

**Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie**

Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki



PRACA MAGISTERSKA

RADOSŁAW CHMIELARZ

**MODELOWANIE GWAŁTOWNYCH ZJAWISK
ATMOSFERYCZNYCH**

PROMOTOR:
dr inż. Jarosław Wąs

Kraków 2011

OŚWIADCZENIE AUTORA PRACY

OŚWIADCZAM, ŚWIADOMY ODPOWIEDZIALNOŚCI KARNEJ ZA POŚWIADCZENIE NIEPRAWDY, ŻE NINIEJSZĄ PRACĘ DYPLOMOWĄ WYKONAŁEM OSOBIŚCIE I SAMODZIELNIE, I NIE KORZYSTAŁEM ZE ŹRÓDEŁ INNYCH NIŻ WYMIESZCZONE W PRACY.

.....

PODPIS

AGH
University of Science and Technology in Krakow

Faculty of Electrical Engineering, Automatics, Computer Science and Electronics



MASTER OF SCIENCE THESIS

RADOSŁAW CHMIELARZ

SEVERE WEATHER EVENTS MODELING

SUPERVISOR:
Jarosław Wąs D.Sc.

Krakow 2011

Spis treści

1. Wprowadzenie	8
1.1. Cele pracy	8
1.2. Zawartość pracy	8
1.3. Modele pogodowe.....	8
1.4. Gwałtowne zjawiska atmosferyczne.....	9
2. Model zniszczeń lasów wywołanych przez tornada	11
2.1. Model wiru Rankine	11
2.2. Model łamliwości drzew.....	13
2.3. Ogólne założenia modelu.....	18
3. Aplikacja modelująca	19
3.1. Środowisko programistyczne.....	19
3.2. Funkcjonalność programu.....	19
3.3. Interfejs użytkownika.....	19
3.3.1. Interfejs symulacji.....	20
3.3.2. Interfejs edytora lasu.....	21
3.3.3. Interfejs wizualizacji tornada 3D	22
3.4. Architektura klas.....	23
3.4.1. Klasa AbstractTreeModel	23
3.4.2. Klasa HWIND	24
3.4.3. Klasa HWINDData	26
3.4.4. Klasa AbstractVortexModel	27
3.4.5. Klasa Rankine	28
3.4.6. Klasa Simulation	28
3.4.7. Klasa TreeData	29
3.4.8. Klasa VortexData	29
3.4.9. Klasa Visualization	30
3.5. Przepływ danych.....	30
4. Rezultaty	32
4.1. Weryfikacja implementacji modelu Rankine	32
4.2. Implementacja trójwymiarowego modelu Rankine	34
4.3. Weryfikacja modelu drzew	39
4.4. Potencjalne kierunki rozwoju	46
5. Podsumowanie	48

Indeks symboli

- a – wysokość środka korony
- b – odległość pomiędzy czubkiem drzewa a środkiem korony
- d_{bh} – średnica drzewa na wysokości piersi człowieka (1.3 m)
- f_{gap} – uzyskany eksperymentalnie stosunek pomiędzy maksymalnym a średnim współczynnikiem odległości pomiędzy drzewami
- f_{gust} – uzyskany eksperymentalnie stosunek pomiędzy maksymalnym a średnim momentem ugięcia
- $f(z, R_0)$ – funkcja zmiany maksymalnego promienia tornada R w zależności od wysokości z
- f_{RW} – stosunek wagi gleby do masy drzewa, różny w zależności od gatunku
- g – przyspieszenie ziemskie
- $g(z, x_0, y_0)$ – funkcja zmiany współrzędnych środka tornada w zależności od wysokości z
- h – wysokość drzewa
- $l(z)$ – odległość od czubka drzewa na wysokości z
- m_c – masa korony drzewa
- p – szerokość pasa wolnej przestrzeni przed ścianą lasu
- r – odległość od środka tornada w danym punkcie
- s – odległość pomiędzy drzewami
- $shift(z, R_0)$ – funkcja przesunięcia środka tornada w zależności od wysokości z i promienia przy podstawie R_0
- u, v – wektory wiatru
- $v_h, v(z)$ – prędkość pozioma wiatru dla danego segmentu drzewa na wysokości z
- $v_{srednie}$ – prędkość wiatru wiejącego stale na wysokości 10 m nad Ziemią przez co najmniej 10 minut
- v_{zryw} – prędkość nagłego podmuchu wiatru
- $x(z)$ – odchylenie czubka drzewa od pionu
- x_z, y_z – współrzędne położenia środka wiru x i y na wysokości z
- z – wysokość nad powierzchnią Ziemi
- ρ – gęstość powietrza
- $A(z)$ – przewidywana wielkość korony drzewa stawiająca opór wiatrowi
- B_{max} – maksymalny moment skręcający
- C_d – współczynnik tarcia
- F_g – siła grawitacji
- F_w – pozioma siła wiatru

I – powierzchniowy moment bezwładności

MOE – współczynnik elastyczności

MOR – współczynnik pękania drewna

M_{bk} – siła potrzebna na złamanie drzewa

M_{ov} – siła potrzebna na przewrócenie drzewa

R_0 – maksymalny promień tornada przy powierzchni Ziemi

R_{depth} – głębokość korzenia

R_{mass} – masa korzenia

R_{max} – maksymalny promień tornada

S_t – współczynnik przepływu wiatru

V_{cir} – prędkość cyrkularna - wypadkowa prędkości trawersalnej i radialnej

V_r – prędkość radialna - prędkość zmiany długości promienia r

V_{trans} – prędkość translacji - prędkość poruszania się środka wiru

V_φ – prędkość trawersalna - prędkość zmiany położenia w kierunku prostopadłym do promienia r

1. Wprowadzenie

1.1. Cele pracy

Celami tej pracy było zapoznanie się z tematyką modelowania pogody oraz implementacja jednego z istniejących już modeli. Początkowo zamierzeniem autora była implementacja modelu przewidywania zjawisk pogodowych, jednakże w toku badań literatury zadanie to okazało się zbyt trudne dla pojedynczej osoby bez wiedzy eksperckiej. Do implementacji ostatecznie wybrana została aplikacja symulująca przejście tornada przez teren zalesiony. Jak starano się wykazać w ramach tej pracy, mimo pewnych uproszczeń modelu nadaje się on do symulowania prawdziwych zjawisk atmosferycznych.

Zagadnienie modelowania gwałtownych zjawisk atmosfery w Polsce jest raczej mało rozpowszechnione, jednakże z uwagi na intensyfikację tego typu zjawisk w ostatnich lata, prawdopodobnie z uwagi na zmiany klimatyczne, nabiera ono większego znaczenia dla naszego kraju.

Polskie Lasy Państwowe często poruszają na swoich stronach internetowych tematykę przejść gwałtownych wiatrów i trąb powietrznych przez posiadane przez nich lasy [6]. Zaimplementowany model może pomóc w określeniu charakterystyki sadzenia drzew i optymalnym doborze ich gatunków w obszarach o zwiększonym zagrożeniu tymi zjawiskami.

1.2. Zawartość pracy

Rozdział 1 – opisuje motywację do napisania pracy, ogólne informacje na temat modeli pogodowych oraz charakterystykę gwałtownych zjawisk atmosferycznych i opis tornad, z uwzględnieniem ich charakterystyki na terenie Polski.

Rozdział 2 – opisuje teoretyczne podstawy modelu wiru, modelu łamliwości drzew oraz modelu spajającego dwa poprzednie. W rozdziale tym opisane są wzory matematyczne składające się na model wiru Rankine i model łamliwości drzew HWIND.

Rozdział 3 – zawiera informacje na temat budowy programu. Rozdział ten zawiera opis środowiska programistycznego oraz instrukcję użycia programu. W dalszej jego części opisano architekturę klas klas występujących w aplikacji wraz z użytymi w nich algorytmami oraz diagram przepływu danych.

