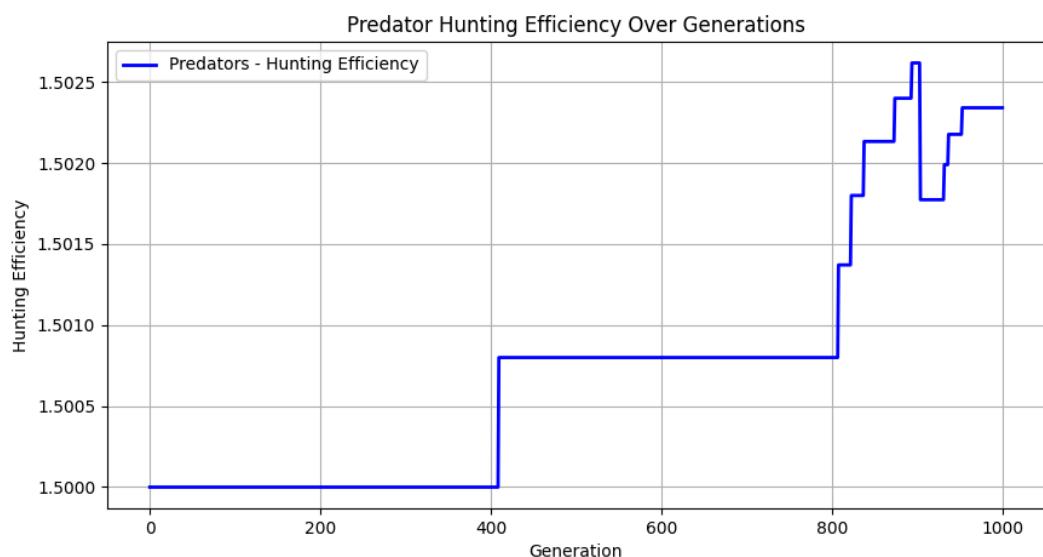


Figure 14: Wydajność polowania drapieżników w czasie (bardzo niski poziom mutacji)

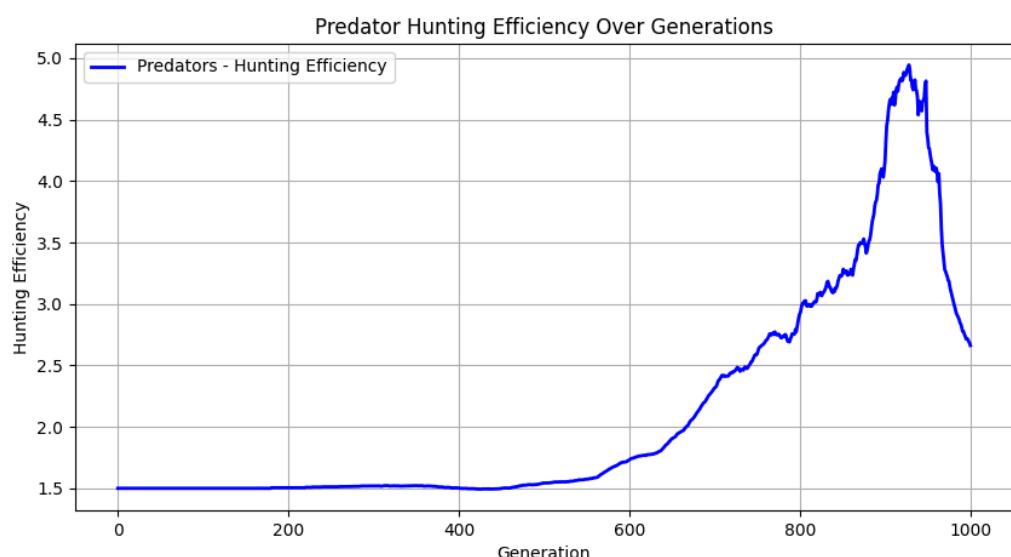


Figure 15: Wydajność polowania drapieżników w czasie (niski poziom mutacji)

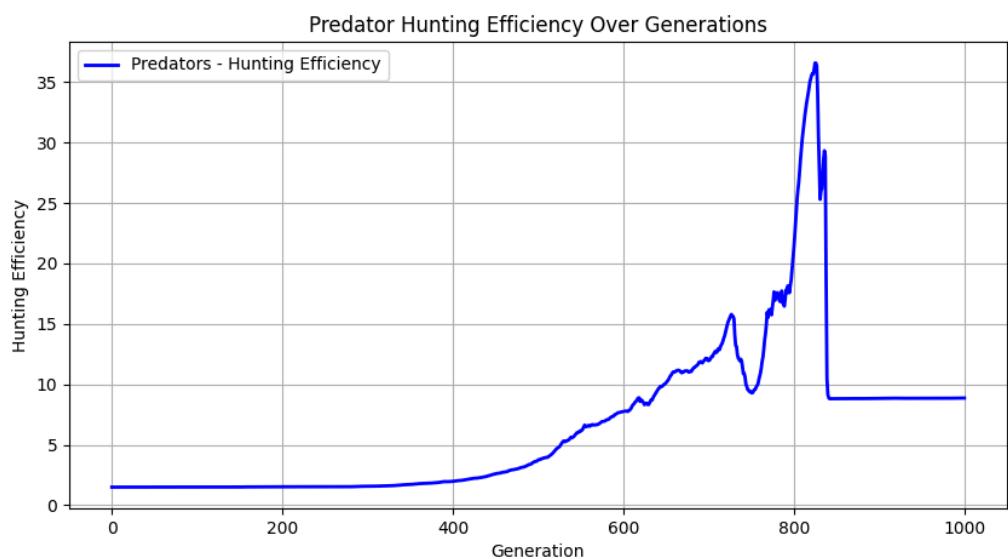


Figure 16: Wydajność polowania drapieżników w czasie (średni poziom mutacji)

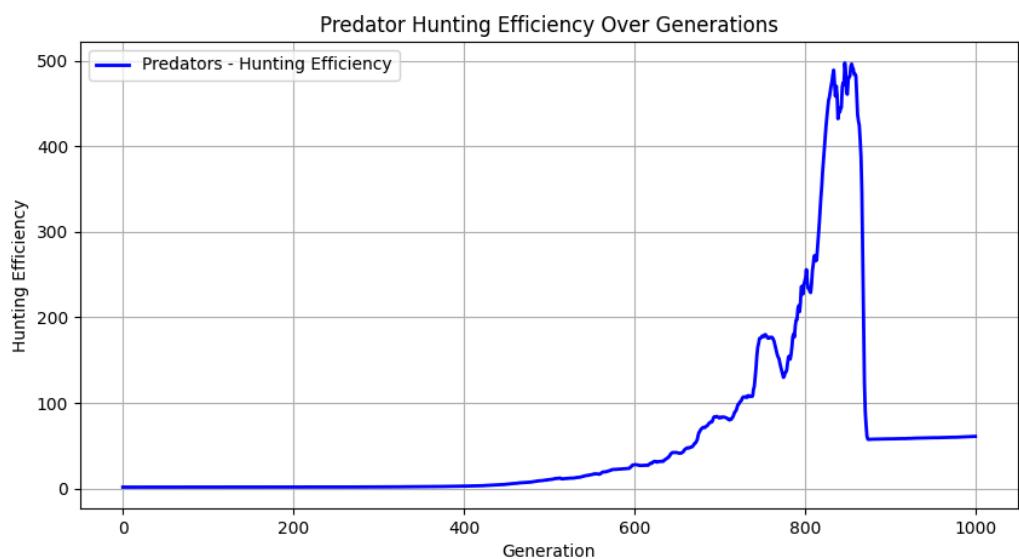


Figure 17: Wydajność polowania drapieżników w czasie (wysoki poziom mutacji)

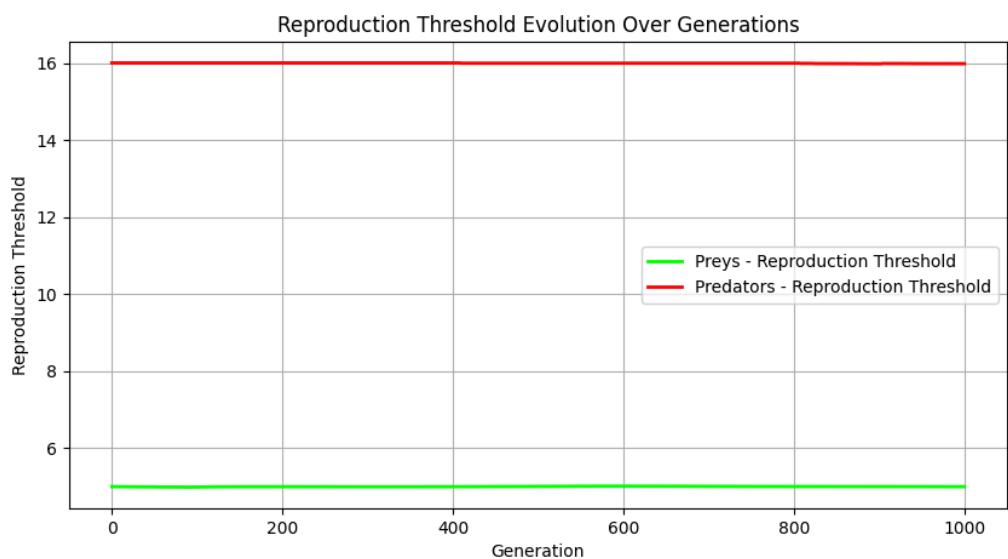


Figure 18: Trendy progu reprodukcji ofiar i drapieżników w czasie (bardzo niski poziom mutacji)

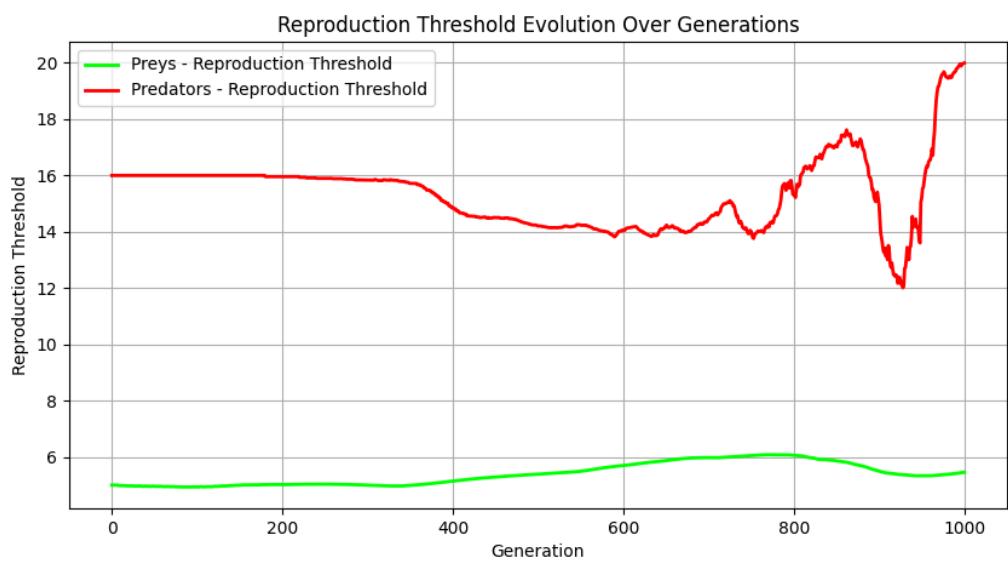


Figure 19: Trendy progu reprodukcji ofiar i drapieżników w czasie (niski poziom mutacji)

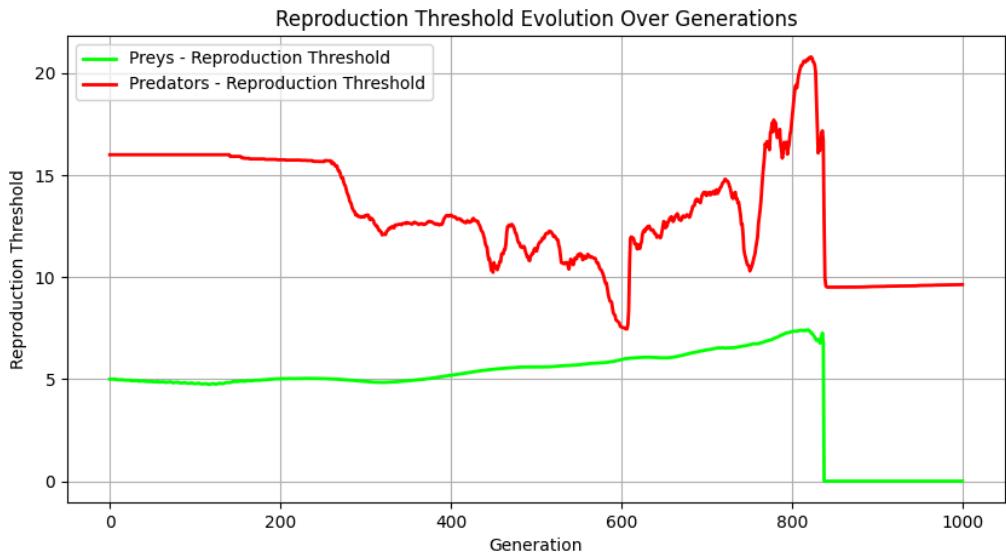


Figure 20: Trendy progu reprodukcji ofiar i drapieżników w czasie (średni poziom mutacji)

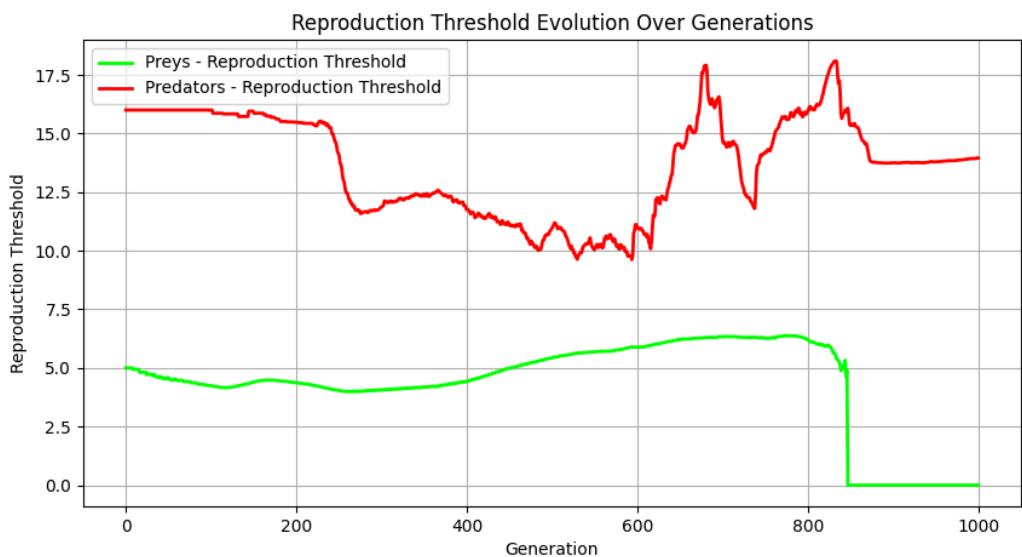


Figure 21: Trendy progu reprodukcji ofiar i drapieżników w czasie (wysoki poziom mutacji)

#### 5.4.2. Scenariusz 2 - Wpływ drapieżników na populację ofiar

Sprawdzam czy ofiary bez drapieżników szybciej się rozmnażają i może nawet cierpią z powodu przeludnienia oraz jak silna presja drapieżników wpływa na populację ofiar.

