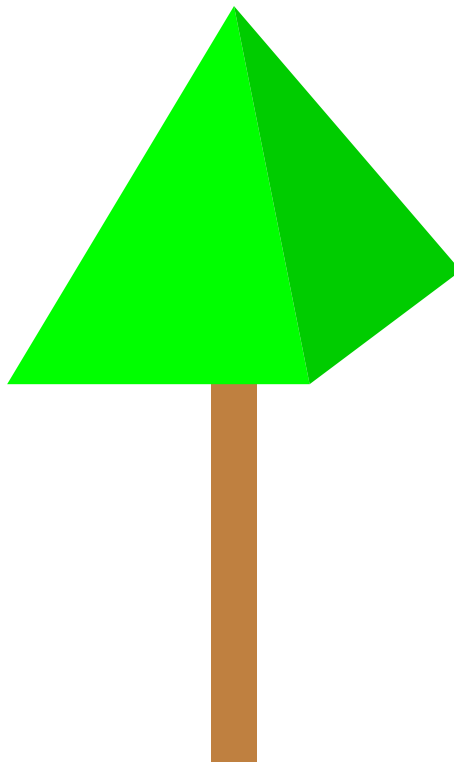


Symulacja zniszczeń lasu przez huragan

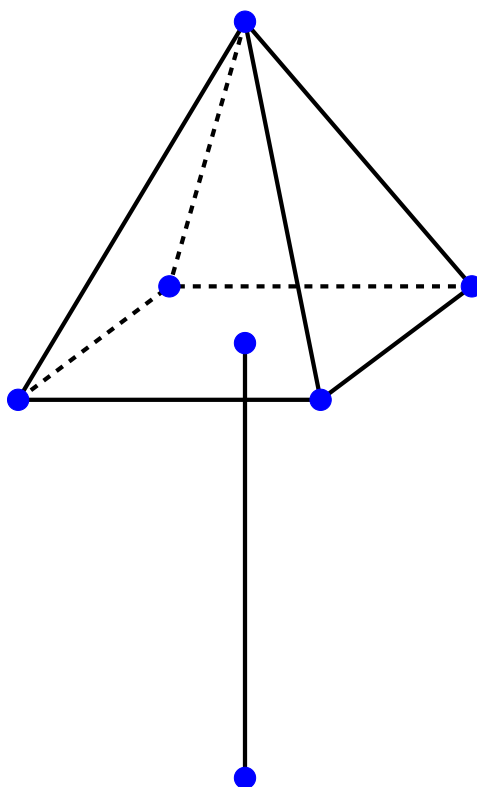
Mariusz Nyznar, Krzysztof Gądek, Jacek Pietras

17 grudnia 2014



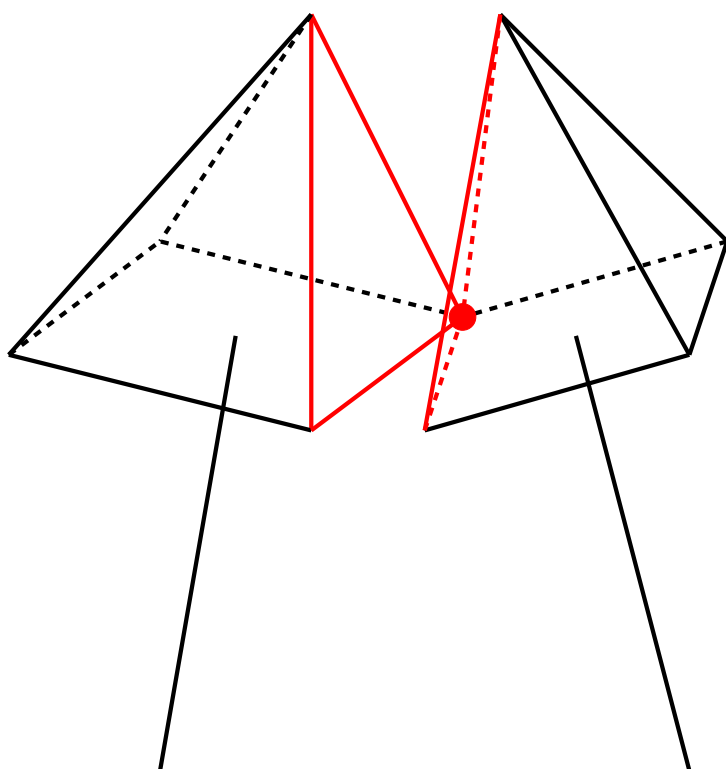
1 Wstęp

Celem projektu jest stworzenie symulacji przemieszczania się tornada przez las oraz analiza zniszczeń drzew. Modelem wykorzystanym w symulacji wiru jest model Rankine (rozdział 3), łamliwość drzew symulowana jest na podstawie modelu HWIND



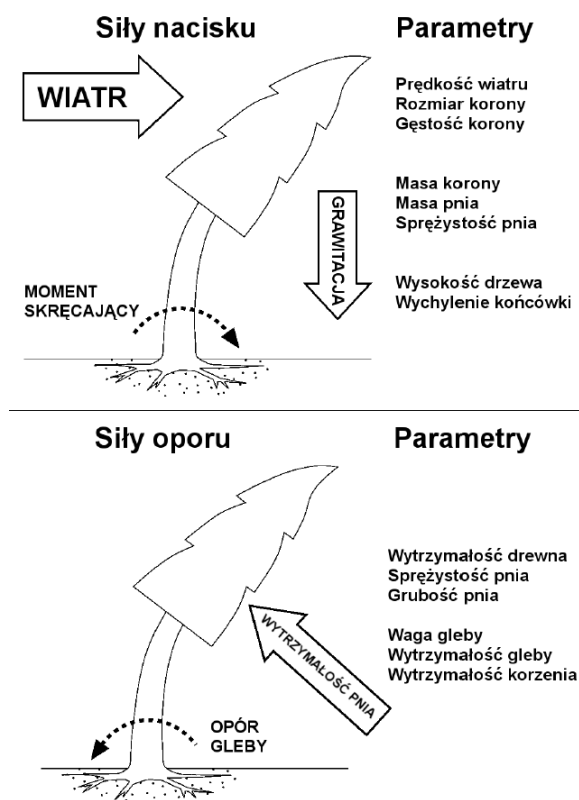
(rozdział 2). W projekcie wykorzystane zostały koncepcje charakterystyczne dla programowania agentowego – występujące byty działają niezależnie na osobnych wątkach, komunikując się ze sobą asynchronicznie.