Rozdział 4 – opisuje proces weryfikacji zaimplementowanych modeli. Rozdział ten prezentuje wyniki działania programu wraz z wnioskami z nich płynącymi oraz wskazuje jakie mogą być przyszłe kierunki rozwoju zaproponowanego modelu.

Rozdział 5 – jest rozdziałem podsumowującym. W rozdziale tym zawarte są najważniejsze wnioski płynące z wyników działania zaimplementowanego modelu oraz trudności napotkanych podczas tworzenia pracy.

1.3. Modele pogodowe

Według słownika języka polskiego [36] model to:

Konstrukcja, schemat lub opis ukazujący działanie, budowę, cechy jakiegoś zjawiska lub obiektu.

W kontekście niniejszej pracy będzie mowa o *modelu matematycznym*, czyli opisie systemu za pomocą zbioru równań [23]. Modele można dzielić według różnych kryteriów:

- **Liniowe i nieliniowe** – ze względu na rodzaj użytych równań
- **Deterministyczne i probabilistyczne** – ze względu na to czy parametry równania są określone jednoznacznie czy też mogą być losowe
- **Statyczne i dynamiczne** – ze względu na zmienność stanu modelu w czasie
- **Dyskretne i ciągłe** – ze względu na rodzaj funkcji w zbiorze równań

Niestety nie istnieje możliwość dokładnego odwzorowania fizycznego systemu, co przekłada się na powstawanie błędów i obecność niepewności w modelach. Jednakże nawet jeśli model opisuje rzeczywistość tylko częściowo nadal może być użyteczny przy analizie zjawiska, jeśli opisuje własności mające największy wpływ na dane wydarzenie.

Głównym celem w modelowaniu pogody jest jej prognozowanie w celu dostosowania bieżących działań lub sprawdzenia jak dane zjawisko wpłyniełoby na konstrukcje stworzone przez człowieka. Ogólnie znany faktem jest duża niedokładność przewidywań pogodowych która pogarsza się wraz z wydłużeniem okresu opisu pogody. Spowodowane jest to chaotyczną naturą systemu pogodowego, przez co nawet niewielkie zmiany parametrów wejściowych w modelach pogodowych powodują ogromne różnice pomiędzy rzeczywistością a wynikiem działania modelu wraz z postępem czasu. Problemom tym można częściowo zaradzić dając do lokalizacji domeny zadania, gdzie równania opisujące system można z powodzeniem aproksymować poprzez równania liniowe.

Modele pogodowe stosowane w prognozowaniu znacznie różnią się w swojej strukturze i stopniu skomplikowania. Istnieją modele na tyle proste iż ich wykonanie zajmuje kilka sekund na komputerze domowym oraz na tyle skomplikowane że ich wykonanie zajmuje kilkadesiąt godzin superkomputerem w centrach obliczeniowych [13].

Przykładem modelu pogodowego może być COSMO-LM [1], stosowany m.in. przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej [3]. Consortium For Small Scale Modeling Lokal-Modell jest mezoskalowym modelem numerycznym. Jego działanie polega na rozwiązywaniu niehydrostatycznych równań dynamicznych płynów ściśliwych. Model wykorzystywany jest do predykcji pogody w niskich warstwach atmosfery ze szczególnym naciskiem na chmury, mgłę, opady, profil poziomy i pionowy wiatrów oraz gwałtowne zjawiska atmosferyczne takie jak superkomórki burzowe, linie szkwału i intensywne opady śniegu spowodowane mezocyklonami zimowymi.

Dane początkowe potrzebne doinicjalizacji uzyskiwane są ze stacji pogodowych. Obliczenia prowadzane są na siatce o rozdzielcości od 1 do 3 km przy użyciu Fortran-90 i protokołu przesyłania komunikatów pomiędzy procesami w klastrze obliczeniowym MPI. Obliczenie prognozy pogody na jedną godzinę w przód dla siatki $109 \times 109 \times 20\text{km}$ zajmuje maszynie SGI/Cray T3E 8 sekund przy wykorzystaniu 256 procesorów. Do działania program wymaga platform Cray XT Opteron, IBM Power lub SGI Origin.

1.4. Gwałtowne zjawiska atmosferyczne

Według European Severe Weather Database [2] do gwałtownych zjawisk atmosferycznych zalicza się:

- **Wir kurzu (dust devil)** – wir niezwiązany z żadną chmurą, mający od kilku do kilkudziesięciu metrów średnicy, unoszący się nad ziemią.
- **Chmura lejkowa (funnel cloud)** – wir powietrza opadający z chmury ale nie połączony z powierzchnią ziemi.

- **Tornado szkwałowe (gustando)** – wir powietrza o średnicy od kilku do kilkudziesięciu metrów unoszący się nad ziemią i nie połączony z żadną chmurą.
- **Ulewny deszcz (heavy rain)** – deszcz powodujący duże szkody materialne.
- **Duży grad (large hail)** – grad o średnicy przekraczającej 2 cm.
- **Tornado** – wir powietrza od kilku metrów do kilku kilometrów średnicy, rozcięgnięty pomiędzy chmurą a powierzchnią ziemi.
- **Gwałtowne podmuchy wiatru (severe wind gusts)** – najczęściej występujące w Polsce w ostatniej dekadzie gwałtowne zjawisko atmosferyczne (według bazy ESWD [2]); są to nagłe porywy wiatru o prędkości przekraczającej 25 m/s.

W pracy tej skupiono się na działaniu tornad. Tornado, czy też trąba powietrzna jak nazywane jest to zjawisko jeśli występuje w Europie [9], to bardzo silny wiatr o niszczącej sile tworzący wirujące kolumny powietrza. Trąby powietrzne występują w Europie aż do 60° szerokości geograficznej północnej. Nie jest to zjawisko częste, w Polsce do roku 2000 odnotowywało się od 1 do 4 trąby powietrznych rocznie, najczęściej od czerwca do sierpnia [29]. Obecnie European Severe Weather Database [2] informuje o 83 gwałtownych podmuchach wiatru oraz o 18 trąbach powietrznych w Polsce w roku 2010, jednakże czasami zdarza się że tornado klasyfikowane jest błędnie jako gwałtowny podmuch wiatru, więc ich liczba w Polsce może być większa.

Dokładna geneza tego zjawiska nie jest do końca znana, jednakże wiadomo że występuje ono na pograniczu dwóch mocno zróżnicowanych termicznie i wilgotnościowo mas powietrza. W Polsce są to zazwyczaj ciepłe i wilgotne masy zwrotnikowe oraz masy polarno-morskie. Trąby powietrzne powstają zazwyczaj przed frontem chłodnym w masie ustępującego ciepłego i wilgotnego powietrza, w której utrzymuje się silna konwekcja i dochodzi do powstania gwałtownych burz, nawałnic, szkwałów i trąb powietrznych. W warunkach tych powstają chmury burzowe z silnymi pionowymi oraz poziomymi prądami powietrza sięgającymi od chmur Cumulonimbus aż do powierzchni Ziemi. Prądy te formują leje powietrza skierowane ku Ziemi, który obniżając się zmniejsza swoją średnicę. Powoduje to powstanie siły odśrodkowej i w konsekwencji znaczny spadek ciśnienia wewnętrz leju w stosunku do otoczenia o kilkudziesiąt hPa. Z chwilą zetknięcia leja z Ziemią rozlearedzone powietrze unosi pył i piasek w górę tworząc charakterystyczny kształt tornada. Z powodu dużej siły naporu zniszczeniu ulegają obiekty znajdujące się na powierzchni Ziemi.

Tornada na terenie Polski charakteryzuje wąski pas zniszczeń, około 200-250 m w zależności od rzeźby terenu i średnicy wiru. W terenach zabudowanych, bądź o wąskim przepływie powietrza niszczycielska moc trąby jest większa. W pracy tej skupiono się na zniszczeniach spowodowanych w lasach.