- Konfiguracja pierwszego wariantu scenariusza (brak drapieżników):
  - Początkowa liczba ofiar: 10
  - Początkowa liczba drapieżników: 0
  - Poziom mutacji ofiar: 0.1
- Konfiguracja drugiego wariantu scenariusza (normalna presja drapieżników):
  - Początkowa liczba ofiar: 10
  - Początkowa liczba drapieżników: 5
  - Poziom mutacji ofiar: 0.1
  - Poziom mutacji drapieżników: 0.1
- Konfiguracja trzeciego wariantu scenariusza (wysoka presja drapieżników):
  - Początkowa liczba ofiar: 10

- ▶ Początkowa liczba drapieżników: 40
- ▶ Poziom mutacji ofiar: 0.1
- ▶ Poziom mutacji drapieżników: 0.1

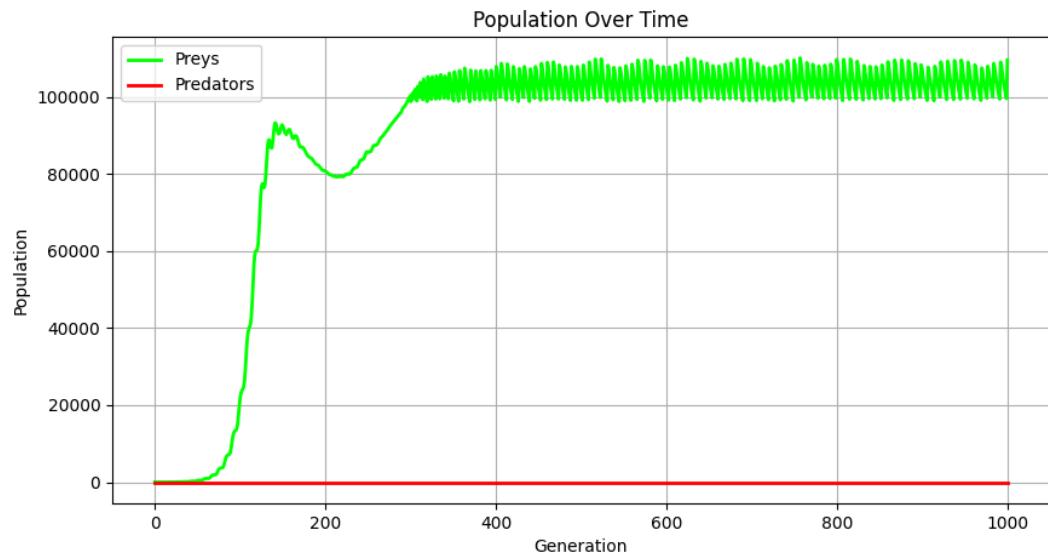


Figure 22: Wykres populacji ofiar i drapieżników w czasie (brak drapieżników)

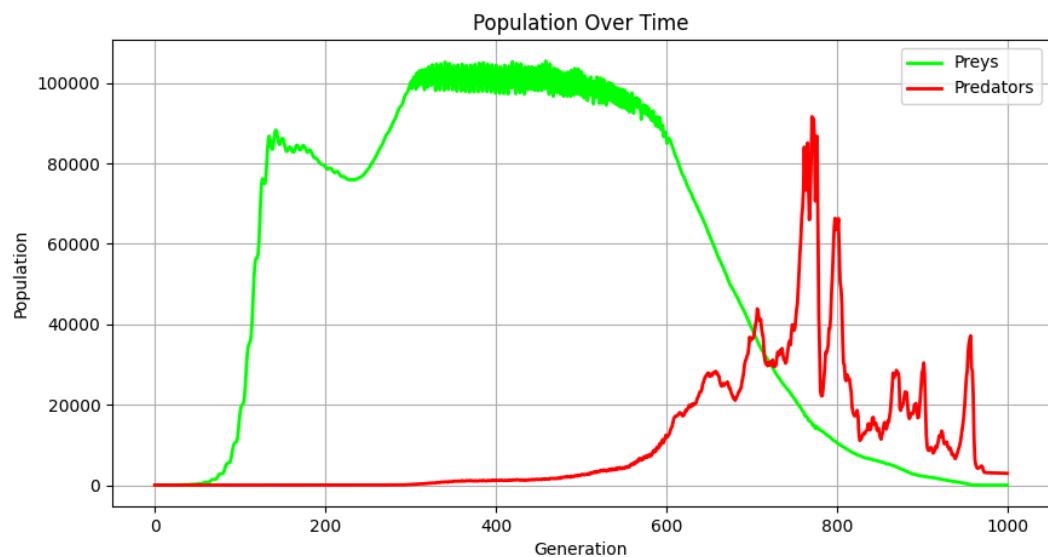


Figure 23: Wykres populacji ofiar i drapieżników w czasie (normalna presja drapieżników)

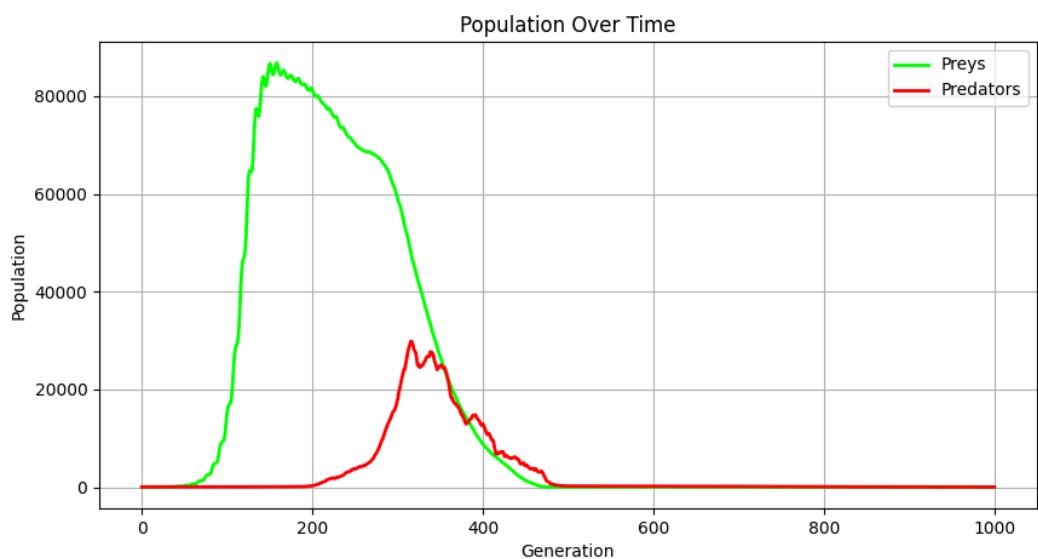


Figure 24: Wykres populacji ofiar i drapieżników w czasie (wysoka presja drapieżników)

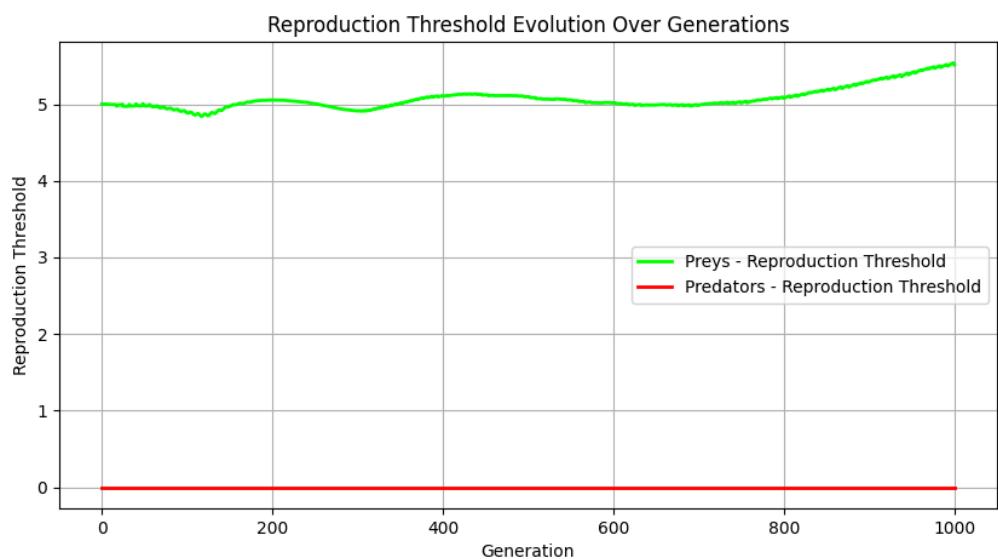


Figure 25: Trendy progu reprodukcji ofiar i drapieżników w czasie (brak drapieżników)

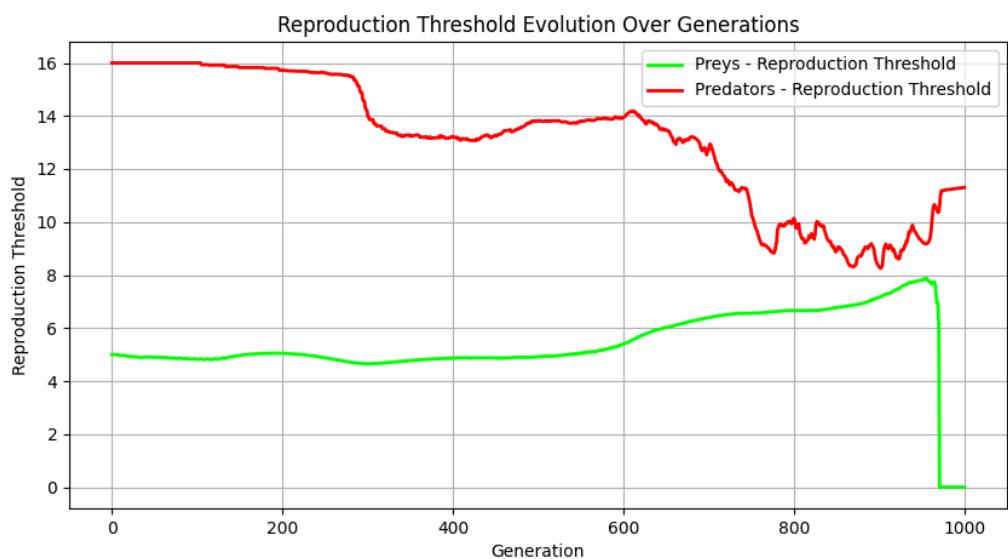


Figure 26: Trendy progu reprodukcji ofiar i drapieżników w czasie (normalna presja drapieżników)

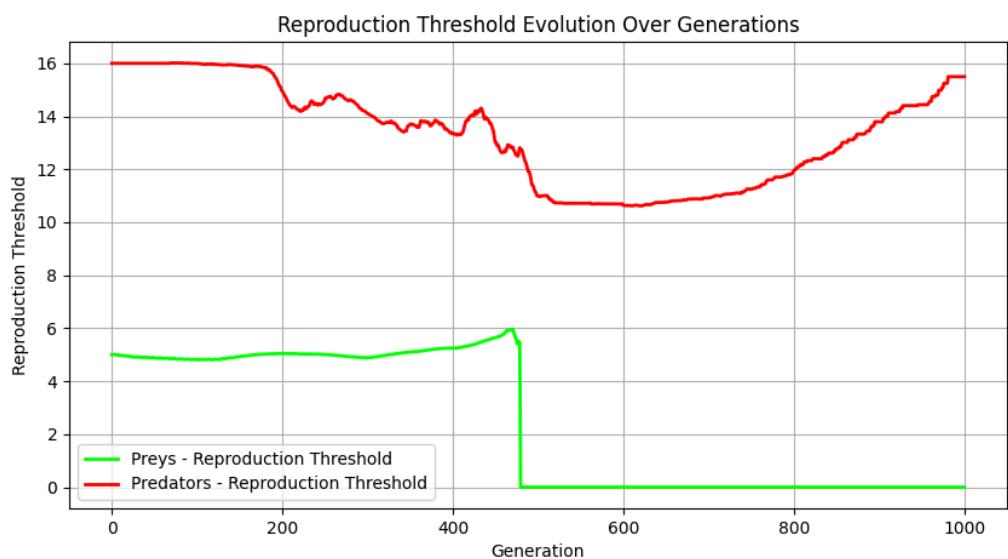


Figure 27: Trendy progu reprodukcji ofiar i drapieżników w czasie (wysoka presja drapieżników)

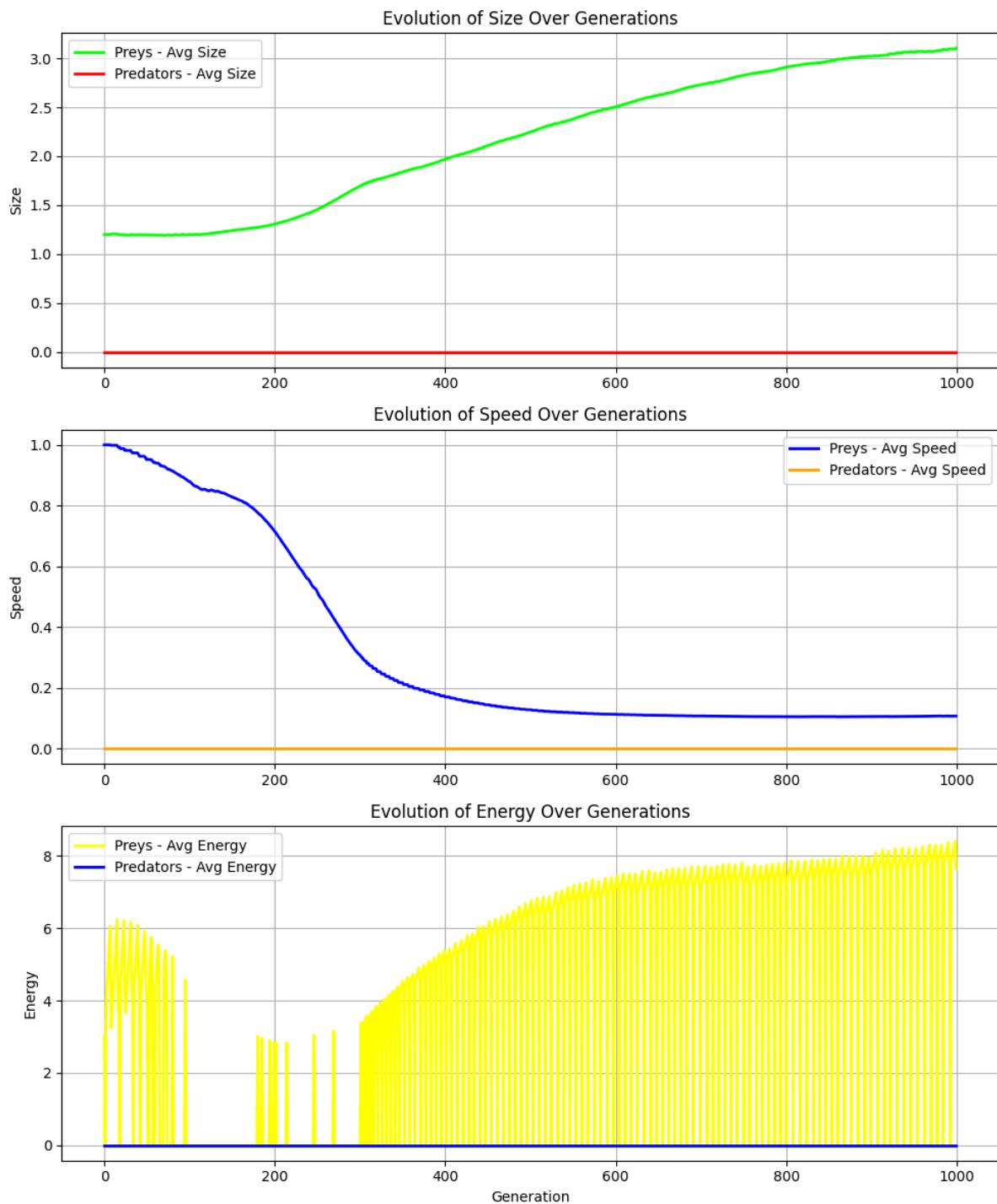


Figure 28: Ewolucja cech ofiar i drapieżników w czasie (brak drapieżników)