Symulacje tego typu nie są bardzo popularne w Polsce ze względu na rzadkość ich występowania. Jednak z powodu powolnej zmiany klimatu sytuacja ta może ulec zmianie, przez co modele takie mogą dostarczać ważnych informacji o skutkach tak gwałtownych zjawisk atmosferycznych jak np. tornada.



2 Model HWIND

Model łamliwości drzew HWIND powstał w celu wyznaczania maksymalnej prędkości wiatru przy których drzewo ulegnie złamaniu lub wyrwaniu (dla lasów sztucznie zalesianych). Został on opracowany dla sosny zwyczajnej i świerku pospolitego.



Rysunek 1: Rozkład sił działających na drzewo dla modelu HWIND. Źródło: [2].

Rysunek 1 przedstawia siły działające na drzewo. Dokonany został podział na siły poziome i pionowe. Pod naporem wiatru drzewo ugina się do momentu osiągnięcia punktu krytycznego, gdy siły nacisku (siła wiatru, siła grawitacji) zrównają się z siłami oporu (wytrzymałość pnia, wytrzymałość gleby wokół korzenia).

W celu wyznaczenia maksymalnego momentu skrecającego i granicznej prędkości wiatru przy której nastąpi zniszczenie drzewa, podzielone zostały one na 1 metrowe segmenty, dla których wyznaczone zostaną wartości sił.

2.1 Siły nacisku

Całkowita pozioma siła wiatru F_w uzyskana zostaje poprzez sumowanie wartości siły wiatru obliczonej osobno dla każdego 1 metrowego segmentu [7]. Siła dla poszczególnego segmentu uzyskiwana jest ze wzoru:

$$F_w(z) = \frac{1}{2} C_d \rho v_h^2 A(z) \quad (1)$$

gdzie

C_d – współczynnik tarcia

ρ – gęstość powietrza

v_h – prędkość pozioma dla danego segmentu

$A(z)$ – przewidywana wielkość korony drzewa stawiająca opór wiatrowi

W celu uproszczenia obliczeń dokonana została aproksymacja powierzchni korony drzewa przez trójkąt równoramienny (świerk pospolity). Pole powierzchni pnia jest reprezentowane przez prostokąt. Model ten przedstawia rysunek 2.

W modelu należy uwzględnić fakt, iż pod wpływem wiatru powierzchnia korony ulega zmniejszeniu [7]. Redukcja powierzchni wynosi 20% dla prędkości mniejszych od $11 \frac{m}{s}$, dla większych od $20 \frac{m}{s}$ – 60%. Dla wartości pomiędzy nimi współczynnik przepływu wiatru S_t jest wyznaczany z następującego wzoru:

$$S_t(z) = 0.044444v(z) - 0.28889 \quad (2)$$

gdzie

$v(z)$ – prędkość wiatru na wysokości z

Powierzchnia $A(z)$ wyznaczana jest przez jej iloczyn ze współczynnikiem S_t .

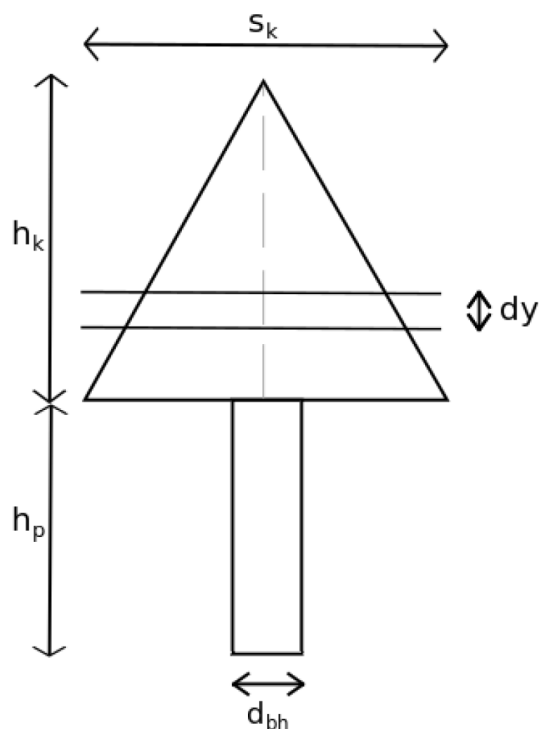
Siła grawitacji wyznaczana jest dla każdego segmentu drzewa, a następnie sumowana. Wyznaczana jest ze wzoru:

$$F_g(z) = m_c g \quad (3)$$

gdzie

m_c – masa korony drzewa

g – przyspieszenie ziemskie



Rysunek 2: Model powierzchni stawiającej opór wiatrowi. s_k oznacza szerokość korony, h_k – wysokość korony, h_p – wysokość pnia, d_{bh} – średnicę pnia, d_y – wycinek powierzchni o wysokości $1m$ użyty przy w modelu HWIND. Źródło: [2].