Z uwagi na nieprzewidywalność pojawienia się tego rodzaju zdarzenia, nieczęsto daje się zmierzyć jego charakterystykę za pomocą radaru Dopplera. Za narzędzia do oceny siły tornad przyjęto zniszczenia jakie powoduje ono na drodze swojego przejścia. Zniszczenia te mierzone są za pomocą Skali Fujity [8]. Jest to skala 7 stopniowa, która określa poziom zniszczeń którym odpowiada przedział prędkości tornad. Skala zaczyna się dla wirów o prędkości $64 \frac{km}{h}$, skończywszy na $609 \frac{km}{h}$. Tornada występujące w naszym kraju są klasyfikowane zazwyczaj od F0 do F2, co przekłada się na prędkość od 64 do $252 \frac{km}{h}$, niekiedy zdarzają się jednak tornado o większej sile, np. trąba powietrzna która przeszła w okolicy Lublina 20 lipca 1931 roku miała prędkość pomiędzy 396 a $522 \frac{km}{h}$ co klasyfikuje ją jako F4 lub F5 [7].

Zjawisko to w Polsce charakteryzuje się następującymi właściwościami:

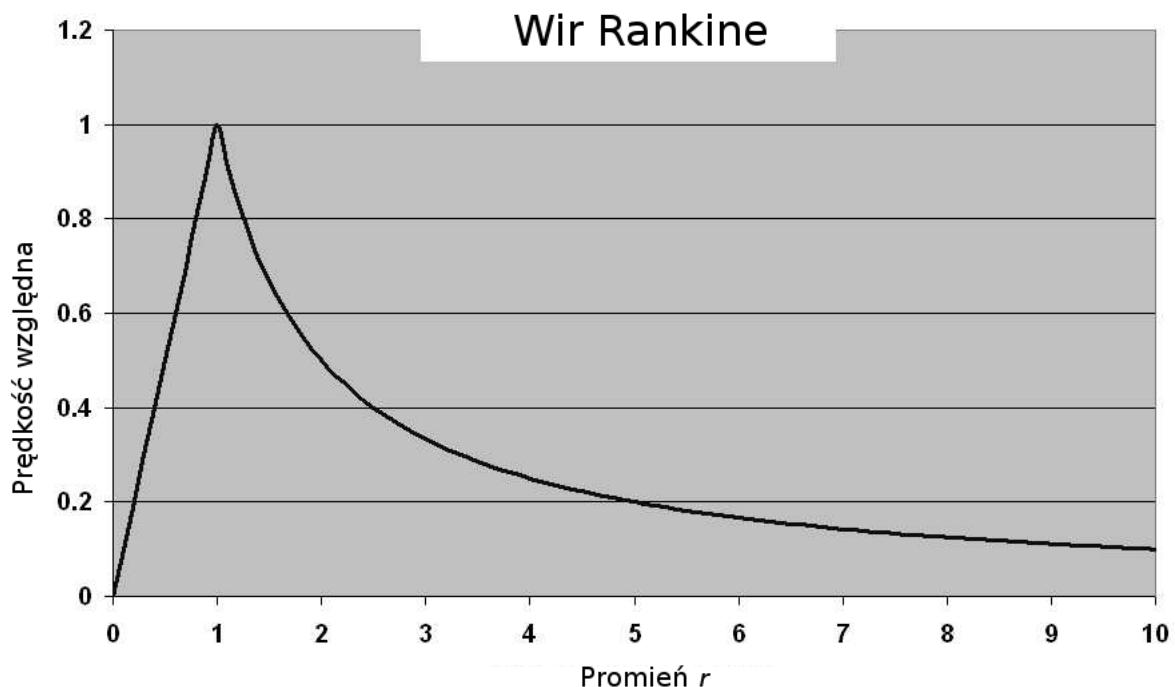
- prędkość przemieszczania się – $30 - 40 \frac{km}{h}$ (ok. $8 - 11 \frac{m}{s}$)
- prędkość wiatru wewnętrz wiru – $180 - 360 \frac{km}{h}$ (ok. $50 - 100 \frac{m}{s}$)
- średnica wiru – od kilku do 200 metrów
- czas trwania – od kilku sekund do kilku minut

2. Model zniszczeń lasów wywołanych przez tornada

W rozdziale tym przedstawiono podstawowe informacje dotyczące modelu symulacji zjawisk atmosferycznych zastosowanego w tej pracy. Model w różnych wariantach został opisany w literaturze. Na szczególną uwagę zasługują opracowania dr Beck i dr Dotzek, które poruszają temat najbardziej szczegółowo. Model składa się z wiru Rankine, który symuluje działanie tornada, oraz z modelu drzew HWIND, który wylicza siłę potrzebną do złamania lub przewrócenia drzewa przez wiatr.

2.1. Model wiru Rankine

Wir Rankine wymyślony w połowie XIX wieku przez Williama Johna Macquorna Rankine [22] jest przykładem wiru składającego się z dwóch obszarów. W pierwszym, wewnętrznym, obszarze nazywanym także rdzeniem wiru [27] prędkość zwiększa się liniowo wraz z oddalaniem się od punktu środkowego wiru, aż do osiągnięcia maksimum przy promieniu R . W obszarze zewnętrznym zaś prędkość zmniejsza się wraz z odległością od centrum, tak jak można zaobserwować na wykresie 2.1.



Rysunek 2.1: Zależność pomiędzy prędkością a odległością od centrum wiru r . Źródło: [28].

Wzory opisujące powyższy model najlepiej przedstawić w układzie współrzędnych biegunowych. Prędkość trawersalna V_φ opisana została we wzorze 2.1.

$$V_\varphi = \begin{cases} V_{\varphi,max} \left(\frac{r}{R_{max}} \right) & \text{dla } r \leq R_{max}, \\ V_{\varphi,max} \left(\frac{R_{max}}{r} \right)^{0.6} & \text{dla } r > R_{max}. \end{cases} \quad (2.1)$$

gdzie

V_φ – prędkość trawersalna - prędkość zmiany położenia w kierunku prostopadłym do promienia r

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

r – odległość od środka tornada w danym punkcie

R_{max} – maksymalny promień tornada

Prędkość radialna V_r opisana została w sposób analogiczny do prędkości trawersalnej, z wyjątkiem użycia innej prędkości maksymalnej, we wzorze 2.2 oraz spotęgowania stosunku maksymalnego promienia wiru do promienia w danym punkcie o wykładnik 0.6. Stała ta została oszacowana w pracy [18] poprzez mierzenie prędkości radialnej tornad za pomocą przenośnego radaru Dopplera.

$$V_r = \begin{cases} V_{r,max} \left(\frac{r}{R_{max}} \right)^{0.6} & \text{dla } r \leq R_{max}, \\ V_{r,max} \left(\frac{R_{max}}{r} \right)^{0.6} & \text{dla } r > R_{max}. \end{cases} \quad (2.2)$$

gdzie

V_r – prędkość radialna - prędkość zmiany długości promienia r

$V_{r,max}$ – maksymalna prędkość radialna wiatru

r – odległość od środka tornada w danym punkcie

R_{max} – maksymalny promień tornada

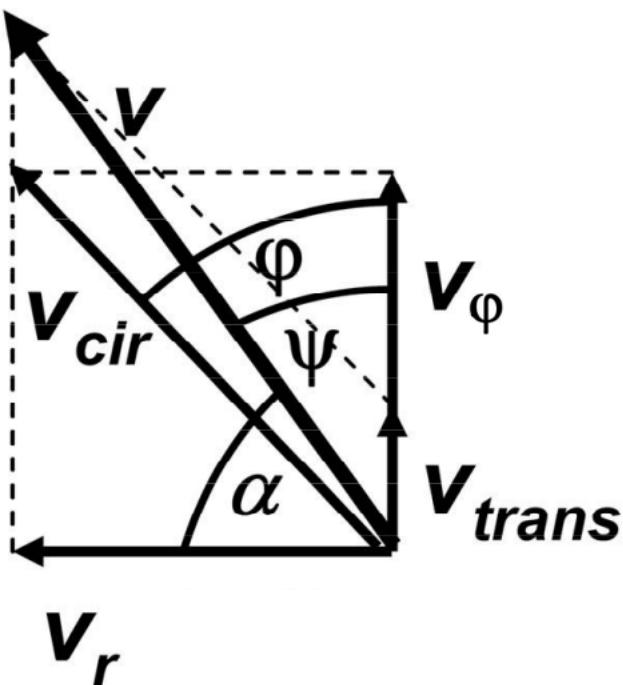
Model wiru Rankine jest modelem statycznej rotacji. W celu zasymulowania ruchu tornada po płaszczystie model został wzbogacony o prędkość translacji V_{trans} .