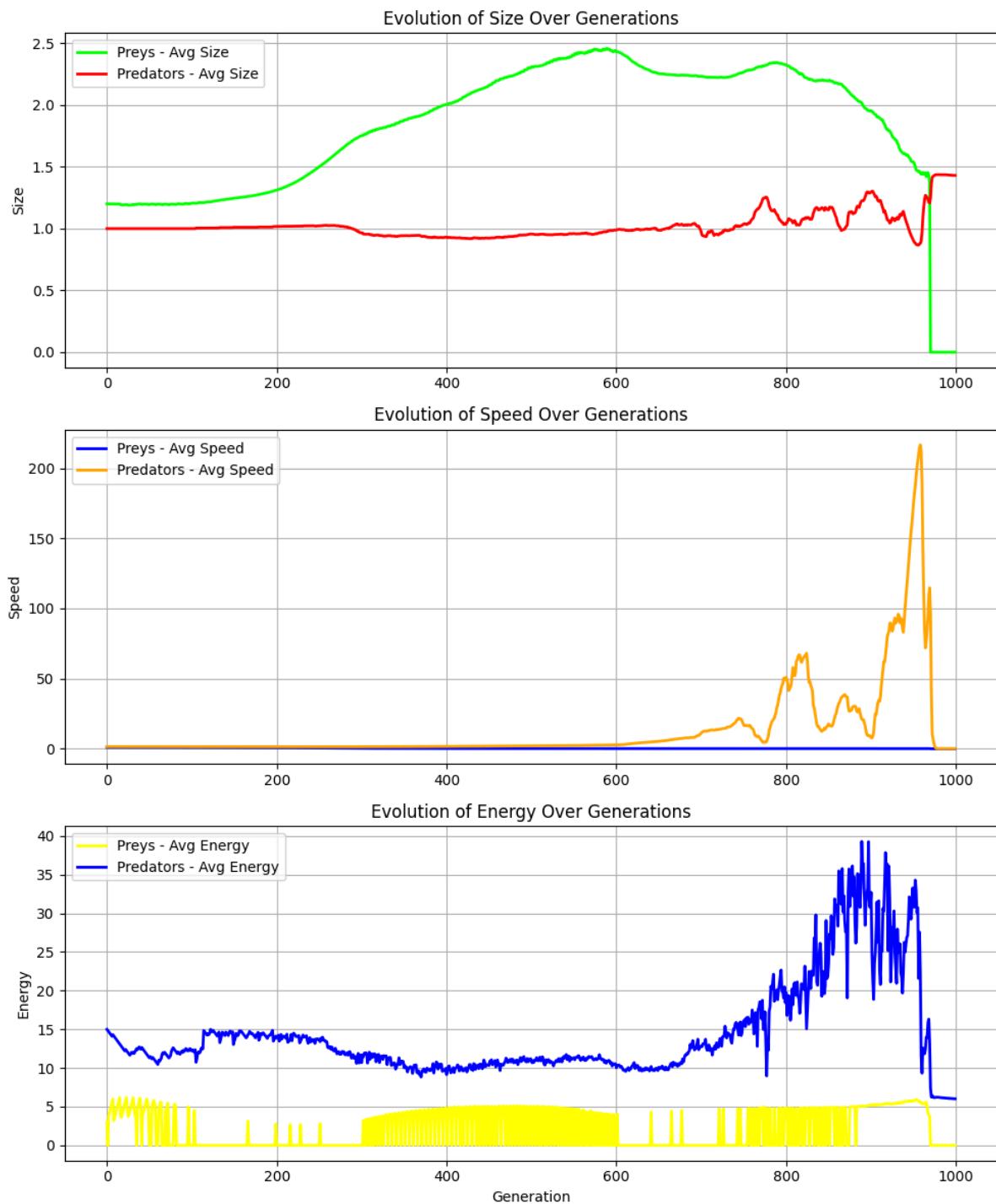


Figure 29: Ewolucja cech ofiar i drapieżników w czasie (normalna presja drapieżników)

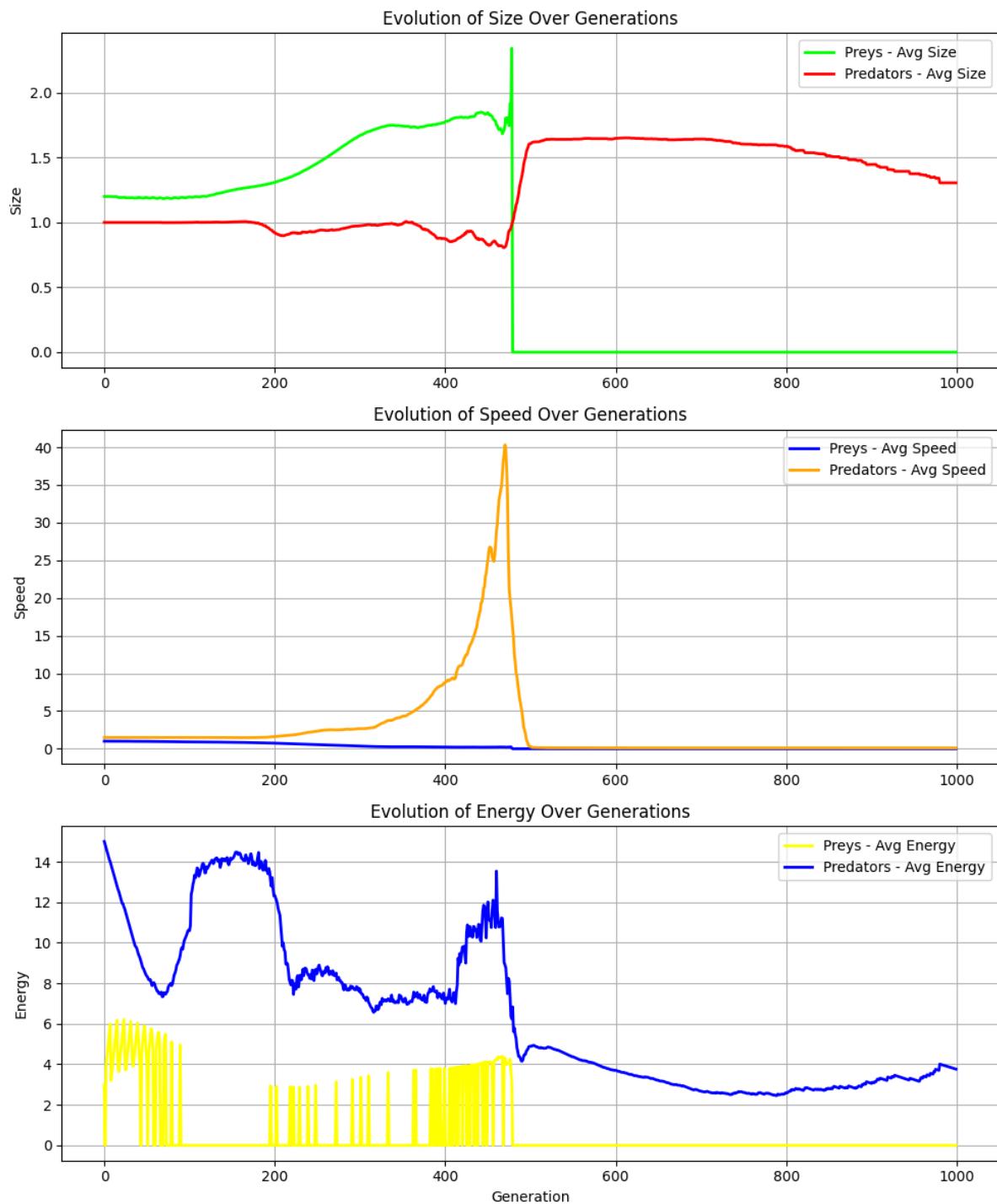


Figure 30: Ewolucja cech ofiar i drapieżników w czasie (wysoka presja drapieżników)

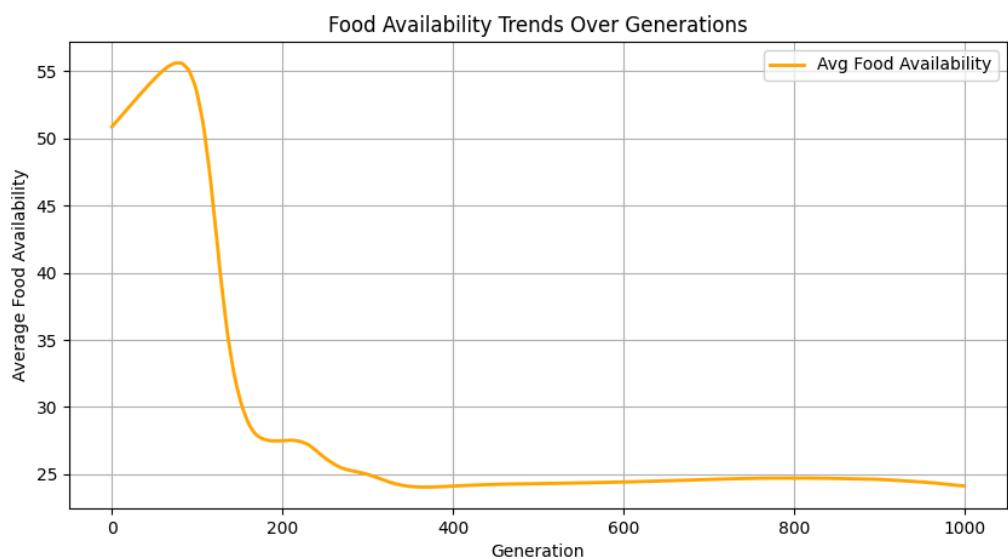


Figure 31: Dostępność jedzenia jedzenia w czasie (brak drapieżników)

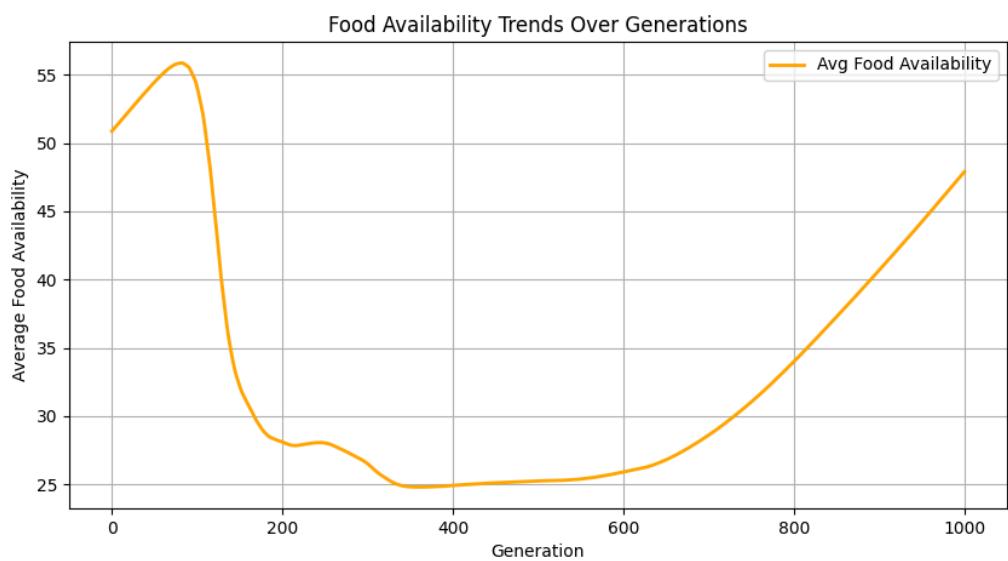


Figure 32: Dostępność jedzenia jedzenia w czasie (normalna presja drapieżników)

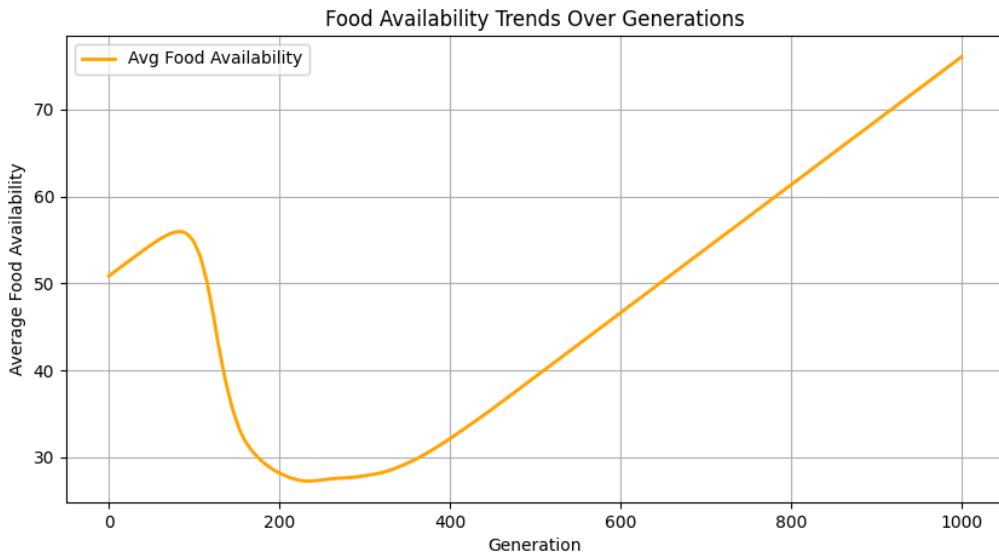


Figure 33: Dostępność jedzenia w czasie (wysoka presja drapieżników)

#### 5.4.3. Scenariusz 3 - Wpływ dostępności jedzenia na populację ofiar

Sprawdzam jak wpływa na populację zmiana zasobności środowiska w jedzenie. Czy organizmy lepiej przystosowują się do terenu bogatego w jedzenie? Czy populacja jest w stanie przetrwać w jałowym środowisku?