2.2 Maksymalny moment skręcający drzewa

Maksymalny moment skręcający drzewa $B_{max}(z)$ wyznaczamy dla każdego segmentu poprzez sumę siły wiatru $F_w(z)$ pomnożonej przez wysokość Δz , oraz siły grawitacji $F_g(z)$ pomnożonej przez odchylenie czubka drzewa od pionu $x(z)$ [8]. Suma następnie zostaje pomnożona przez stosunek między maksymalnym, a średnim momentem ugięcia f_{gust} oraz stosunek pomiędzy maksymalnym, a średnim współczynnikiem odległości pomiędzy drzewami f_{gap} . Zależność ta jest wyrażona następującym wzorem:

$$B_{max}(z) = f_{gust} f_{gap} [F_w(z) \Delta z + F_g(z) x(z)] \quad (4)$$

Odchylenie czubka od pionu używane w powyższym wzorze (4) wyznaczone jest za pomocą wzoru [8]:

$$x(z) = \begin{cases} \frac{F_w a^2 h (3 - \frac{a}{h} - \frac{3l(z)}{h})}{6 \cdot MOE \cdot I} & \text{dla } z \leq a \\ \frac{F_w a^3 (2 - \frac{3(l(z)-b)}{a} + \frac{(l(z)-b)^3}{a^3})}{6 \cdot MOE \cdot I} & \text{dla } z > a \end{cases} \quad (5)$$

gdzie

a – wysokość środka korony

h – wysokość drzewa

$l(z)$ – odległość od czubka drzewa na wysokości z

MOE – współczynnik elastyczności drzewa

I – powierzchniowy moment bezwładności ($I = \pi \frac{d_{bh}^4}{64}$, gdzie d_{bh} to średnica drzewa na wysokości 1.3m

b – odległość między czubkiem drzewa, a środkiem korony

Jak podaje źródło [6] drzewa zachowują się inaczej pod napływem wiatru w zależności od tego jaka odległość dzieli je od ściany lasu. Proporcje zmian wyrażają wzory (6) oraz (7):

Dla momentu ugięcia:

$$\begin{aligned} Gust_{mean} &= (0.68 \frac{s}{h} - 0.0385) + (-0.68 \frac{s}{h} + 0.4875)(1.7239 \frac{s}{h} + 0.0316) \frac{x}{h} \\ Gust_{max} &= (2.7193 \frac{s}{h} - 0.061) + (-1.273 \frac{s}{h} + 9.9701)(1.1127 \frac{s}{h} + 0.0311) \frac{x}{h} \end{aligned} \quad (6)$$

$$f_{gust} = \frac{Gust_{max}}{Gust_{mean}}$$

gdzie

s – odległość między drzewami

h – średnia wysokość drzew w lesie

Dla współczynnika odległości pomiędzy drzewami:

$$\begin{aligned} Gap_{mean} &= \frac{0.001+0.001p^{0.562}}{0.00465} \\ Gap_{max} &= \frac{0.0072+0.0064p^{0.3467}}{0.0214} \end{aligned} \quad (7)$$

$$f_{gap} = \frac{Gap_{max}}{Gap_{mean}}$$

gdzie

p – szerokość pasa wolnej przestrzeni przed ścianą lasu.

2.3 Siły oporu

Wyznaczenie wartości sił oporu drzewa dokonane zostało na podstawie wzorów (8) oraz (9). Pień drzewa nie pęka do momentu w którym siła wiatru F_w nie rozerwie włókien w zewnętrznych partiach kory. Wytrzymałość wyznacza się na wysokości $1.3m$ (wysokość klatki piersiowej człowieka) [7], jest ona reprezentowana przez współczynnik pękania drewna MOR .

Wytrzymałość pnia:

$$M_{bk} = \frac{\pi}{32} MOR d_{bh}^3 \quad (8)$$

gdzie

MOR – współczynnik pękania drewna

d_{bh} – średnica drzewa na wysokości $1.3m$

Wytrzymałość korzenia wyznaczana jest w następujący sposób:

$$M_{ov} = \frac{g R_{mass} R_{depth}}{f_{RW}} \quad (9)$$

gdzie

g – przyspieszenie ziemskie

R_{mass} – masa korzenia

R_{depth} – głębokość korzenia

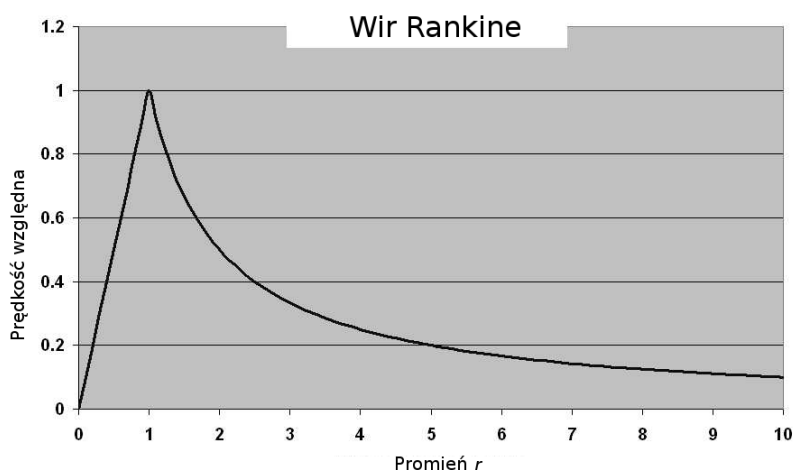
f_{RW} – stosunek wagi gleby do masy drzewa

Gdy moment ugięcia (4) przekroczy wytrzymałość pnia (8) drzewo zostanie złamane. Gdy moment ugięcia przekroczy wytrzymałość gleby wokół korzeni (9) – drzewo zostanie wyrwane.

W projekcie symulacja dokonana została dla sosny zwyczajnej. Dla niej też zostały dobrane charakterystyczne wartości parametrów.

3 Model tornada Rankine

Używany przez symulację model tornada został stworzony przez Williama Johna Macquorna Rankine w połowie XIX wieku [3]. Zakłada on, iż zaczynając od środka, czyli tzw. oka tornada, prędkość wiatru zwiększa się liniowo aż do osiągnięcia swojego maksimum przy promieniu R , a następnie wraz ze zwiększaniem promienia maleje wykładniczo.



Rysunek 3: Zależność między prędkością wiatru a odległością od oka tornada. Źródło: [4].