Jak widać na rysunku 2.2 w modelu rozszerzonym mamy cztery wektory prędkości. Prędkość cyrkularna V_{cir} jest sumą wektora prędkości trawersalnej (V_φ) i radialnej (V_r). Prędkość całkowita V tornada w danym punkcie przestrzeni jest wypadkową wektora prędkości cyrkularnej (V_{cir}) i wektora translacji (V_{trans}). Kąt α jest kątem pomiędzy wektorem prędkości całkowitej (V) a wektorem prędkości radialnej (V_r). Z kolei kąt φ jest kątem pomiędzy wektorem prędkości cyrkularnej (V_{cir}) a wektorem prędkości translacji (V_{trans}), zaś kąt ψ jest kątem pomiędzy wektorem prędkości całkowitej (V) a wektorem prędkości translacji (V_{trans}).

Skuteczność modelu w odwzorowywaniu rzeczywistych zjawisk atmosferycznych takich jak mezo- cyklony, tornada i wiry pyłowe została potwierdzona w pracach [22] i [37] za pomocą obserwacji tych zjawisk z użyciem radaru Dopplera.

Badane tornada wykazują zgodność strukturalną z modelem Rankine'a mimo dużej dynamiki zmian - tornada powstają i kończą swoją ewolucję w przeciągu nawet kilku minut. Można w nich także wydzielić obszar wewnętrznej i zewnętrznej rotacji, taki jak w modelu. Jednakże jeśli chodzi o aspekt ilościowy teoretyczne przewidywania odbiegają od zaobserwowanych wartości.

W rzeczywistych tornadach prędkość radialna (V_r) jest zazwyczaj mniejsza o rząd wielkości od prędkości trawersalnej (V_φ), który to fakt został uwzględniony w modelu.



Rysunek 2.2: Zależności pomiędzy wektorami prędkości w rozszerzonym modelu. Źródło: [19].

2.2. Model łamliwości drzew

Model łamliwości drzew HWIND został opracowany w roku 1999 przez prof. Peltola i prof. Kellomäki [34] dla sosny zwyczajnej oraz świerku pospolitego rosnących na glebach bielicowych. Badany był tam wpływ naporu wiatru oraz śniegu na wytrzymałość pni.

Model służy do obliczania maksymalnej prędkości wiatru dla sztucznie zalesianych lasów przy której drzewo ulegnie złamaniu lub wyrwaniu. Maksymalna prędkość dotyczy wiatrów wiejących ze stałą prędkością przez 10 min na wysokości 10 m ponad ziemią, jednakże w pracy [24] model został wykorzystany do badania szybkich zrywów wiatru w postaci trąb powietrznych, co uczyniono także w tej pracy.

Siły działające na drzewa zostały podzielone na poziome i pionowe, jak zostało to przedstawione na rysunku 2.3. Zakłada się że drzewo pod naporem wiatru przechyla się aż do punktu krytycznego w którym siły nacisku zrównują się z siłami oporu. Siłą poziomą stanowi tutaj napór wiatru, zaś siłą pionową grawitacja korony. Przeciwagę dla tych sił stanowi wytrzymałość pnia oraz wytrzymałość gleby wokół korzenia.

Natężenie wiatru oraz sił grawitacji oblicza się osobno na każdej wysokości drzewa razem z siłami oporu pnia i wytrzymałości gleby. Pozwala to na obliczenie maksymalnego momentu skręcającego i granicznej prędkości wiatru przy której drzewo będzie złamane lub wyrwane.

Całkowita pozioma siła wiatru F_w [33] obliczana jest osobno dla każdego 1 metrowego segmentu drzewa poczynając od podstawy pnia przy ziemi aż po czubek korony według wzoru 2.3. Uzyskane w ten sposób wartości są sumowane, a wynikiem jest siła pozioma dla całego drzewa.

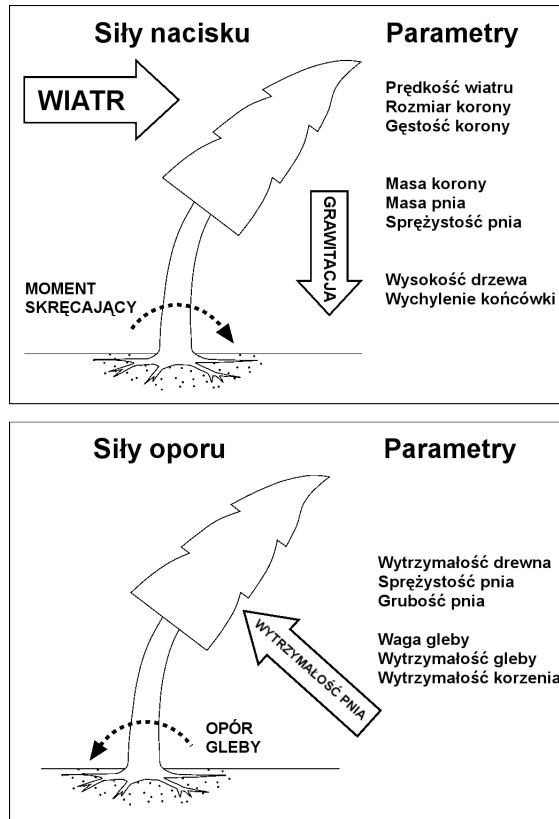
$$F_w(z) = \frac{1}{2} C_d \rho v_h^2 A(z) \quad (2.3)$$

gdzie

C_d – współczynnik tarcia

ρ – gęstość powietrza

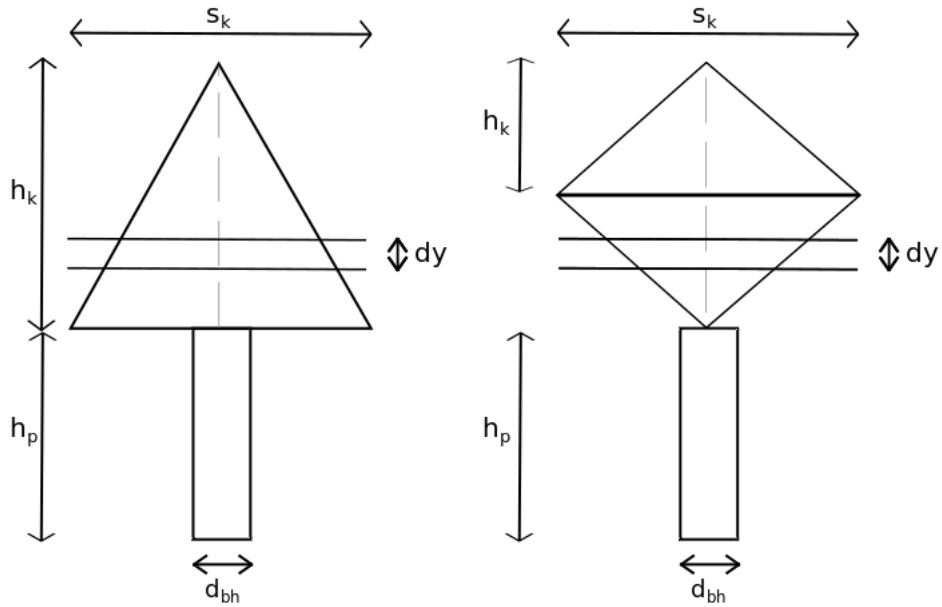
v_h – prędkość pozioma dla danego segmentu



Rysunek 2.3: Siły działające na drzewo w modelu HWIND. Źródło: [32]

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

Założona że prędkość pozioma v_h jest stała na całej wysokości pnia [24]



Rysunek 2.4: Model powierzchni drzewa stawiającej opór wiatrowi, gdzie s_k oznacza szerokość korony, h_k wysokość korony, h_p wysokość pnia, d_{bh} średnicę pnia, a d_y wycinek powierzchni o wysokości 1 m który będzie użyty podczas obliczeń w modelu HWIND.