- Konfiguracja pierwszego wariantu scenariusza (jałowe środowisko, brak drapieżników):
  - Las - poziom regeneracji jedzenia: 0.05
  - Pustynia - poziom regeneracji jedzenia: 0.001
  - Woda - poziom regeneracji jedzenia: 0 - w tym terenie nie ma jedzenia
  - Teren trawiasty - poziom regeneracji jedzenia: 0.01
- Konfiguracja pierwszego wariantu scenariusza (jałowe środowisko):
  - Jak powyżej, natomiast ilość drapieżników wynosi 1
- Konfiguracja drugiego wariantu scenariusza (normalne środowisko, brak drapieżników):
  - Las - poziom regeneracji jedzenia: 0.2
  - Pustynia - poziom regeneracji jedzenia: 0.01
  - Woda - poziom regeneracji jedzenia: 0
  - Teren trawiasty - poziom regeneracji jedzenia: 0.1
- Konfiguracja drugiego wariantu scenariusza (normalne środowisko):
  - Jak powyżej, natomiast ilość drapieżników wynosi 1
- Konfiguracja trzeciego wariantu scenariusza (bardzo bogate środowisko, brak drapieżników):
  - Las - poziom regeneracji jedzenia: 0.4
  - Pustynia - poziom regeneracji jedzenia: 0.01
  - Woda - poziom regeneracji jedzenia: 0
  - Teren trawiasty - poziom regeneracji jedzenia: 0.3
- Konfiguracja trzeciego wariantu scenariusza (bardzo bogate środowisko):
  - Jak powyżej, natomiast ilość drapieżników wynosi 1

W każdej konfiguracji limit wszystkich organizmów wynosi 100 000.

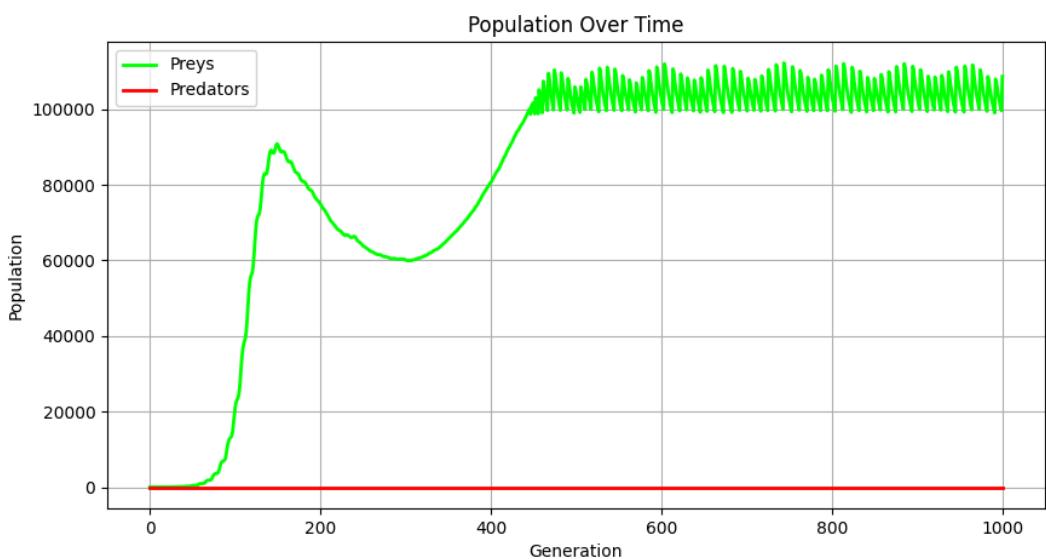


Figure 34: Wykres populacji ofiar i drapieżników w czasie (jałowe środowisko, brak drapieżników)

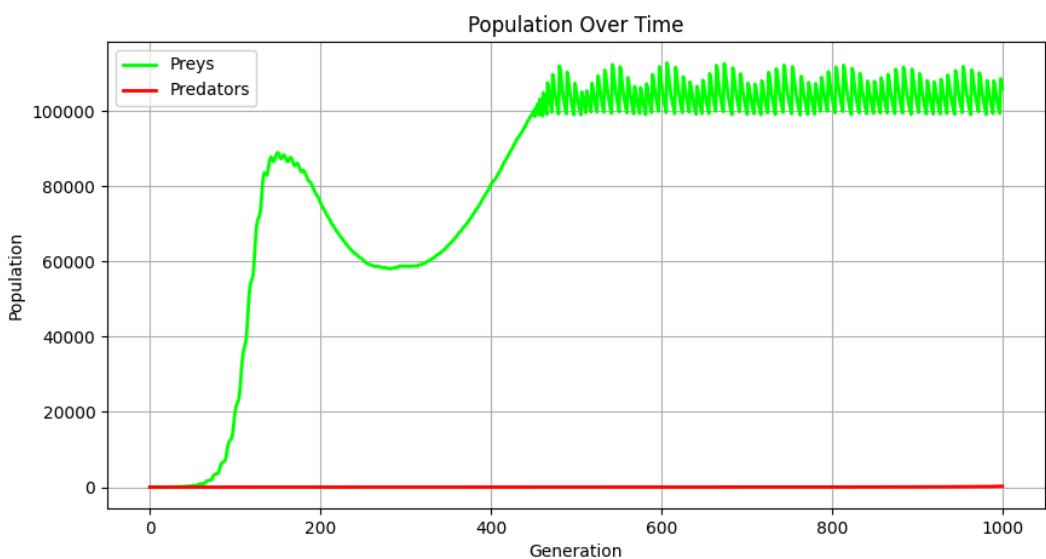


Figure 35: Wykres populacji ofiar i drapieżników w czasie (jałowe środowisko)

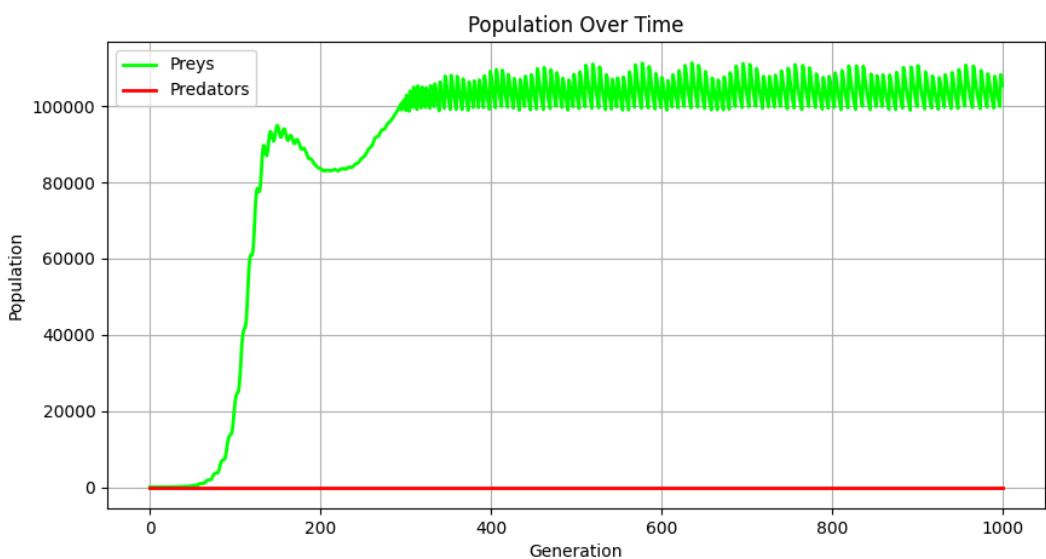


Figure 36: Wykres populacji ofiar i drapieżników w czasie (normalne środowisko, brak drapieżników)

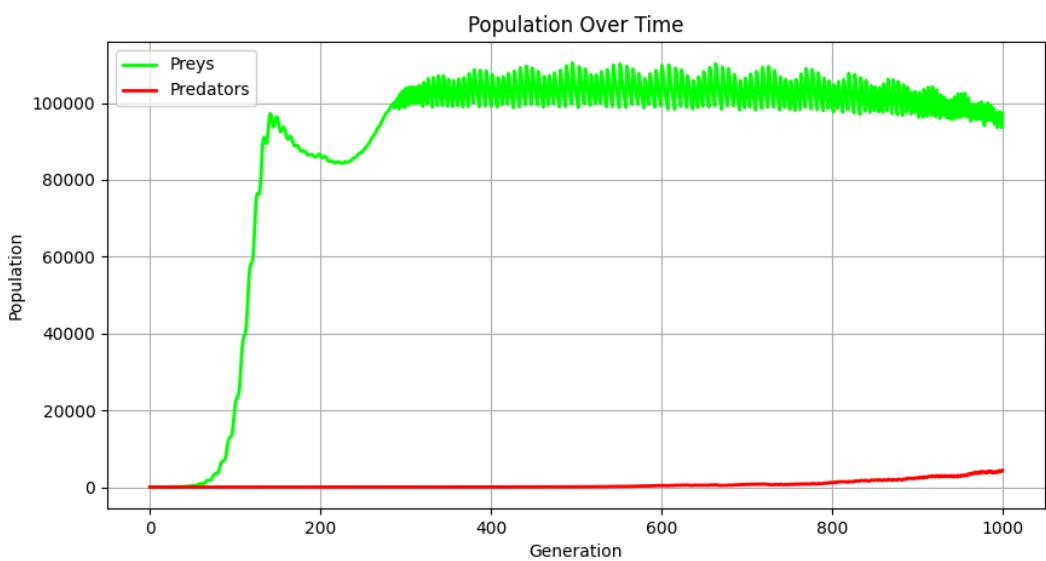


Figure 37: Wykres populacji ofiar i drapieżników w czasie (normalne środowisko)

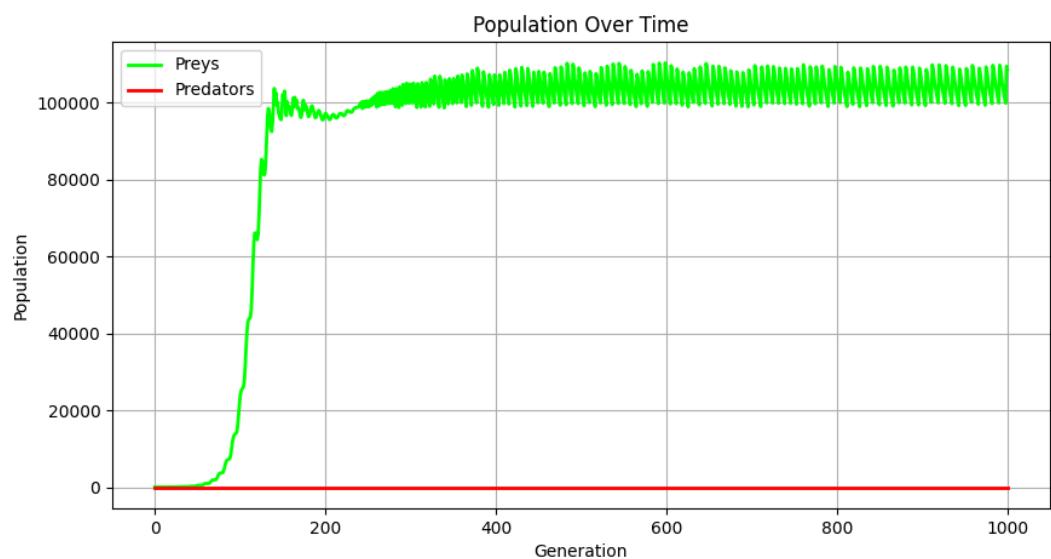


Figure 38: Wykres populacji ofiar i drapieżników w czasie (bardzo bogate środowisko, brak drapieżników)

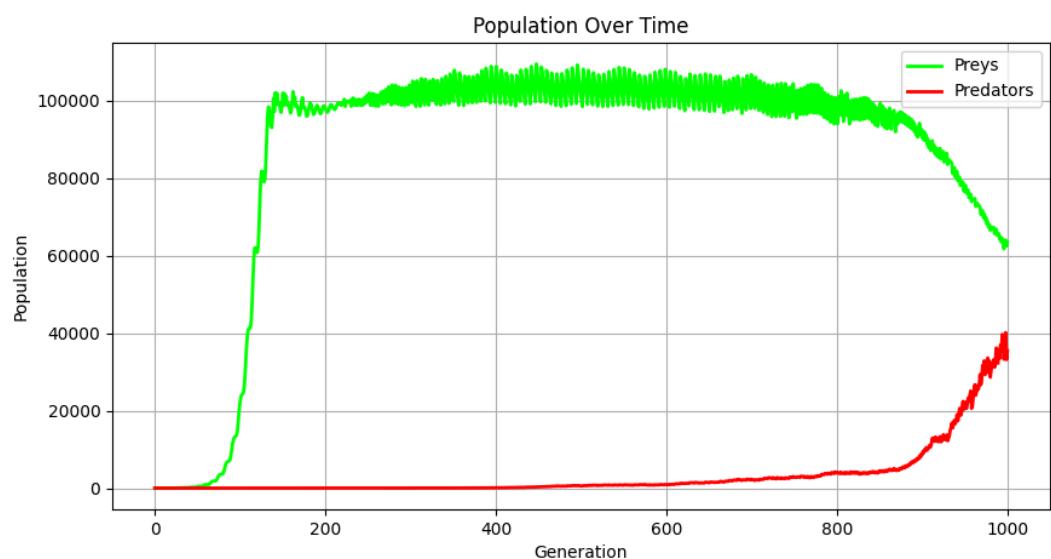


Figure 39: Wykres populacji ofiar i drapieżników w czasie (bardzo bogate środowisko)

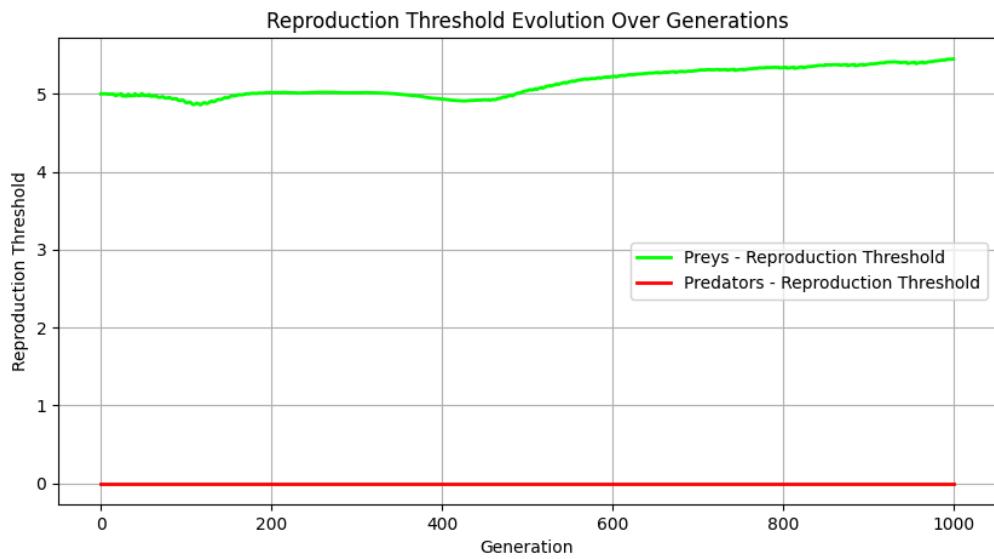


Figure 40: Trendy progu reprodukcji ofiar i drapieżników w czasie (jałowe środowisko, brak drapieżników)