Zależności z wykresu przedstawionego na rysunku 3 reprezentowane są za pomocą równań współrzędnych biegunowych. Prędkość trawersalna (prędkość przemieszczania się w kierunku prostopadłym do promienia) opisana jest wzorem:

$$V_{\varphi}(r) = \begin{cases} \frac{V_{\varphi max} \cdot r}{R_{max}} & \text{gdy } r \leq R_{max} \\ \frac{V_{\varphi max} \cdot R_{max}}{r} & \text{gdy } r > R_{max} \end{cases} \quad (10)$$

gdzie

V_{φ} – prędkość trawersalna (prędkość przemieszczania się w kierunku prostopadłym do promienia r)

$V_{\varphi max}$ – maksymalna trawersalna prędkość wiatru

r – odległość punktu od środka tornada

R_{max} – maksymalny promień tornada

Podobnie do prędkości trawersalnej została opisana prędkość radialna. Różnicą jest to, iż iloraz promieni jest podniesiony do potęgi o wykładniku 0.6. Stała ta została wyznaczona doświadczalnie za pomocą przenośnego radaru Dopplera [1].

$$V_r(r) = \begin{cases} V_{rmax} \left(\frac{r}{R_{max}} \right)^{0.6} & \text{gdy } r \leq R_{max} \\ V_{rmax} \left(\frac{R_{max}}{r} \right)^{0.6} & \text{gdy } r > R_{max} \end{cases} \quad (11)$$

gdzie

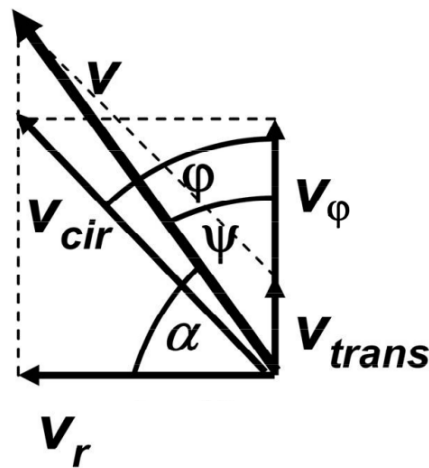
V_r – prędkość radialna (prędkość zmiany długości promienia r)

V_{rmax} – maksymalna radialna prędkość wiatru

r – odległość punktu od środka tornada

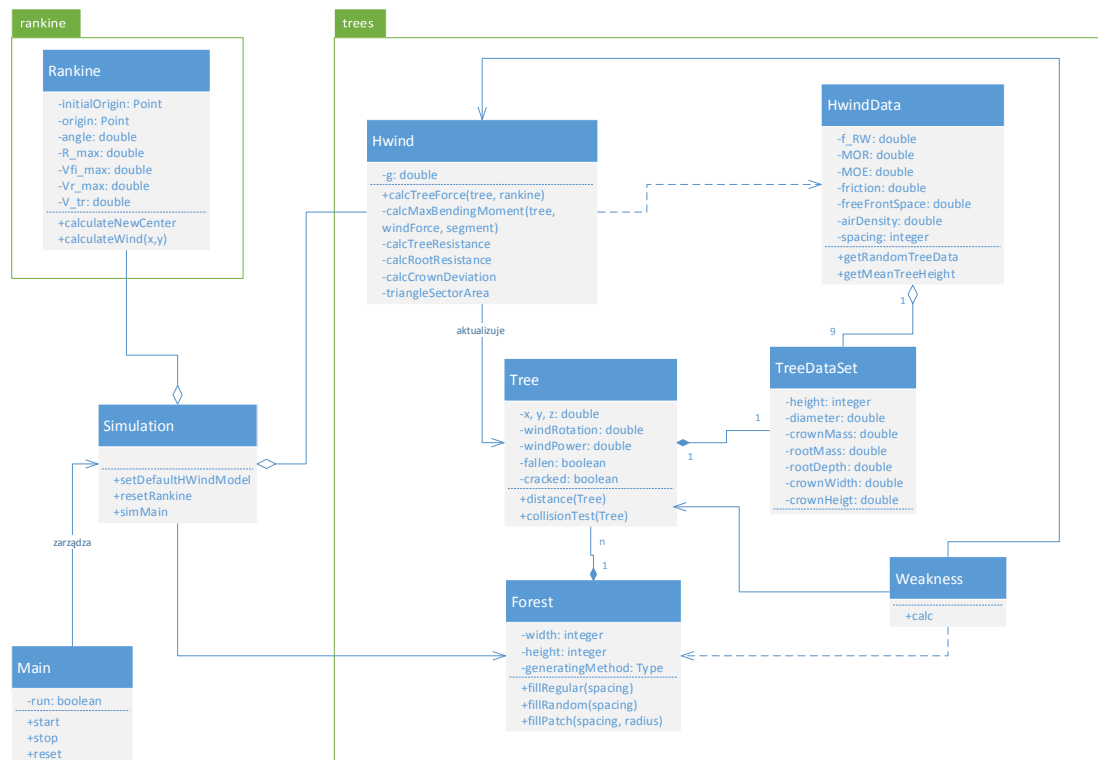
R_{max} – maksymalny promień tornada

Te dwie wielkości opisują model statycznego tornada. Aby przeprowadzić symulację tornada przechodzącego przez las, wprowadzony jest dodatkowy wektor prędkości – prędkość translacji V_{trans} . Prędkość wiatru w modelu będzie wypadkową wszystkich tych trzech wielkości, przy czym wypadkowa prędkości trawersalnej V_φ oraz prędkości radialnej V_r nazywana jest prędkością cyrkularną V_{cir} .



Rysunek 4: Składowe prędkości modelu tornada oraz ich wypadkowe. Źródło: [5].

4 Opis implementacji



Rysunek 5: Diagram klas logiki aplikacji.

Aplikacja została zaimplementowana w języku Java. Rysunek 5 przedstawia zależności między klasami logiki aplikacji.