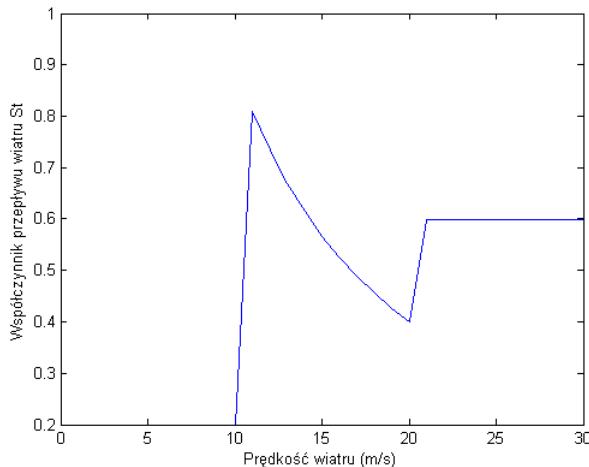
W celu obliczenia powierzchni drzewa stawiającej opór założono że kształt korony drzewa aproksymowany jest przez dwa trójkąty równoramienne zwrócone do siebie podstawami w przypadku sosny zwyczajnej oraz przez pojedynczy trójkąt równoramienny w przypadku świerku pospolitego tak jak na rysunku 2.4. Pole powierzchni pnia reprezentowane jest przez prostokąt.

Dodatkowo pod wpływem wiatru powierzchnia korony ulega zmniejszeniu [21]. Redukcja wynosi 20 % dla prędkości mniejszych niż $11 \frac{m}{s}$ i 60 % dla prędkości większych niż $20 \frac{m}{s}$. Pomiędzy tymi wartościami współczynnik przepływu wiatru S_t oblicza się za pomocą odpowiedniego wzoru. Pozycja [34] podaje wzór 2.4, który według autora jest błędny gdyż powstaje wtedy duża nieciągłość w wartościach współczynnika, co można zaobserwować na rysunku 2.5.

$$S_t(z) = \frac{10}{v(z)} - 0.1 \quad (2.4)$$

gdzie

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



Rysunek 2.5: Współczynnik przepływu wiatru S_t w zależności od prędkości wiatru według wzoru 2.4.

Inna pozycja [33] tych samych autorów podaje jednak że wzór ten powinien być interpolacją wartości pomiędzy 0.2 a 0.6, które to podejście zastosowano w tej pracy i przedstawiono we wzorze 2.5.

$$S_t(z) = 0.044444v(z) - 0.28889 \quad (2.5)$$

gdzie

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

Jak można zauważyć na rysunku 2.6 po zastosowaniu wzoru 2.5 wartości współczynnika S_t są ciągłe.

Aby uzyskać powierzchnię drzewa $A(z)$ należy pomnożyć powierzchnię aproksymowanego kształtu przez współczynnik S_t .

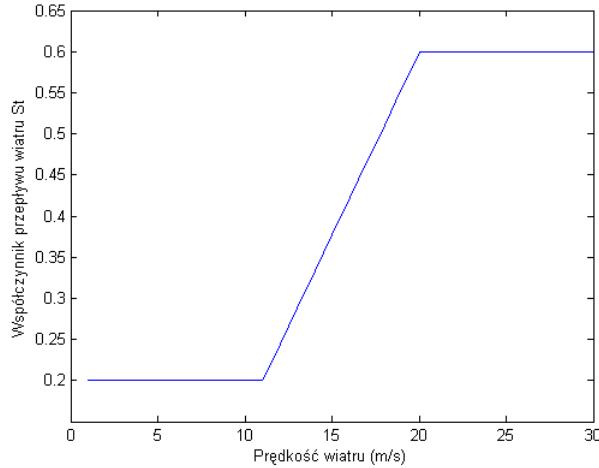
Kiedy drzewo pod naporem wiatru zacznie się odchylać pod uwagę brana jest dodatkowo siła grawitacji [24], która obliczana jest wzorem 2.6 dla każdego segmentu drzewa, a następnie jest sumowana.

$$F_g(z) = m_c g \quad (2.6)$$

gdzie

m_c – masa korony drzewa

g – przyspieszenie ziemskie



Rysunek 2.6: Współczynnik przepływu wiatru S_t w zależności od prędkości wiatru według wzoru 2.5.

Mając siłę poziomą F_w i pionową F_g można obliczyć maksymalny moment skręcający drzewa $B_{max}(z)$ [17] dla poszczególnych segmentów drzewa według wzoru 2.7.

$$B_{max}(z) = f_{gust} f_{gap} [F_w(z) \Delta z + F_g(z) x(z)] \quad (2.7)$$

gdzie

f_{gust} – uzyskany eksperymentalnie stosunek pomiędzy maksymalnym a średnim momentem ugięcia obliczany wzorem 2.9

f_{gap} – uzyskany eksperymentalnie stosunek pomiędzy maksymalnym a średnim współczynnikiem odległości pomiędzy drzewami obliczany wzorem 2.10

$x(z)$ – odchylenie czubka drzewa od pionu obliczane wzorem 2.8 [33]

Maksymalny moment skręcający drzewa B_{max} stanowi superpozycję siły pionowej pomnożonej przez wysokość drzewa oraz siły poziomej pomnożonej przez kształt drzewa pod naporem wiatru.

$$x(z) = \begin{cases} \frac{F_w a^2 h (3-a/h - 3l(z)/h)}{6*MOE*I} & \text{dla } z \leq a, \\ \frac{F_w a^3 (2-3(l(z)-b)/a + (l(z)-b)^3/a^3)}{6*MOE*I} & \text{dla } z < a \end{cases} \quad (2.8)$$

gdzie

a – wysokość środka korony

h – wysokość drzewa

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

MOE – współczynnik elastyczności zależny od gatunku drzewa

I – powierzchniowy moment bezwładności dany wzorem $I = \pi d_{bh}^4 / 64$, gdzie d_{bh} to średnica pnia na wysokości 1.3 m

b – odległość pomiędzy czubkiem drzewa a środkiem korony

Jednakże badania przeprowadzone w roku 2005 przez Gardner i Stacey [32] wykazały że drzewa zachowują się inaczej pod napływem wiatru w zależności od tego w jakiej odległości od ściany lasu się znajdują oraz jaką jest odległość pomiędzy nimi w lesie. Odpowiednie proporcje zostały wyprowadzone z danych eksperymentalnych do wzorów 2.9 i 2.10.