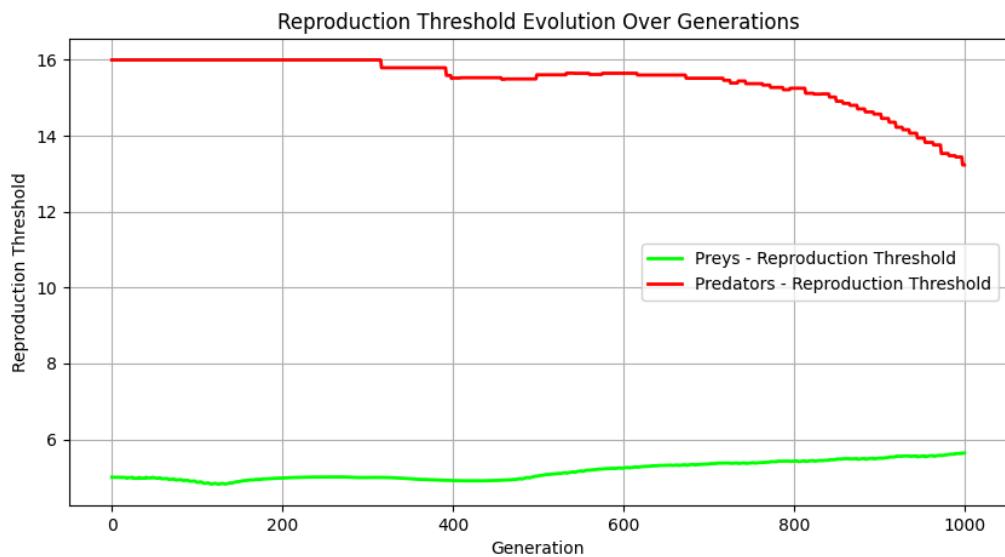


Figure 41: Trendy progu reprodukcji ofiar i drapieżników w czasie (jałowe środowisko)

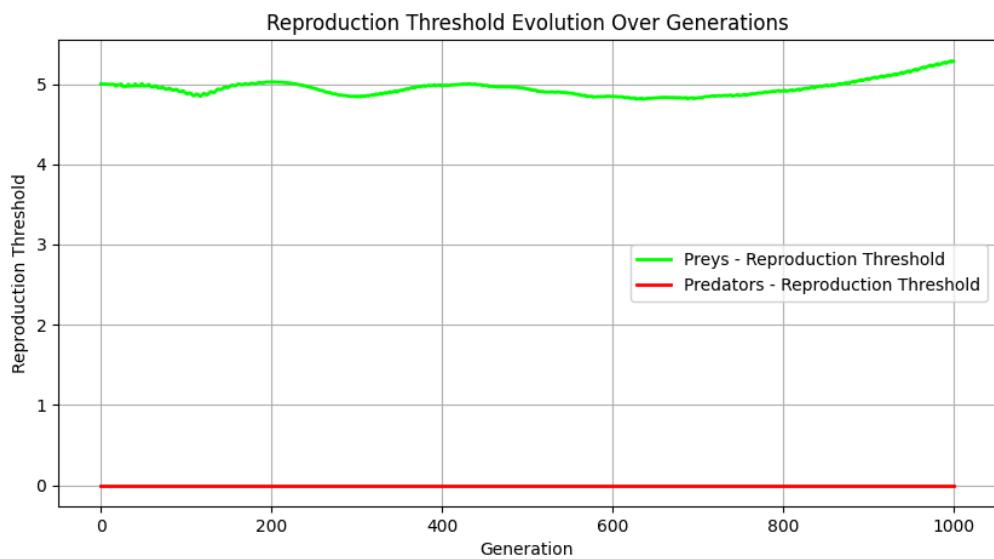


Figure 42: Trendy progu reprodukcji ofiar i drapieżników w czasie (normalne środowisko, brak drapieżników)

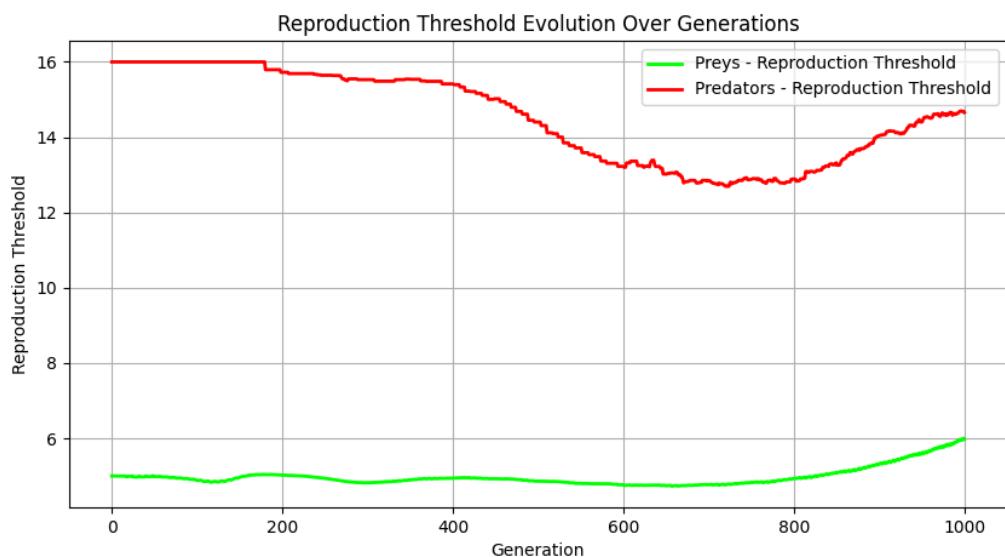


Figure 43: Trendy progu reprodukcji ofiar i drapieżników w czasie (normalne środowisko)

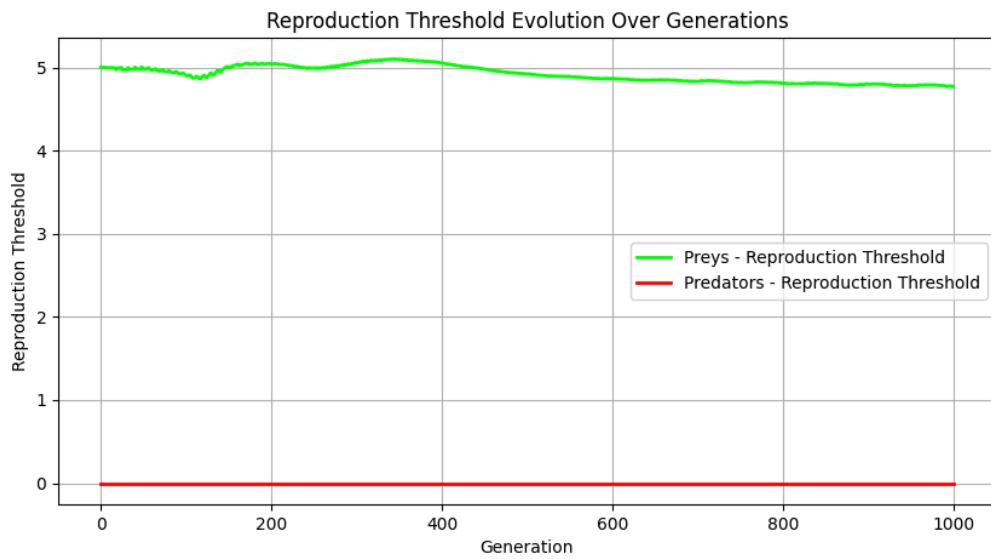


Figure 44: Trendy progu reprodukcji ofiar i drapieżników w czasie (bardzo bogate środowisko, brak drapieżników)

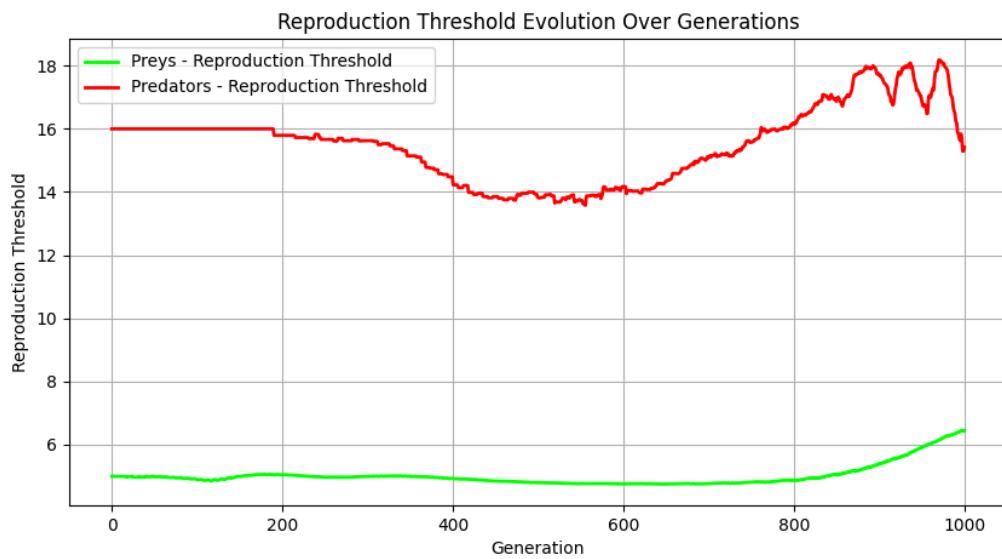


Figure 45: Trendy progu reprodukcji ofiar i drapieżników w czasie (bardzo bogate środowisko)

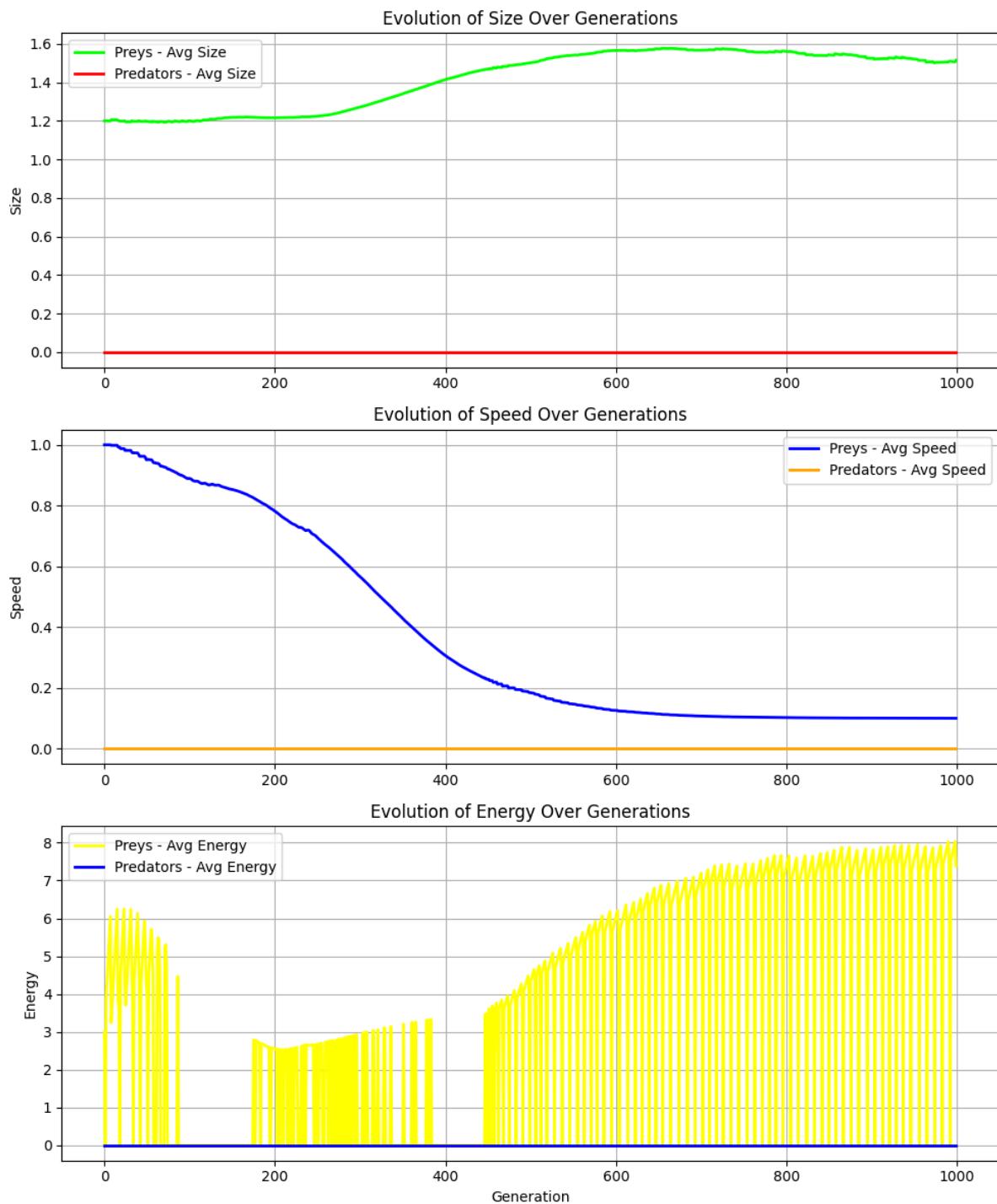


Figure 46: Ewolucja cech ofiar i drapieżników w czasie (jałowe środowisko, brak drapieżników)