Głównymi klasami wpływającymi na przebieg symulacji są

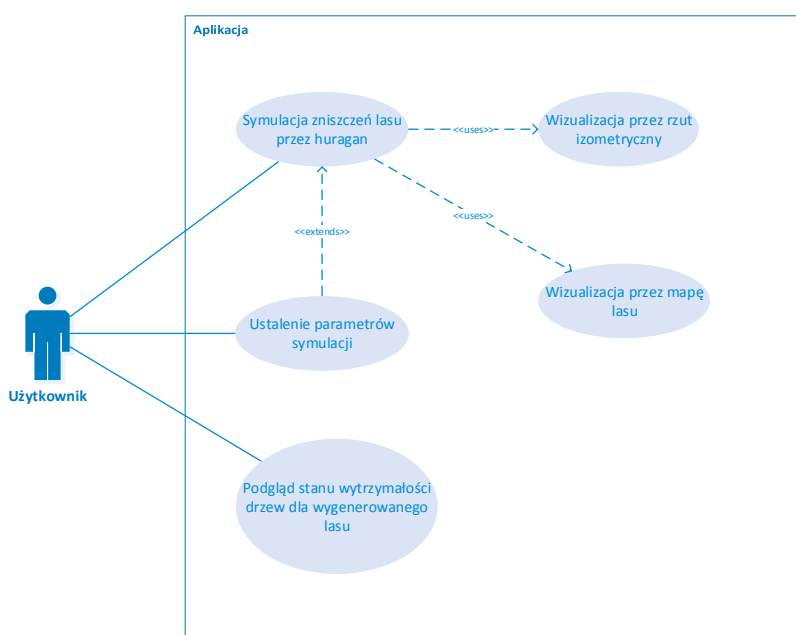
- Rankine (model wiru)
- Hwind (model zniszczeń drzew)

Klasa Forest przechowuje informacje na temat parametrów lasu, takich jak jego wymiary, czy położenia drzew (przechowuje obiekty klasy Tree). Klasa Simulation stanowi element sterujący symulacji. Klasy HwindData oraz TreeDataSet przechowują większość parametrów modelu zniszczeń drzew. Pierwsza posiada informacje średniej wysokości drzew w lesie, wartościach współczynnika tarcia oraz innych opisanych w charakterystyce modelu HWIND. Druga z nich przechowuje informacje na temat konkretnego drzewa.

Klasa Weakness służy do wyznaczania wytrzymałości konkretnego drzewa w lesie na działanie siły wiatru (poprzez uwzględnienie jego sąsiedztwa).

Głównymi klasami które nas interesują z punktu widzenia użytkowników symulacji są klasy Tree i Forest. To one przechowują wynik symulacji.

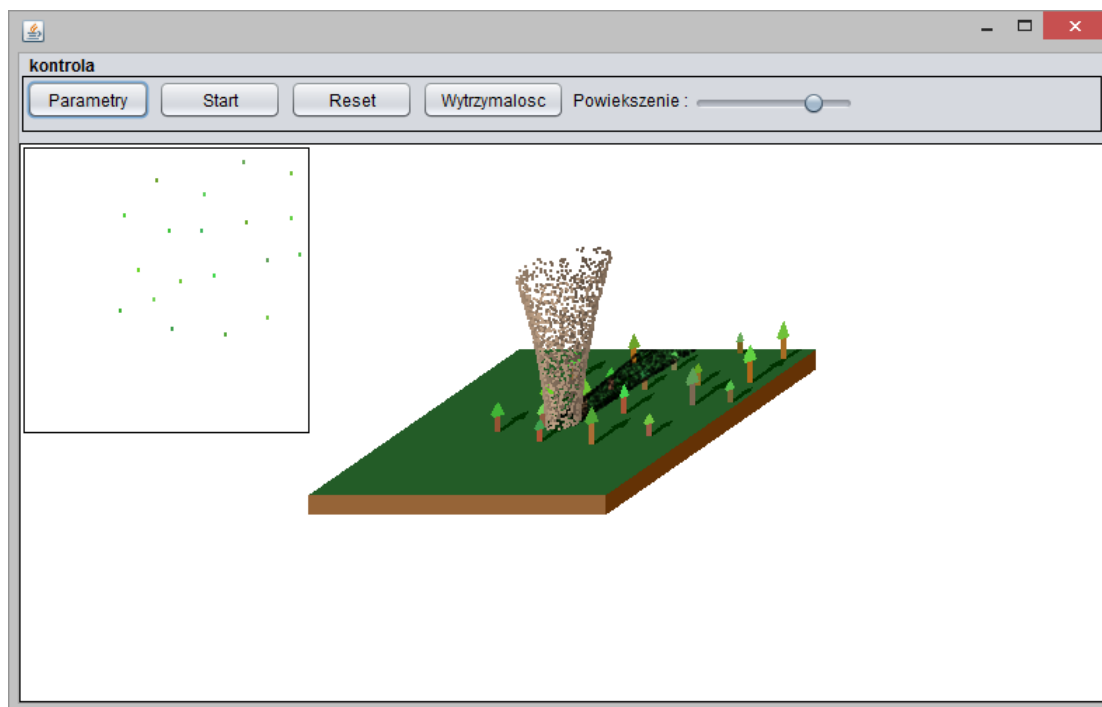
Rysunek 6 przedstawia możliwe przypadki użycia. Aplikacja pozwala na przeprowadzenie symulacji zniszczeń, wraz z możliwością zmiany wartości jej parametrów. Działanie programu wizualizowane jest na bieżąco.



Rysunek 6: Diagram przypadków użycia.

Zachowanie każdego drzewa zostało odzwierciedlone przez oddzielny wątek. Wykorzystując wzajemnie informacje o swym stanie, oraz obiekty klas modelu drzewa określają swój stan w danym momencie. Wykorzystanie koncepcji programowania agentowego pozwala na lepsze odzwierciedlenie rzeczywistej sytuacji, a co za tym idzie - uzyskania bardziej wiarygodnych wyników.

5 Opis interfejsu

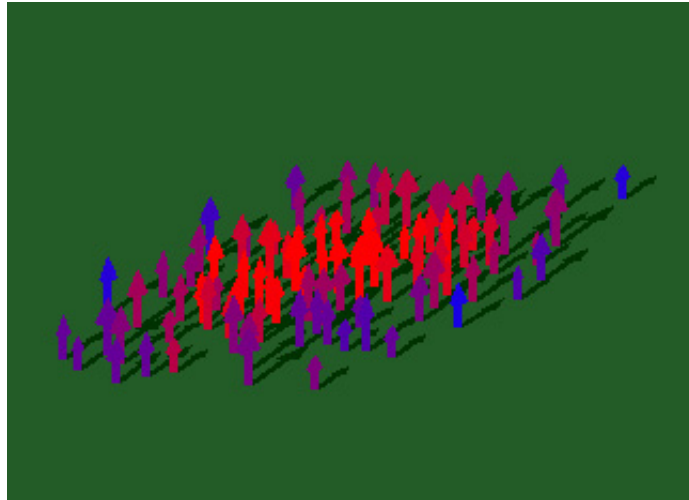


Rysunek 7: Główne okno programu.