$$\begin{aligned} Gust_{mean} &= [0.68(s/h) - 0.0385] + [-0.68(s/h) + 0.4875][1.7239(s/h) + 0.0316]^{x/h} \\ Gust_{max} &= [2.7193(s/h) - 0.061] + [-1.273(s/h) + 9.9701][1.1127(s/h) + 0.0311]^{x/h} \\ f_{gust} &= \frac{Gust_{max}}{Gust_{mean}} \end{aligned} \quad (2.9)$$

gdzie

s – odległość pomiędzy drzewami

h – średnia wysokość drzew w lesie

W eksperymencie zauważono że pierwsze rzędy drzew w sztucznie zalesionych miejscowościach mają mniejszy maksymalny moment skręcający niż środek lasu, w którym to też występuły wahania pomiędzy poszczególnymi momentami skręcającymi. Jako przyczynę tego zjawiska podejrzewa się dynamikę przepływu powietrza. Co więcej najniższe momenty skręcające zauważono w lasach o dużej gęstości zalesienia.

$$\begin{aligned} Gap_{mean} &= \frac{0.001+0.001p^{0.562}}{0.00465} \\ Gap_{max} &= \frac{0.0072+0.0064p^{0.3467}}{0.0214} \\ f_{gap} &= \frac{Gap_{max}}{Gap_{mean}} \end{aligned} \quad (2.10)$$

gdzie

p – szerokość pasa wolnej przestrzeni przed ścianą lasu. W tej pracy przyjęto wartość tego parametru na 15 m

Dalszym krokiem jest obliczenie sił oporu drzewa. Zakłada się że pień drzewa nie pęka do momentu w którym siła wiatru nie rozerwie włókien w zewnętrznych partiach kory. Wytrzymałość tą oblicza się na wysokości klatki piersiowej człowieka (1.3 m) [33], a reprezentowana jest ona przez współczynnik pękania drewna. Zależność opisana jest wzorem 2.11.

$$M_{bk} = \frac{\pi}{32} MOR d_{bh}^3 \quad (2.11)$$

gdzie

MOR – współczynnik pękania drewna

d_{bh} – średnica drzewa na wysokości piersi człowieka (1.3 m)

Drugą siłą przeciwną jest wytrzymałość korzenia. Na siłę tą składa się masa gleby wokół korzenia w stosunku do części naziemnej drzewa [33]. Wartość ta opisana jest wzorem 2.12.

$$M_{ov} = \frac{g R_{mass} R_{depth}}{f_{RW}} \quad (2.12)$$

gdzie

g – siła grawitacji

R_{mass} – masa korzenia

R_{depth} – głębokość korzenia

f_{RW} – stosunek wagi gleby do masy drzewa, różny w zależności od gatunku

Drzewo zostanie złamane gdy całkowity moment ugięcia drzewa 2.7 przekroczy wytrzymałość pnia 2.11 lub wyrwane gdy moment ugięcia przekroczy wytrzymałość gleby wokół korzenia 2.12.

Dane zebrane w różnych opracowaniach modelu HWIND umożliwiają badanie wpływu wiatru na następujące gatunki drzew:

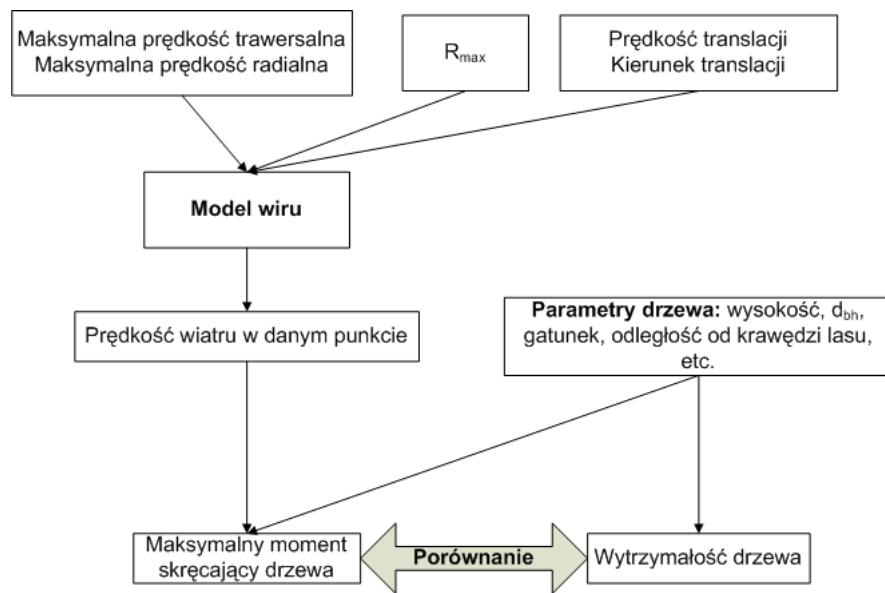
- Sosna zwyczajna (*Pinus sylvestris*)
- Świerk pospolity (*Picea abies*)

Gatunki te należą do najczęściej występujących drzew w Polsce [5].

2.3. Ogólne założenia modelu

W celu zasymulowania działania tornada na drzewa w lesie połączono dane wyjściowe modelu wiru Rankine oraz modelu łamliwości drzew HWIND.

Jak widać na schemacie działania połączonego modelu przedstawionego na rysunku 2.7 parametry wejściowe do modelu wiru to dane dotyczące maksymalnej prędkości trawersalnej i radialnej, maksymalny promień tornada R_{max} oraz dane dotyczące wektora prędkości przesuwania się centrum tornada w układzie współrzędnych biegunkowych – prędkość oraz kierunek. Po podaniu tych parametrów obliczana jest prędkość wiatru w poszczególnych punktach siatki według modelu statycznego wiru. Do parametrów wejściowych modelu łamliwości zalicza się takie dane jak wysokość, średnica pnia na wysokości klatki piersiowej d_{bh} , gatunek drzewa, odległość drzewa od krawędzi lasu oraz inne opisane w podrozdziale 2.2. Dane te w połączeniu z prędkością wiatru w danych punktach siatki pozwalają na obliczenie maksymalnego momentu skręcającego danego drzewa według wzoru 2.7. Wynik przecistawiany jest wytrzymałości drzewa. Jeśli moment ten przekracza siłę oporu drzewa na złamania opisanego we wzorze 2.11, wtedy drzewo ulega złamaniu. Jeśli moment skręcający przekracza siłę wytrzymałości drzewa na wyrwanie opisanej we wzorze 2.12, wtedy drzewo ulega złamaniu. W przypadku kiedy maksymalny moment skręcający nie przekracza żadnej z tych sił drzewo pozostaje w spoczynku.



Rysunek 2.7: Schemat działania połączonych modeli Rankine i HWIND.

Ograniczenia modelu

- założenie że tornado jest statyczne i ma kształt okręgu
- brak drugorzędnych efektów upadku drzew (działanie siły upadku wyrwanego lub złamaneego drzewa na drzewa sąsiednie, wpływ systemu ukorzenienia na wymaganą siłę wyrywania, wpływ rodzaju gleby na siłę wyrywania)
- jednolitość gatunkowa symulowanego lasu
- brak "przecinek" w symulowanym lesie

3. Aplikacja modelująca

W rozdziale tym przedstawiono otoczenie oraz budowę programu powstałego na podstawie modelu zaproponowanego w rozdziale 2. Rozdział rozpoczyna się opisem środowiska w jakim powstała aplikacja. Następnie przedstawiono w nim instrukcję jego obsługi, zaś na końcu umieszczono szczegółowy opis architektury programu składającego się z opisu klas oraz diagramu przepływu danych.

3.1. Środowisko programistyczne

Jako środowisko programistyczne został wybrany program *MATLAB* firmy MathWorks [4]. Jedną z głównych przyczyn tego wyboru jest bardzo dobre przystosowanie tego środowiska do obliczeń symulacyjnych oraz jego dobra znajomość przez autora pracy. Środowisko to posiada także dobre wsparcie dla wizualizacji oraz wsparcie obsługi zrównolegania obliczeń.