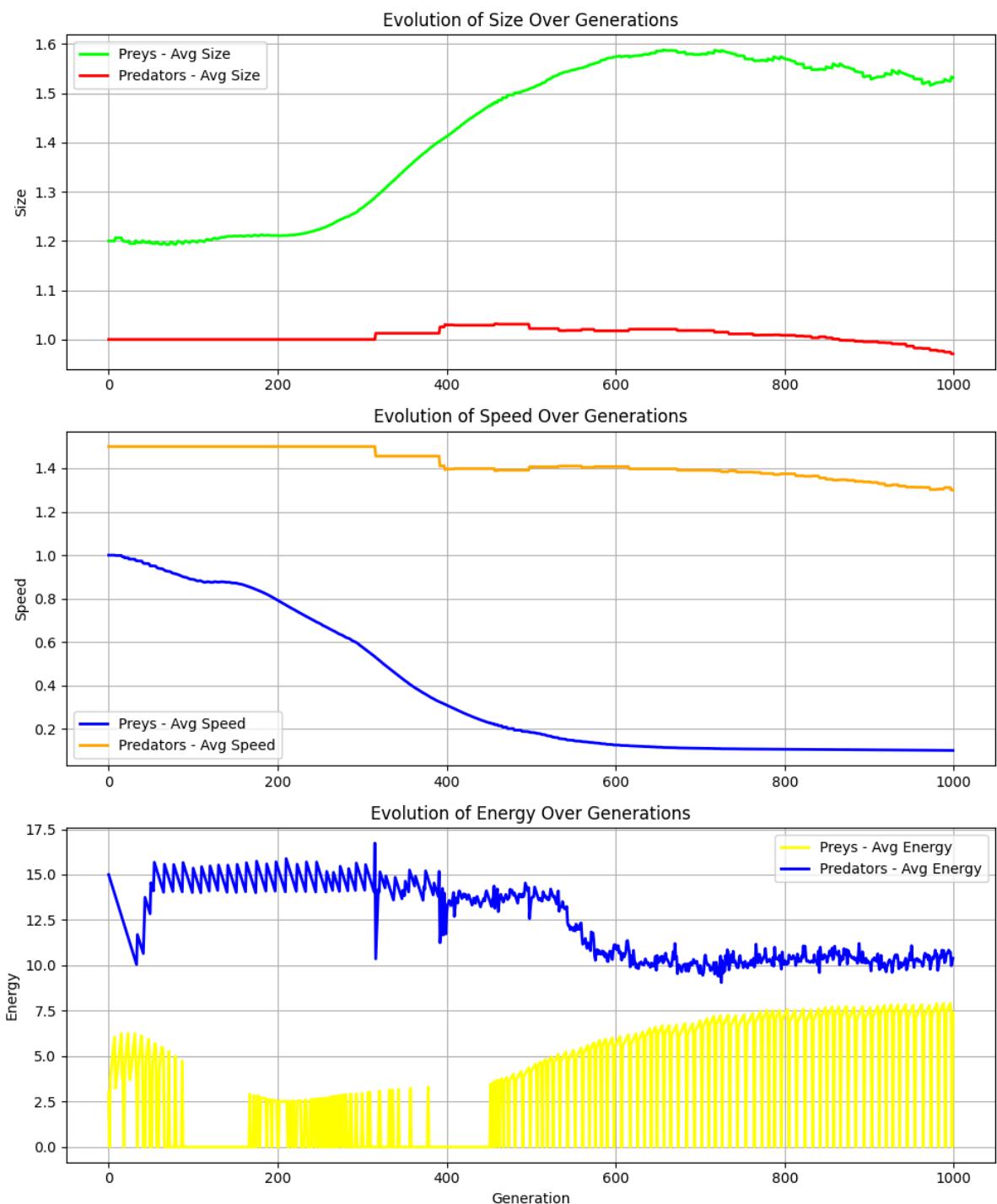


Figure 47: Ewolucja cech ofiar i drapieżników w czasie (jałowe środowisko)

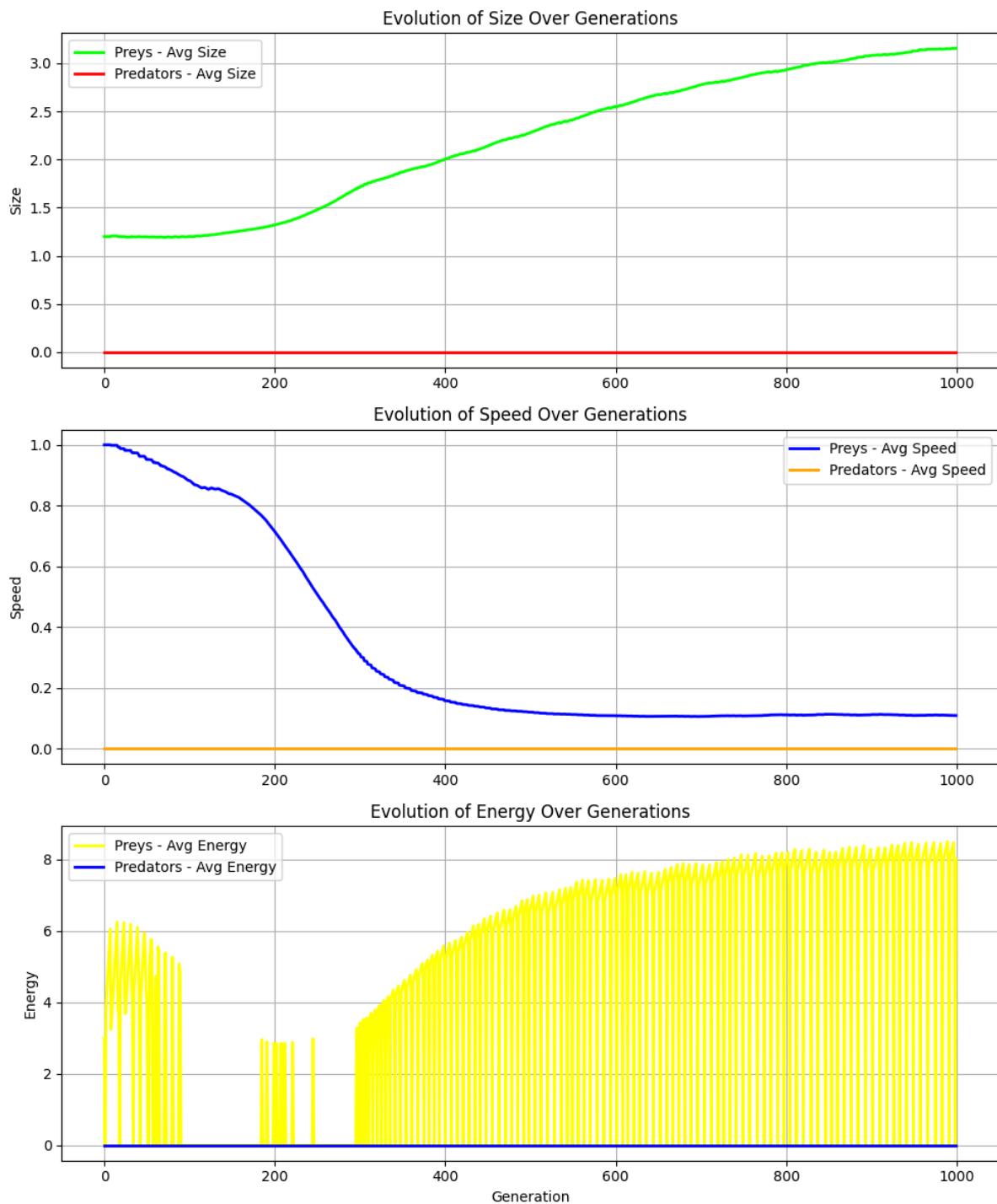


Figure 48: Ewolucja cech ofiar i drapieżników w czasie (normalne środowisko, brak drapieżników)

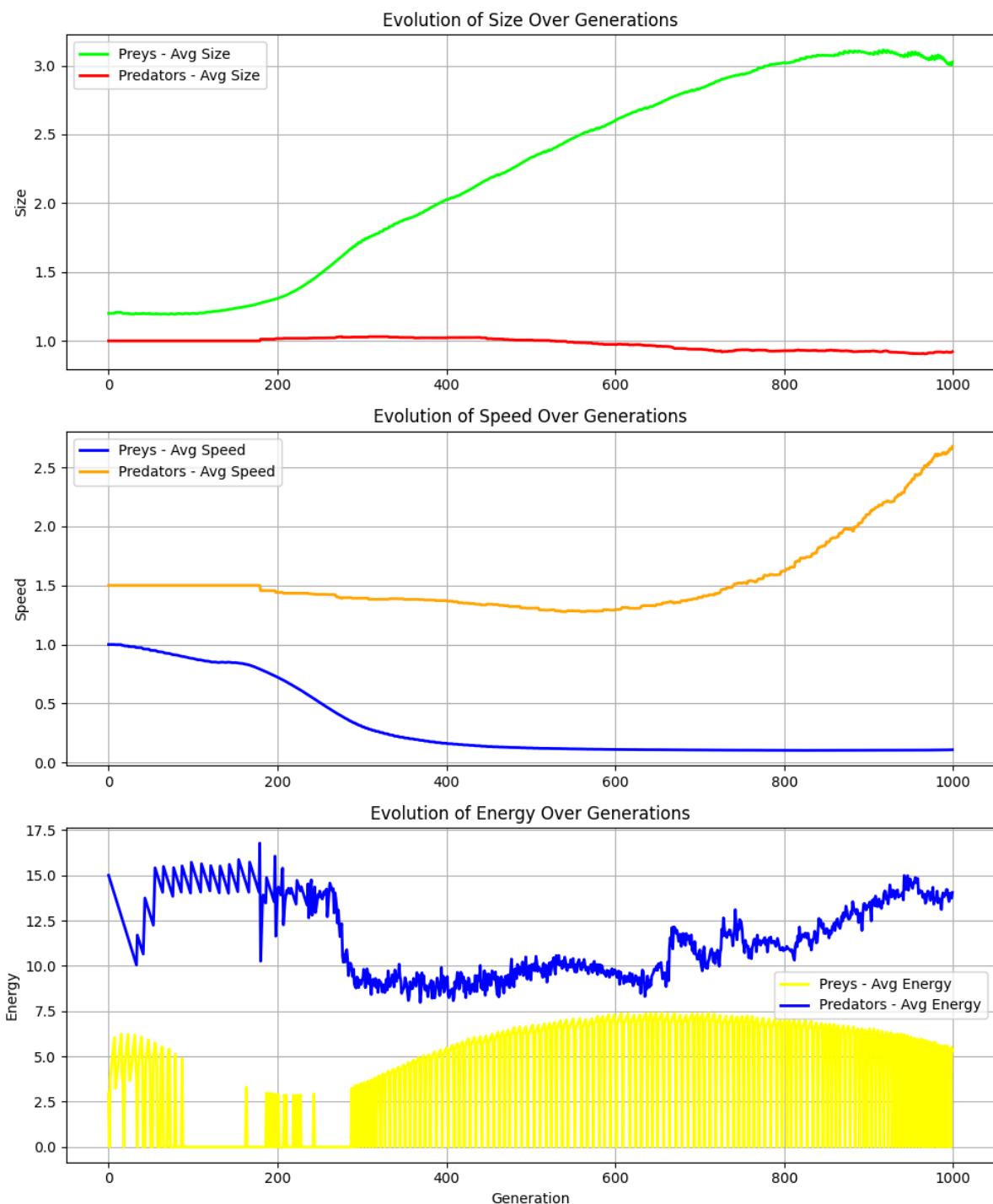


Figure 49: Ewolucja cech ofiar i drapieżników w czasie (normalne środowisko)

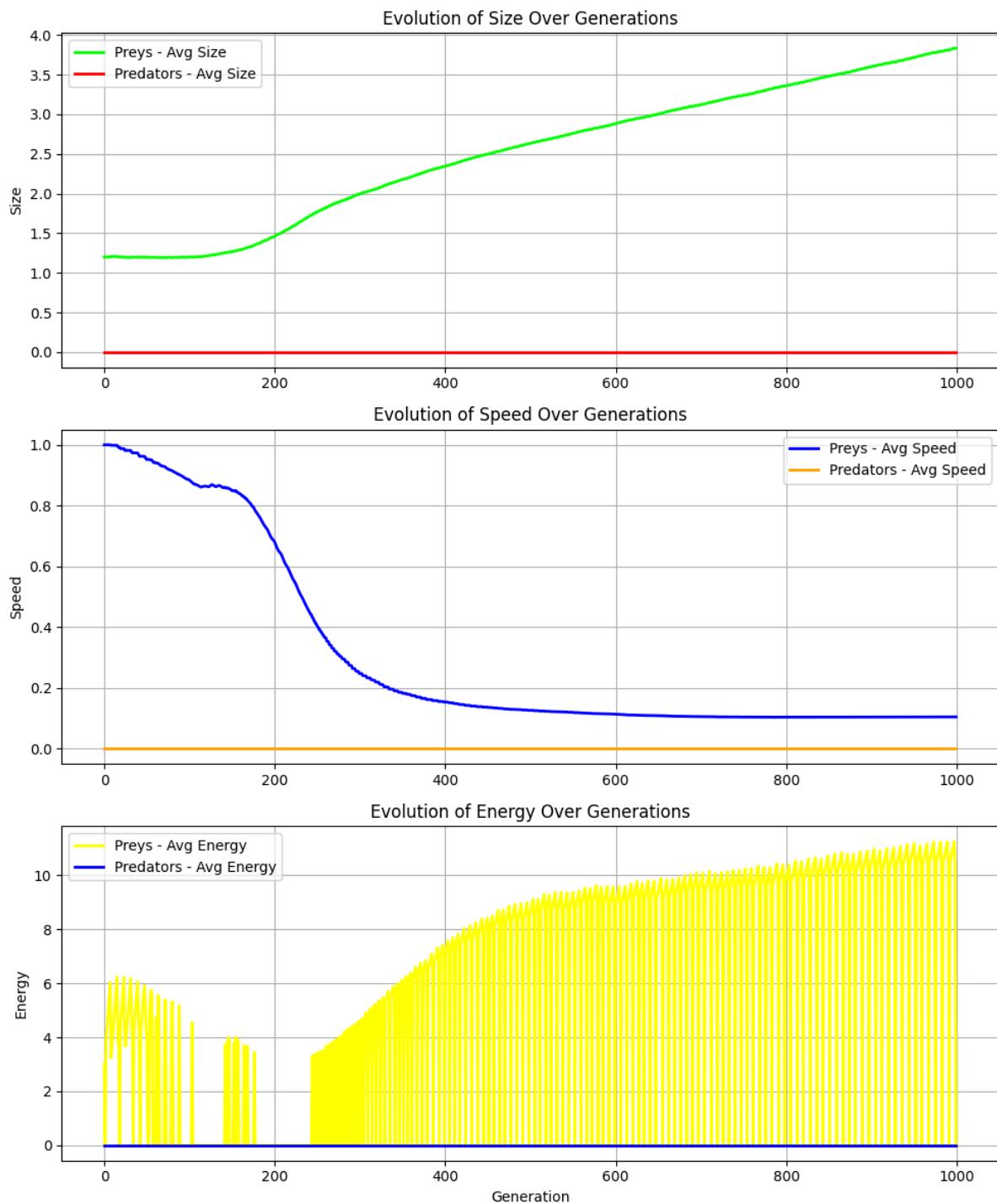


Figure 50: Ewolucja cech ofiar i drapieżników w czasie (bardzo bogate środowisko, brak drapieżników)