Uruchamienie aplikacji symulacji powoduje wyświetlenie głównego okna programu (Rysunek 7). W centralnej ramce ukazana jest wizualizacja zjawiska w rzucie izometrycznym. Pokazuje ona symboliczną strukturę lasu i położenie tornada. Drzewa nieuszkodzone mają pień koloru brązowego oraz zieloną koronę, drzewa złamane wizualizowane są w kolorze czerwonym, a drzewa przewrócone w kolorze niebieskim. W lewym górnym rogu ukazany jest rzut lasu z góry, który posiada taką samą konwencję kolorów jak wizualizacja 3D. Można na nim dokładniej zaobserwować kierunki działania wiatru tornada przy przewracaniu drzew.

Dodatkowo, przytrzymując przycisk **Wytrzymałość** możliwa jest wizualizacja potencjalnej wytrzymałości drzew wyliczana na podstawie otoczenia każdego z nich (Rysunek 8). Kolor niebieski oznacza najmniej wytrzymałe drzewo, czyli znajdujące się na skraju lasu i/lub nieposiadające bliskich sąsiadów. Im korona bardziej przechodzi w kolor czerwony, drzewo klasyfikowane jest jako bardziej wytrzymałe dzięki tłumieniu wiatru przez drzewa położone w najbliższym jego otoczeniu.

Nad ramką wizualizacji znajduje się panel sterowania symulacją. Dostępne przyciski kontroli to:



Rysunek 8: Przykładowa wizualizacja wytrzymałości drzew.

- **Parametry** – wyświetlenie okna ustawiania parametrów symulacji oraz właściwości modeli Rankine i HWind.
- **Start/Stop** – rozpoczęcie/zatrzymanie symulacji.
- **Reset** – przywrócenie wartości początkowych (ustawionych w oknie Parametry) symulacji, wygenerowanie nowego lasu.
- **Wytrzymałość** – przytrzymanie tego przycisku powoduje wyświetlenie informacji o wytrzymałości drzew w postaci kolorów.

Ponadto, istnieje możliwość zmiany skali wizualizacji przesuwając suwak z etykietą „Powiększenie” na pożądaną pozycję.

5.1 Okno parametrów symulacji

Wygląd interfejsu manipulacji parametrami programu przedstawia rysunek 9.

W ramce **Świat** możemy ustawić wymiary (szerokość i długość) siatki, na której zostanie wygenerowany las.

Ramka **Wir** pozwala na manipulację parametrami modelu wiru Rankine. Posiada następujące kontrolki:

- **Promień (max)** – maksymalny promień tornada przy podłożu
- **Prędkość trawersalna (max)** – maksymalna prędkość trawersalna tornada
- **Prędkość radialna (max)** – maksymalna prędkość radialna tornada

- **Prędkość translacji** – prędkość przemieszczania się tornada
- **Współrzędne początku** – kolejno współrzędna x oraz y początku rozchodzenia się tornada
- **Kąt przemieszczania się** – kierunek przemieszczania się tornada

Ostatnia ramka **Las** pozwala dobrać parametry oraz strategię generowania rozmieszczenia drzew. Parametr **Odstęp między drzewami** określa gwarantowany rozstaw dowolnych dwóch drzew w dowolnej strategii. Lista rozwijana o etykiecie **Rozkład drzew** pozwala wybrać sposób generowania lasu spośród następujących:

- **Jednorodny** – drzewa rozłożone są równomiernie na całym obszarze, o odstępach określonych w poprzedniej kontrolce
- **Losowy** – drzewa rozmieszczone są w sposób losowy
- **Plama** – las zajmuje pewien losowy, spójny obszar siatki

The image shows a software window titled "Swiat" (World) with a close button in the top right corner. The window is divided into three main sections: "Swiat", "Wir", and "Las". Each section contains several parameters with input fields and up/down arrows for adjustment. The "Swiat" section has "Szerokosc:" (Width) set to 100 and "Dlugosc:" (Length) set to 100. The "Wir" section has "Promien (max):" (Radius (max)) set to 5, "Predkosc trawersalna (max):" (Traversal speed (max)) set to 5, "Predkosc radialna (max):" (Radial speed (max)) set to 15, "Predkosc translacji:" (Translation speed) set to 15, "Wspolrzedne poczatku:" (Start coordinates) with two fields both set to 0, and "Kat przemieszczania sie:" (Moving angle) set to 45. The "Las" section has "Odstepy miedzy drzewami:" (Distance between trees) set to 12 and "Rozklad drzew:" (Tree distribution) set to "Plama". At the bottom right of the window is a button labeled "Zastosuj" (Apply).

Rysunek 9: Okno ustawiania parametrów symulacji.

6 Przykładowe wyniki symulacji

Przeprowadzono przykładowe symulacje w celu zweryfikowania wyników oraz zwalidowania przyjętych modeli zjawisk fizycznych.

6.1 Symulacja wąskiego tornada

Parametry pierwszej symulacji przedstawia rysunek 10. Jest to dosyć wąskie tornado, przemierza prawie cały las pod kątem 45 stopni.