Wadą *MATLAB'a* jest niezbyt dobre przystosowanie do tworzenia kodu zorientowanego obiektywnie – tworzenie obiektów daje duży narzut czasowy. Nie stanowi to jednak tak dużego problemu z uwagi na to że program nie musi spełniać wymagań działania w czasie rzeczywistym, a po uruchomieniu większość czasu procesora zostanie poświęcona na obliczanie równań.

Dodatkowo do wizualizacji trójwymiarowej użyto biblioteki *VOL3D Volume render* autorstwa Joe Conti [11]. Biblioteka ta umożliwia efektywne pokazywanie dużych bloków danych 4D (3 wymiary oraz kolor). Narzędzie to posiada wsparcie biblioteki OpenGL.

3.2. Funkcjonalność programu

Funkcjonalność programu powstałego w ramach tej pracy przedstawiona jest na rysunku 3.1. Głównym celem programu jest stworzenie obrazu lasu po przejściu przez niego tornada o zadanych parametrach. Użytkownik wprowadza parametry wiru, parametry przestrzeni na której będzie przeprowadzona symulacja oraz informację na temat drzew w lesie. Podczas symulacji wizualizowana jest zmiana stanu wiru oraz lasu w czasie.

Po zakończonej symulacji użytkownik może sprawdzić szczegółowo dane dotyczące drzew w lesie po przejściu trąby powietrznej za pomocą wbudowanych narzędzi *MATLAB'a*.

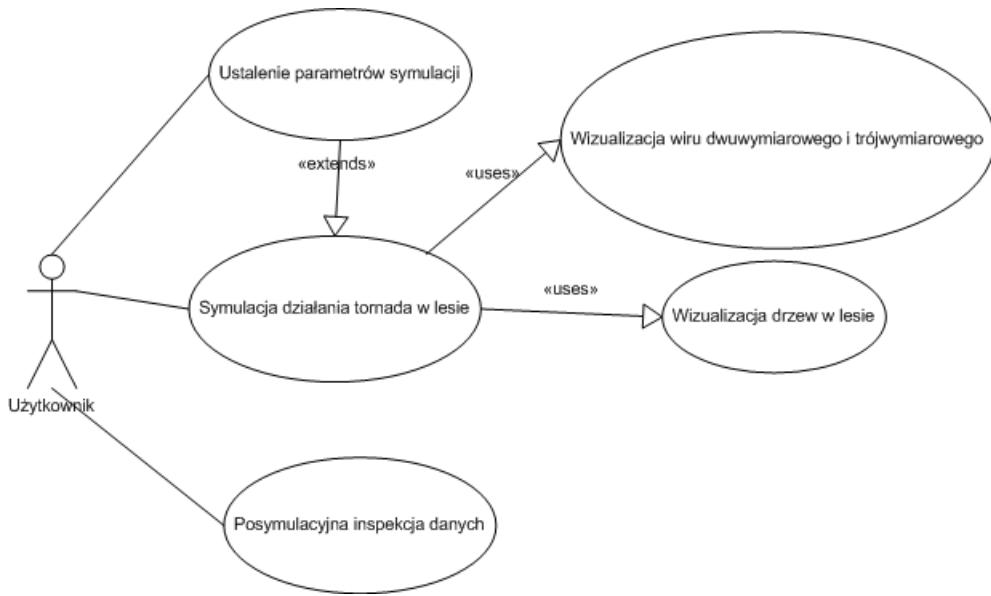
3.3. Interfejs użytkownika

Aplikację uruchamia się przechodząc w środowisku MATLAB do katalogu zawierającego źródła programu i wpisując polecenie **start**.

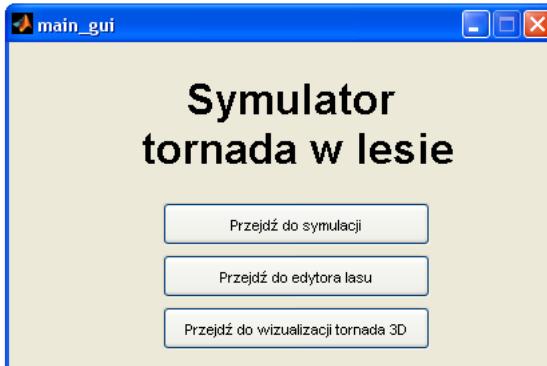
Na ekranie powinno pokazać się główne okno programu, tak jak na rysunku 3.2.

Program oferuje 3 możliwości:

- Przejdź do symulacji
- Przejdź do edytora lasu
- Przejdź do wizualizacji tornada 3D



Rysunek 3.1: Diagram przypadków użycia programu.



Rysunek 3.2: Główne okno programu.

3.3.1. Interfejs symulacji

Przejście do symulacji powoduje wyświetlenie menu, tak jak na rysunku 3.3. Okno podzielone jest na następujące części:

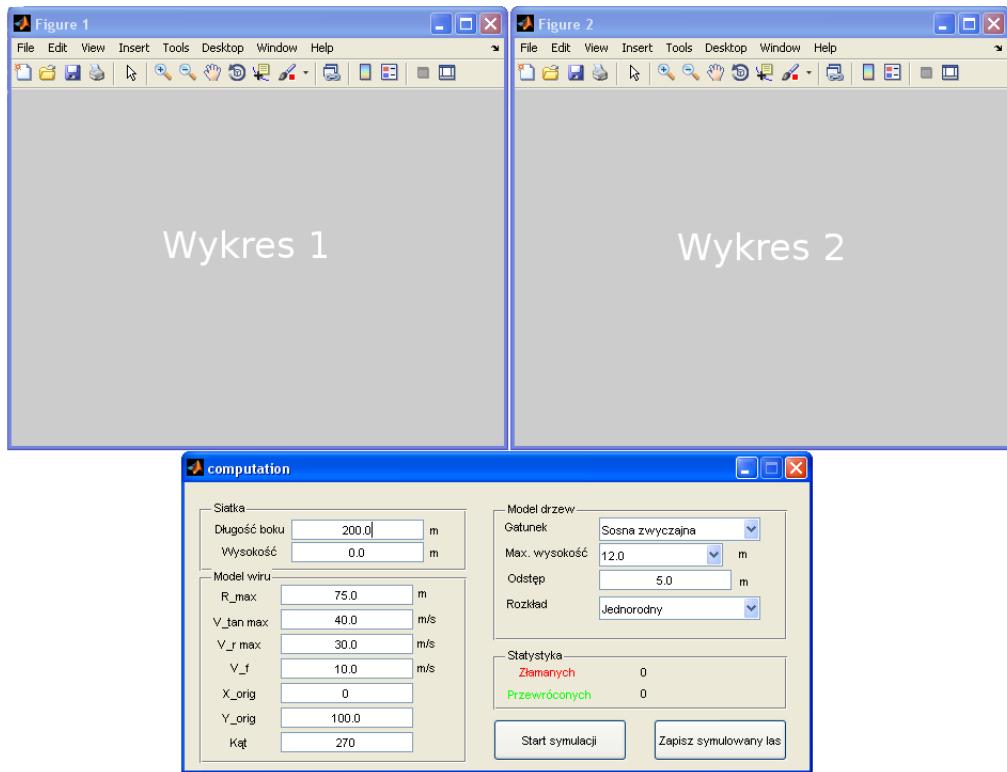
Wykres 1 – w tym obszarze wyświetlana jest dwuwymiarowa wizualizacja tornado opisanego w punkcie 2.1. Środkiem wykresu jest punkt (0,0).

Wykres 2 – w tym obszarze wyświetlane są zniszczenia w lesie spowodowane przez przechodzące tornado. Tak jak w wykresie 1 środek stanowi punkt (0,0).

Siatka – w tej sekcji ustawiana jest długość boku kwadratu na którym symulowane będzie tornado oraz las.