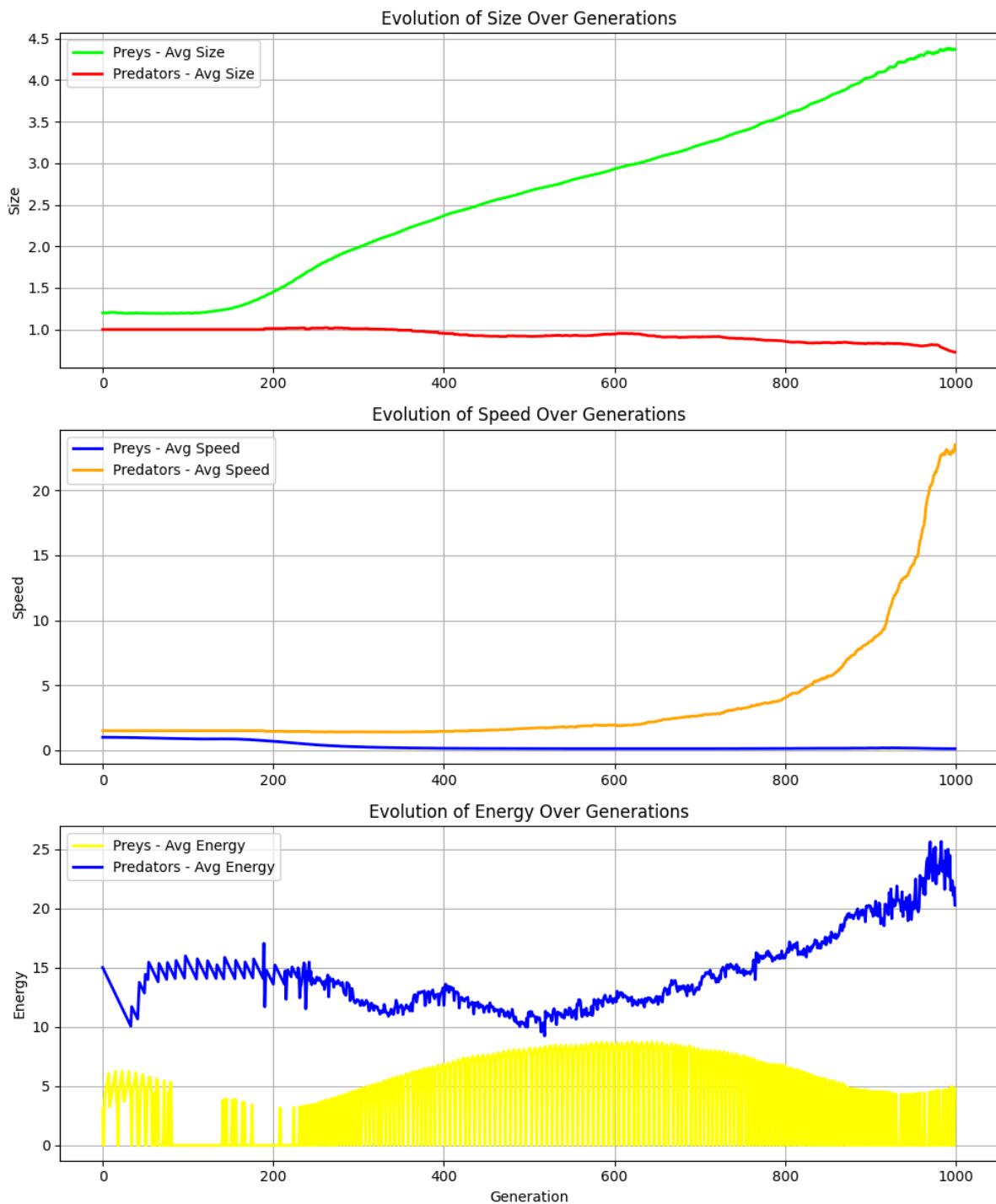


Figure 51: Ewolucja cech ofiar i drapieżników w czasie (bardzo bogate środowisko)

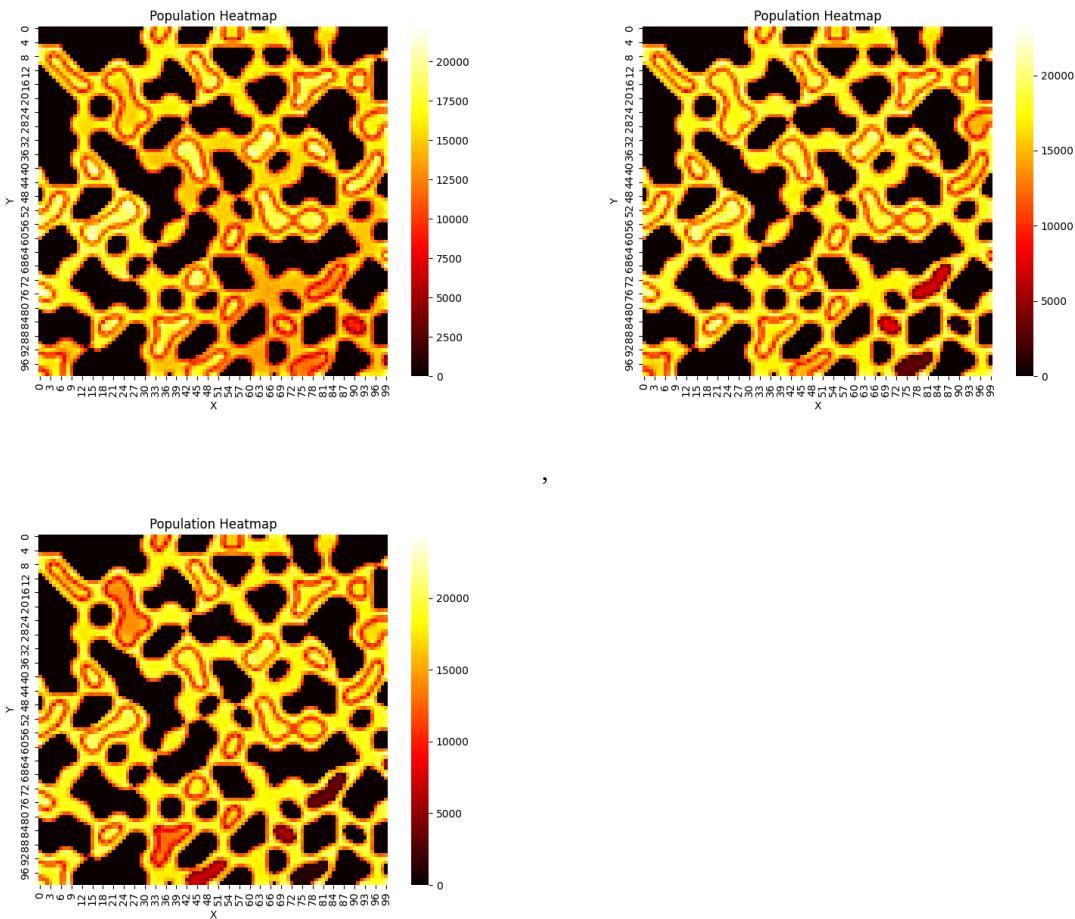


Figure 52: Mapa cieplna populacji ofiar w czasie (jałowe środowisko, normalne środowisko, bogate środowisko) bez drapieżników

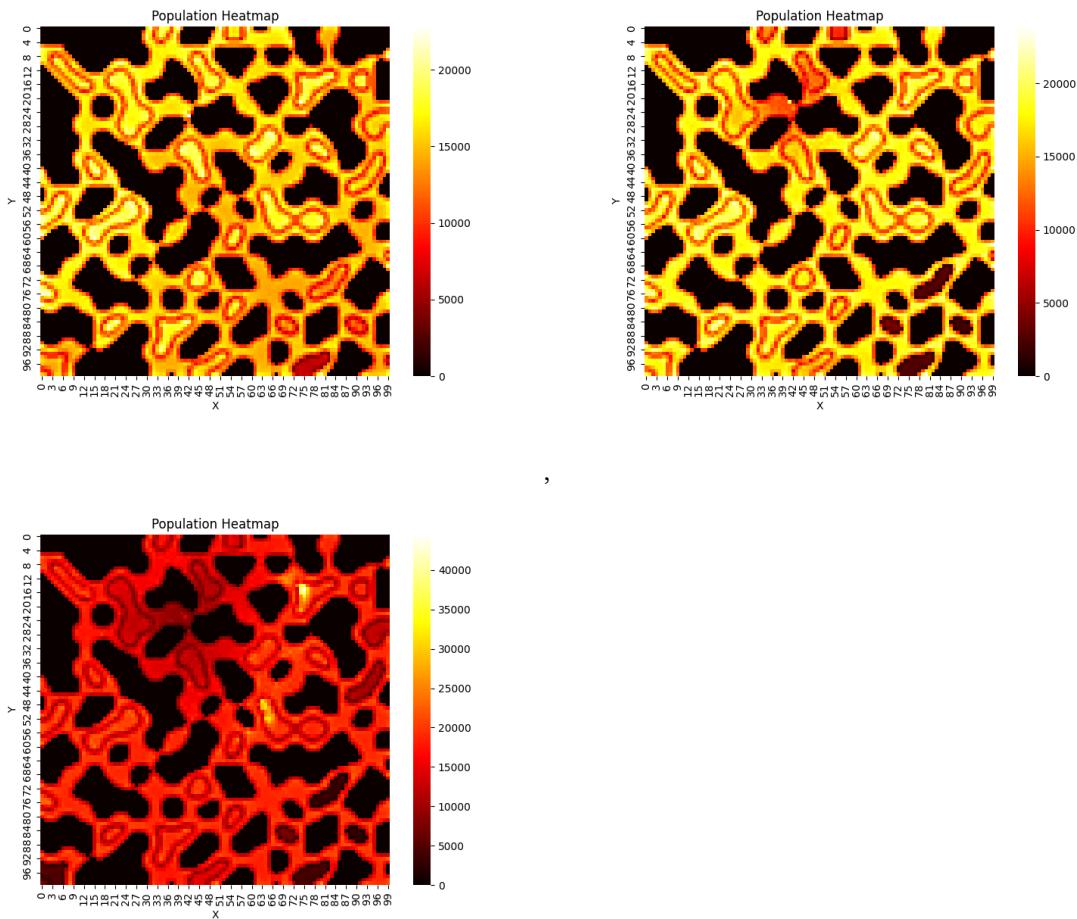


Figure 53: Mapa cieplna populacji ofiar i drapieżników w czasie (jałowe środowisko, normalne środowisko, bogate środowisko)

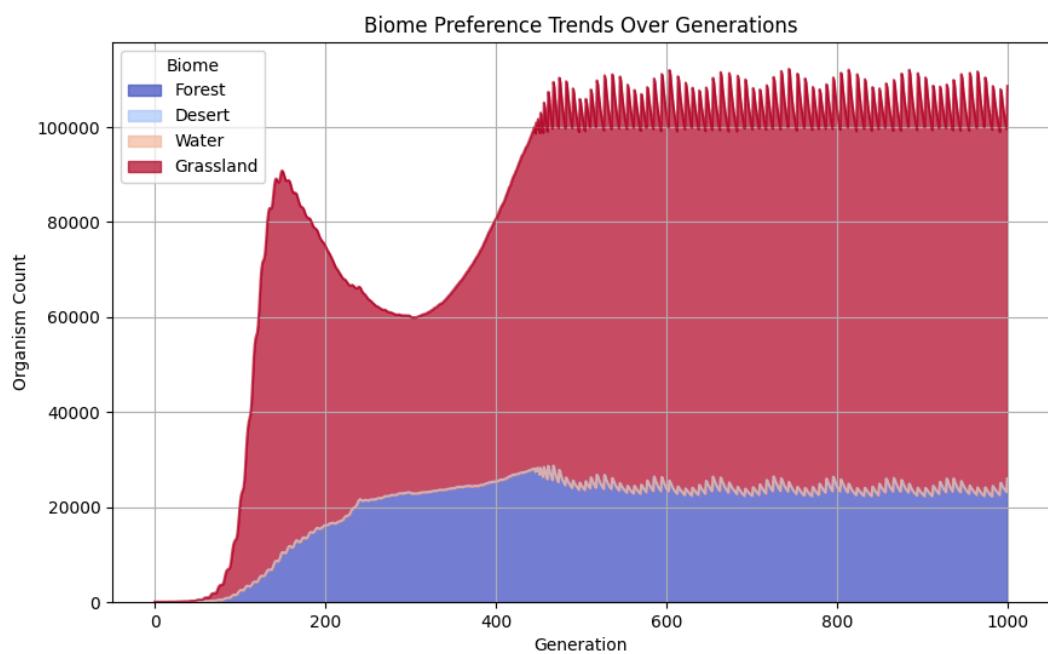


Figure 54: Trendy preferencji terenowych ofiar w czasie (jałowe środowisko, brak drapieżników)

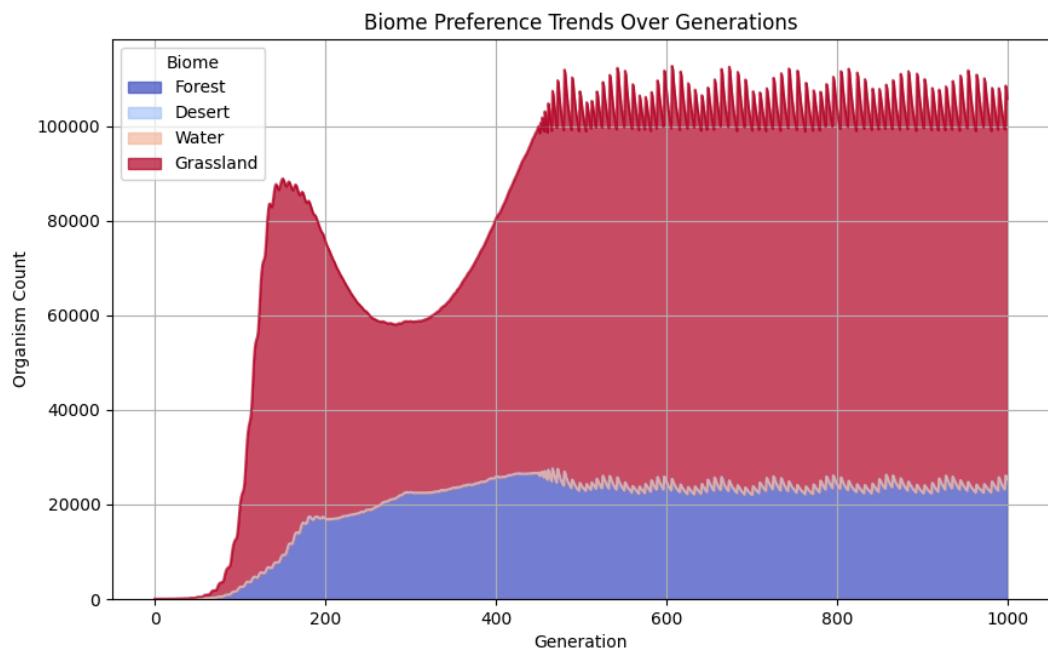


Figure 55: Trendy preferencji terenowych ofiar w czasie (jałowe środowisko)