Swiat	
Szerokosc :	200
Dlugosc :	200

Wir	
Promien (max) :	7
Predkosc trawersalna (max) :	12
Predkosc radialna (max) :	13
Predkosc translacji :	14
Wspolzedne poczatku :	-8 -8
Kat przemieszczania sie :	45

Las	
Odstepy miedzy drzewami :	9
Rozklad drzew :	Jednorodny

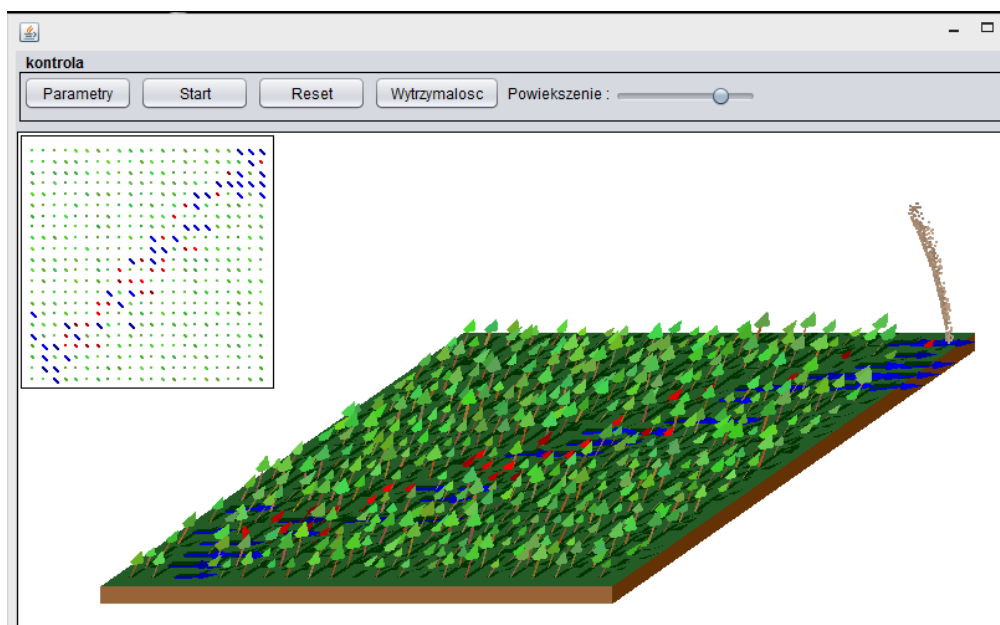
Zastosuj

Rysunek 10: Parametry pierwszej przykładowej symulacji.

Wyniki symulacji zaprezentowane są na rysunku 11. Jak widzimy, zgodnie z założeniami modelu tornado dokonało największych zniszczeń na obrzeżach lasu, gdzie wytrzymałości drzew są najmniejsze. Najlepiej przetrwały drzewa centralne, które otoczone są innymi drzewami.

6.2 Symulacja szerokiego tornada

Parametry drugiej symulacji przedstawione są na rysunku 12. Jest to dosyć szersze tornado, o parametrach podobnych do pierwszego przykładu.

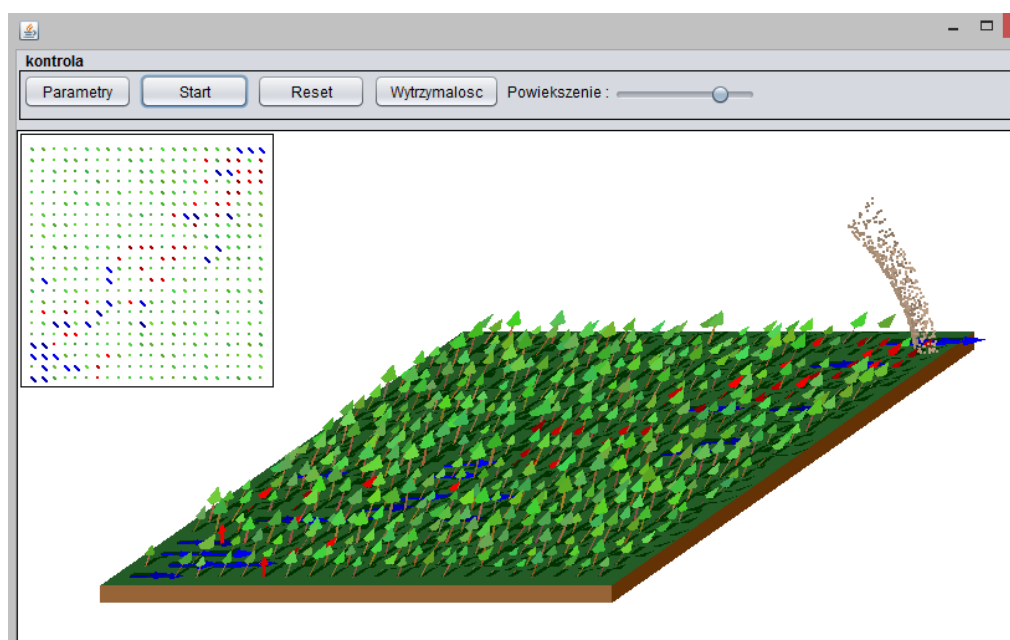


Rysunek 11: Wynik pierwszej przykładowej symulacji.

The image shows a parameter configuration window titled "kontrola". It is organized into three sections: "Swiat", "Wir", and "Las".
- The "Swiat" section contains two parameters: "Szerokosc" (Width) set to 200 and "Dlugosc" (Length) set to 200.
- The "Wir" section contains six parameters: "Promien (max)" (Radius max) set to 16, "Predkosc trawersalna (max)" (Transverse speed max) set to 11, "Predkosc radialna (max)" (Radial speed max) set to 12, "Predkosc translacji" (Translation speed) set to 13, "Wspolzedne poczatku" (Start coordinates) set to -8 for both x and y, and "Kat przemieszczania sie" (Movement angle) set to 45.
- The "Las" section contains two parameters: "Odstępy między drzewami" (Distance between trees) set to 9, and "Rozkład drzew" (Tree distribution) set to "Jednorodny" (Uniform).
At the bottom right of the window is a button labeled "Zastosuj" (Apply).

Rysunek 12: Parametry drugiej przykładowej symulacji.

Wyniki symulacji zaprezentowane są na rysunku 13. Można zauważyć, iż tornado ma większy zasięg, jednak zwiększył się stosunek ilości drzew złamanych do ilości drzew przewróconych, co wskazuje na mniejszą siłę wiatru. Również w centrum tornada część drzew zostało nietkniętych, ponieważ w środku tornada panuje mniejszy wiatr. Tak jak w pierwszym przypadku można zaobserwować zmniejszoną wytrzymałość drzew na krańcach lasu.



Rysunek 13: Wynik drugiej przykładowej symulacji.

7 Walidacja

Poddając model walidacji można się przekonać, czy wybrany model wiernie odwzorowuje rzeczywiste zjawiska fizyczne. Zdjęcie 14 przedstawia las po przejściu tornada w Hrabstwie Rabun w stanie Georgia w Stanach Zjednoczonych. Można zauważyć, że tornado miało dużą szerokość, czym przypominało tornado z drugiej przykładowej symulacji. Widać także podobieństwo w skutkach – oba tornada w przeważającej ilości tylko połamały drzewa, ponieważ nie posiadały wystarczającej siły aby je przewrócić.

Zdjęcie 15 ukazuje las w Parku Narodowym Great Smoky Mountains na pograniczu stanów Karolina Północna i Tennessee w Stanach Zjednoczonych po przejściu tornada. Widać, że tornado miało większą siłę i było momentami stosunkowo wąskie. Tam, gdzie trzewa rosły rzadziej, tornado wyrządziło największe szkody. Na zewnątrz centrum



Rysunek 14: Las po tornadzie w stanie Georgia.

tornado zostały wyrządzone większe szkody niż na trasie środka wiru. Można uznać, że dane te zgadzają się z przyjętym modelem.



Rysunek 15: Las po tornadzie w Parku Narodowym Great Smoky Mountains.

8 Statystyki

W celu prezentacji statystyk przeprowadzone zostały wielokrotne przebiegi symulacji. Wyniki te pozwolą na określenie średniej wielkości zniszczeń i ekstremów.

Pierwszy zestaw symulacji został przeprowadzony dla parametrów:

- Wymiary: $200m \times 200m$
- Promień (max): $7m/s$
- Prędkość trawersalna (max): $12m/s$
- Prędkość radialna (max): $13m/s$
- Prędkość translacji: $14m/s$
- Punkt startowy: $(-8, -8)$
- Kąt przemieszczania się wiru: 45 stopni
- Odstępy między drzewami: $9m$
- Rozkład drzew: Jednorodny

Wyniki przedstawia tabela 1:

Tablica 1: Wyniki dla rozkładu jednorodnego.

Wyrwane	Złamane	Początkowa liczba
28	47	529
37	52	529
34	53	529
46	47	529
42	60	529
34	47	529

Analizując tabelę można stwierdzić, że stopień zniszczeń lasu dla zadanych parametrów nie jest duży. Średnia liczba wyrwanych drzew wyniosła około 37 sztuk, w przypadku złamań: 51. Największa liczba wyrwanych drzew jaka wystąpiła w przebiegach symulacji to 46, najmniejsza: 28. W przypadku złamań jest to odpowiednio 60 i 47. Średnio zniszczonych zostało 16.64% drzew.

Kolejny zestaw symulacji został przeprowadzony dla parametrów:

- Wymiary: $100m \times 100m$
- Promień (max): $7m/s$
- Prędkość trawersalna (max): $12m/s$
- Prędkość radialna (max): $13m/s$
- Prędkość translacji: $14m/s$
- Punkt startowy: $(-8, -8)$
- Kąt przemieszczania się wiru: 45 stopni
- Rozkład drzew: Losowy

Wyniki przedstawia tabela 2:

Tablica 2: Wyniki dla rozkładu losowego.

Wyrwane	Złamane	Początkowa liczba
30	32	100
23	30	100
33	30	100
27	35	100
24	28	100
26	25	100

Stopień zniszczeń jest widocznie większy niż w poprzednich symulacjach. Spowodowane jest to głównie znacząco mniejszą liczbą drzew jak i nierównomiernym zagęszczeniem. Średnia liczba wyrwanych drzew wyniosła 27, najmniejsza 23, największa 33. W przypadku złamanych drzew jest to odpowiednio 30, 25, 35. Średnio zniszczonych zostało 57% drzew.

Ostatni zestaw symulacji został przeprowadzony dla parametrów:

- Wymiary: $100m \times 100m$
- Promień (max): $7m/s$
- Prędkość trawersalna (max): $12m/s$
- Prędkość radialna (max): $13m/s$
- Prędkość translacji: $14m/s$

- Punkt startowy: $(-8, -8)$
- Kąt przemieszczania się wiru: 45 stopni
- Rozkład drzew: Plama

Wyniki przedstawia tabela 3:

Tablica 3: Wyniki dla rozkładu typu ‘plama’.

Wyrwane	Złamane	Początkowa liczba
26	21	100
14	10	100
19	50	100
11	18	100
24	31	100
7	12	100

Wyniki tych przebiegów są bardzo zróżnicowane. Wynika to ze sposobu generowania lasu - niekiedy mogło się zdarzyć, iż wir nie przechodził bezpośrednio przez las, lecz po jego krawędzi, co wpłynęło znacząco na stopień zniszczeń. Średnia wyrwanych drzew: 17, złamanych: 24. Minimalna liczba wyrwanych to 7 drzew, maksymalna 26. Odpowiednio dla złamanych jest to 10 i 50. Średnio zniszczonych zostało 41% drzew.

Literatura

- [1] H. Bluestein. Mobile doppler radar observations of tronadoes, 2007.
- [2] Radosław Chmielarz. Modelowanie gwałtownych zjawisk atmosferycznych. Master’s thesis, AGH, 2011.
- [3] F. Stel D. B. Giaioti. The rankine vortex model. 2006.
- [4] K. T. Kilty. Steady-state tornado vortex models. 2005.
- [5] B. Feuerstein M. Hubrig N. Dotzek, R. E. Peterson. Comments on a simple model for simulating tornado damages in forests. 2007.
- [6] H. Peltola. Mechanical stability of trees under static loads. 2006.
- [7] H. Peltola and S. Kellomäki. *A mechanistic model for calculating windthrow and stem breakage at stand edge*. Silva Fennica, 1993.

-
- [8] Jarosław Wąs Radosław Chmielarz. System for simulating tornado damages in forests. *Oficina Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, 2011.