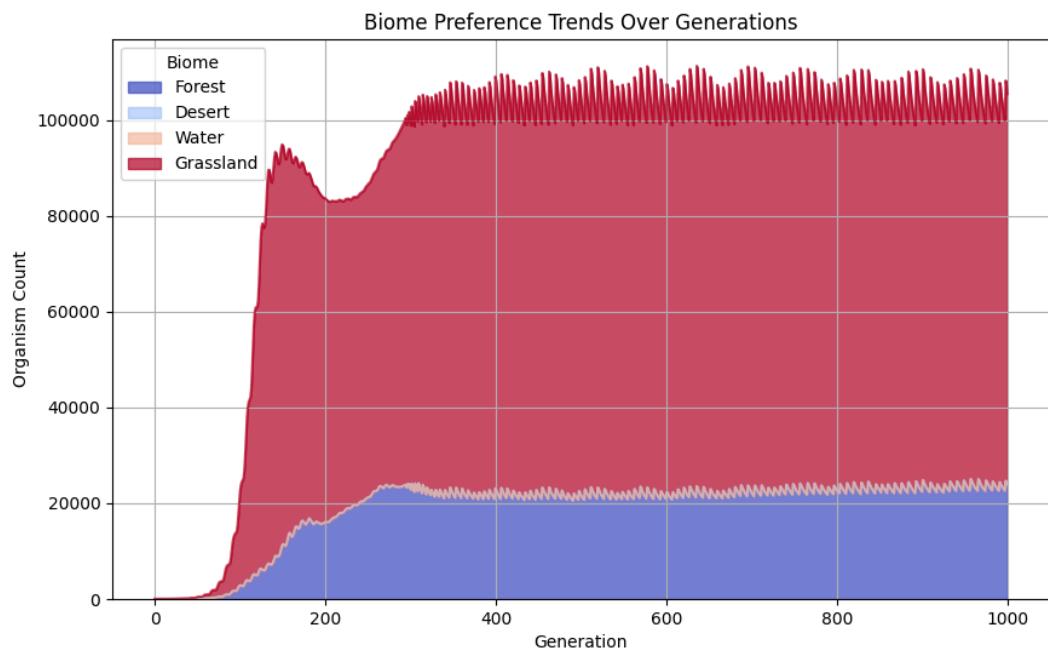


Figure 56: Trendy preferencji terenowych ofiar w czasie (normalne środowisko, brak drapieżników)

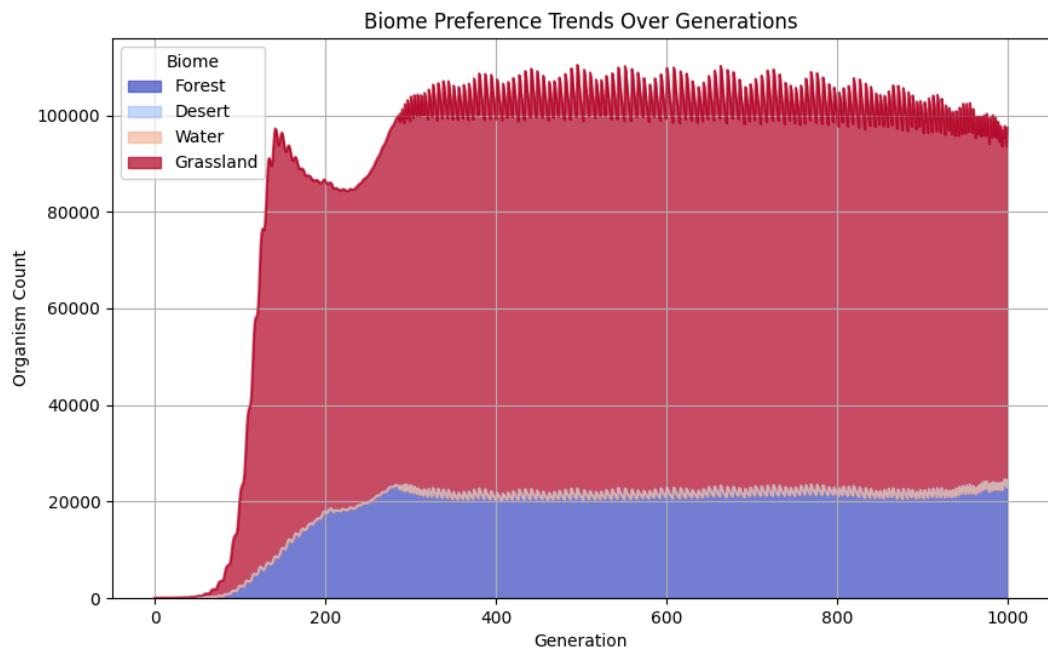


Figure 57: Trendy preferencji terenowych ofiar w czasie (normalne środowisko)

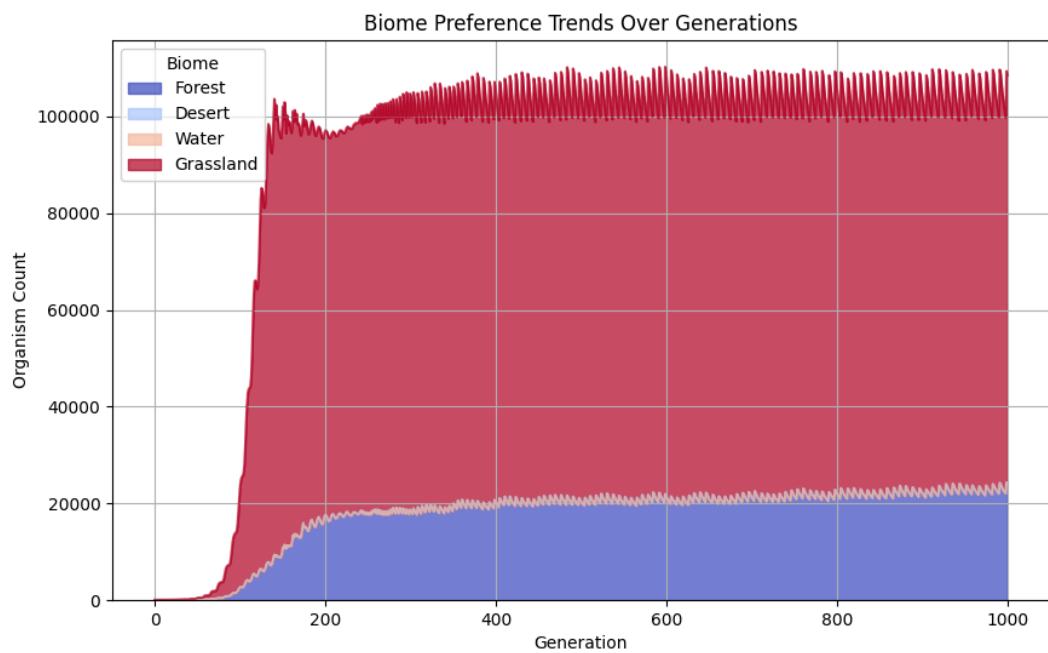


Figure 58: Trendy preferencji terenowych ofiar w czasie (bardzo bogate środowisko, brak drapieżników)

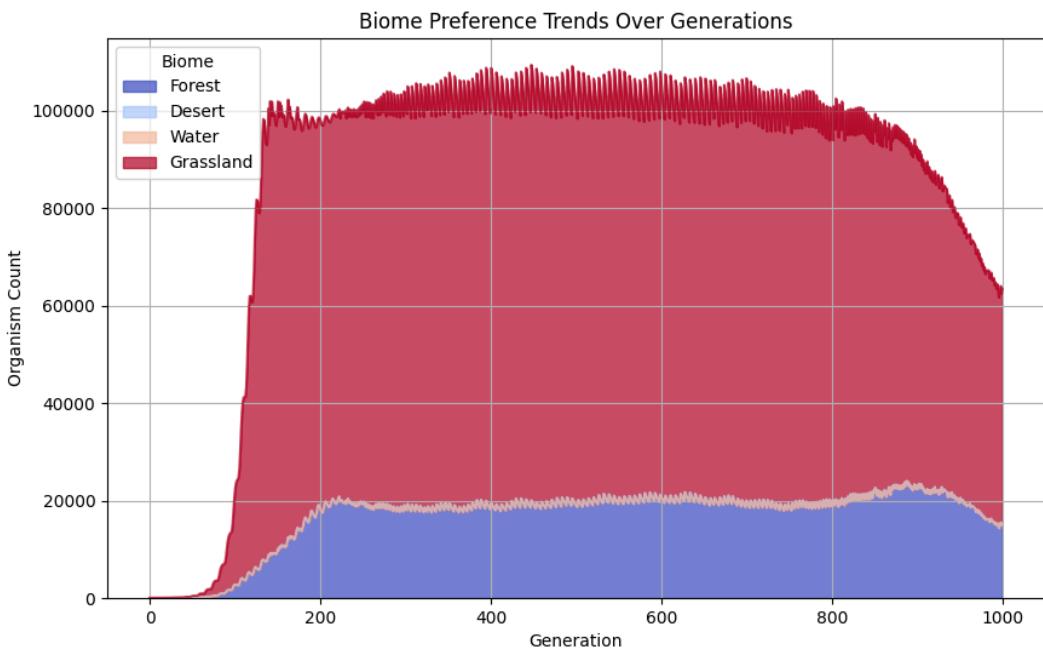


Figure 59: Trendy preferencji terenowych ofiar w czasie (bardzo bogate środowisko)

## 5.5. Podsumowanie wyników i wnioski

Przeprowadzona symulacja pozwoliła zaobserwować, jak różne czynniki środowiskowe i parametry ewolucyjne wpływają na kształtowanie się populacji oraz cech organizmów w czasie. W oparciu o wykonane scenariusze można sformułować następujące wnioski:

### 5.5.1. Wpływ poziomu mutacji

W tym scenariuszu można zauważać, że zbyt niski poziom mutacji ogranicza zdolność adaptacyjną organizmów. W takich warunkach populacja drapieżników nie jest w stanie przetrwać, nie potrafiła dostosować się do zmieniającego się środowiska. Z kolei zbyt wysoki poziom mutacji prowadził do niestabilności cech, co skutkowało chaotycznym rozkładem przystosowań i częstymi wahaniemami populacji. Optymalne rezultaty adaptacyjne pojawiły się przy średnim poziomie mutacji, gdzie ewolucja zachodziła w sposób zrównoważony.

### 5.5.2. Rola drapieżników

Drugi scenariusz pokazał, że obecność drapieżników pełni istotną rolę w regulacji populacji ofiar. W warunkach bez drapieżników ofiary rozmnażały się w szybkim tempie, co prowadziło do przeludnienia i wyczerpania zasobów. Wprowadzenie umiarkowanej presji drapieżników pomagało ustabilizować populację oraz promowało selekcję korzystnych cech, takich jak szybkość czy niższy próg reprodukcji. Co ciekawe, spodziewałem się, że presja drapieżników wpłynie na ewolucję ofiar w taki sposób, że będą one co raz mniejsze, szybciej będą się przemieszczać i będą miały mniejszy próg reprodukcji. W rzeczywistości okazało się, że ofiary ewoluowały w kierunku większych rozmiarów i ich próg reprodukcji wzrastał. Silna presja drapieżników powodowała wyginięcie ofiar i przez to upadek populacji drapieżników.

### 5.5.3. Dostępność jedzenia i środowisko

W trzecim scenariuszu zauważono, że zróżnicowanie środowiska (jałowe, normalne i bogate) znacząco wpływają na strategię przetrwania ofiar. W bogatych środowiskach ofiary rozwijały się szybciej, ale również szybciej dochodziło do przeludnienia. W środowiskach jałowych przeżywały tylko najlepiej przystosowane jednostki, a tempo reprodukcji i wzrost populacji było znacznie wolniejsze. Występowała również wyraźna adaptacja do preferowanego typu terenu.

## 6. Podsumowanie

Celem niniejszej pracy było stworzenie modelu symulującego procesy ewolucyjne w środowisku przy użyciu automatów komórkowych oraz architektury ECS. Zrealizowana symulacja pozwoliła zaobserwować, jak złożone zachowania mogą wyłaniać się z prostych reguł lokalnych, oraz jak zmienne środowiskowe i parametry organizmów wpływają na ich ewolucję.

W ramach eksperymentów przeanalizowałem szereg scenariuszy obejmujących m.in. różne poziomy mutacji, obecność drapieżników oraz zróżnicowanie środowiska. Analiza wykazała, że niektóre wyniki były zgodne z intuicją biologiczną (np. stabilizujący wpływ umiarkowanej presji drapieżników), jednak pojawiły się również efekty emergentne, które mnie zaskoczyły.

Największym zaskoczeniem była obserwacja, że pod wpływem silnej presji drapieżników ofiary nie stawały się mniejsze i bardziej efektywne energetycznie (jak można było przypuszczać), lecz wręcz przeciwnie, ewoluowały w stronę większych rozmiarów i wyższego progu reprodukcji. Może to sugerować, że większy rozmiar dawał im przewagę w konkurencji o zasoby. Jest to przykład tzw. wyścigu zbrojeń, gdzie adaptacje jednej grupy organizmów wywołują presję selekcyjną na drugą, prowadząc do nieoczywistych strategii przetrwania.

Ostatecznie praca ta pokazuje, że nawet bardzo uproszczone modele mogą doprowadzić do interesujących i złożonych wyników, które przypominają prawdziwe procesy biologiczne. Warto podkreślić, że zastosowanie języka Rust oraz architektury ECS pozwoliło mi na efektywne zarządzanie dużą liczbą jednostek w czasie rzeczywistym, co czyni stworzoną symulację dobrym punktem wyjścia do dalszych eksperymentów i potencjalnego rozwoju symulacji.

### 6.1. Kierunki dalszego rozwoju

Ten model można rozszerzyć na wiele sposobów:

- Wprowadzenie mechanizmów uczenia lub pamięci (np. zachowanie preferencji terenowych).
- Symulacja więcej niż dwóch gatunków i zależność między nimi (np. pasożytnictwo, konkurencja).
- Wprowadzenie zmiennych klimatycznych (np. sezonowość, globalne ocieplenie).
- Rozszerzenie analiz o miary różnorodności genetycznej czy strategie kooperacyjne.
- Wprowadzenie genomów i genotypów, co pozwoliłoby na bardziej złożoną ewolucję cech.

## Bibliografia

- [1] M. Gardner, “Mathematical Games,” *Scientific American*, vol. 223, no. 4, pp. 120–123, Oct. 1970, doi: 10.1038/scientificamerican1070-120.
- [2] P. Bak, C. Tang, and K. Wiesenfeld, “Self-organized criticality: An explanation of the 1/f noise,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 59, no. 4, pp. 381–384, Jul. 1987, doi: 10.1103/PhysRevLett.59.381.
- [3] Z. Olami, H. J. S. Feder, and K. Christensen, “Self-organized criticality in a continuous, nonconservative cellular automaton modeling earthquakes,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 68, no. 8, pp. 1244–1247, Feb. 1992, doi: 10.1103/PhysRevLett.68.1244.
- [4] A. Ilachinski, *Cellular Automata*, 0th ed. WORLD SCIENTIFIC, 2001. doi: 10.1142/4702.
- [5] C. G. Langton, “Studying artificial life with cellular automata,” *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 22, no. 1, pp. 120–149, 1986, doi: [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(86\)90237-X](https://doi.org/10.1016/0167-2789(86)90237-X).
- [6] P. Bak and K. Sneppen, “Punctuated equilibrium and criticality in a simple model of evolution,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 71, no. 24, pp. 4083–4086, Dec. 1993, doi: 10.1103/PhysRevLett.71.4083.
- [7] S. A. Kauffman, *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. Oxford University Press, 1993. doi: 10.1093/oso/9780195079517.001.0001.

## **7. Kod źródłowy**

Repozytorium z kodem źródłowym dostępne jest pod adresem: [https://github.com/GKaszewski/evolution\\_cellular\\_automata](https://github.com/GKaszewski/evolution_cellular_automata)