Model wiru – w tej sekcji ustawiane są parametry początkowe modelu Rankine przedstawionego w sekcji 2.1. Parametry **X_orig** i **Y_orig** oznaczają koordynaty początkowe środka tornada, zaś **Kąt** oznacza kąt pod jakim będzie poruszał się środek tornada, gdzie kąt zerowy oznacza przejście tornada z lewej na prawą stronę wykresu.

Model drzew – w tej sekcji ustawiane są parametry modelu łamliwości drzew HWIND opisanego w sekcji 2.2.



Rysunek 3.3: Okno symulacji.

Parametr **Gatunek** pozwala na wybranie następujących gatunków drzew:

- Sosna zwyczajna
- Świerk pospolity

Parametr **Max. wysokość** określa maksymalną wysokość użytych modeli drzew. Obecne dane pozwalają na wybór pomiędzy drzewami o wysokościach 12, 16 i 20m.

Parametr **Odstęp** określa rozdzielczość siatki oraz faktyczną średnią odległość pomiędzy drzewami w lesie która stanowi jedno z parametrów modelu HWIND [Pkt. 2.2].

Parametr **Rozkład** pozwala na wybór pomiędzy jednorodnym i przypadkowymi rozkładem drzew. Rozkład jednorodny oznacza las składający się z drzew o tej samej wysokości lecz o różnych średnicach pnia. Natomiast przy rozkładzie przypadkowych w skład lasu wybierane są drzewa o różnych średnicach pnia i o wysokości nieprzekraczającej tej podanej w parametrze **Max. wysokość**.

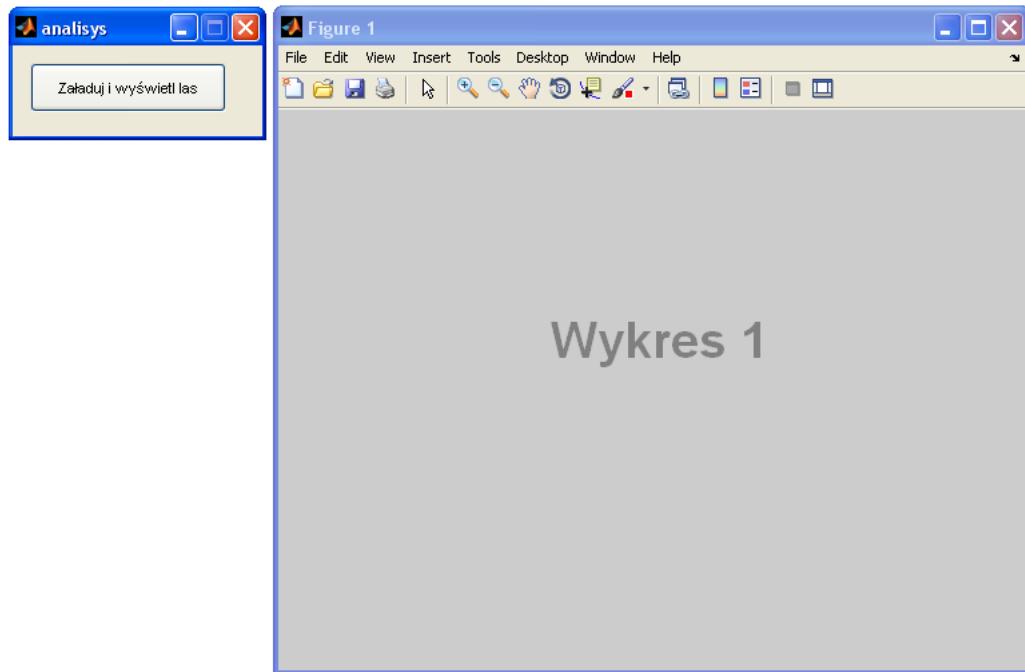
Model drzew – w tej sekcji przedstawiona jest statystyka zniszczonych drzew po zakończeniu i w trakcie trwania symulacji.

Po ustawieniu żądanego parametrów symulacji, można ją rozpoczęć naciskając przycisk **Start symulacji**. W celu zapisu danych na temat zniszczeń drzew po przejściu tornada do pliku w celu ewentualnej późniejszej obróbki należy nacisnąć przycisk **Zapisz symulowany las**.

3.3.2. Interfejs edytora lasu

Przejście do edytora lasu powoduje wyświetlenie menu, tak jak na rysunku 3.4.

W chwili obecnej menu pozwala jedynie na załadowanie danych z pliku zapisanego przy użyciu menu z punktu 3.3.1 oraz wyświetlenie go na obszarze WYKRES 1. Ponadto standardowe narzędzia śro-

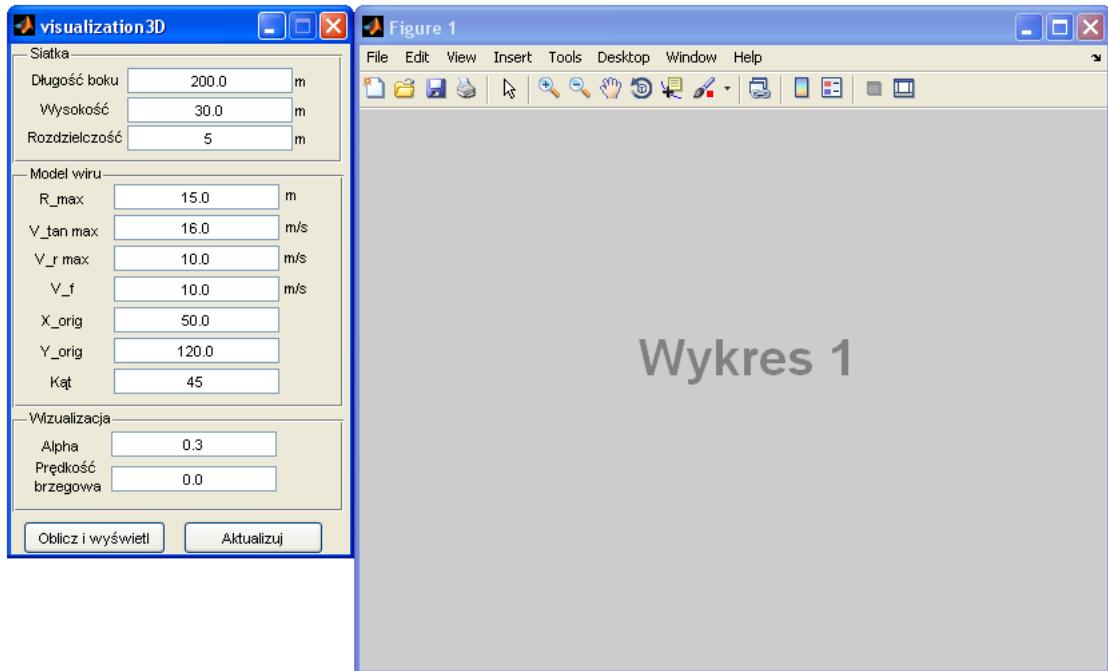


Rysunek 3.4: Okno edytora lasu.

dowiska MATLAB nad wykresem pozwalają na analizę pojedynczych elementów oraz na manipulację wykresem.

3.3.3. Interfejs wizualizacji tornada 3D

Przejście do wizualizacji tornada 3D powoduje wyświetlenie menu, tak jak na rysunku 3.5.



Rysunek 3.5: Okno trójwymiarowej wizualizacji tornada.

Okno podzielone jest na następujące sekcje:

Siatka – ustawiana jest tutaj wielkość prostopadłościanu w obszarze którego obliczane będą prędkości wiatru.

Model wiru – ustawiane są tutaj parametry modelu tornada. Parametry te są analogiczne do tych opisanych w punkcie 3.3.1.

Wizualizacja – parametr **Alpha** przyjmuje wartości rzeczywiste w zakresie $<0,1>$ i oznacza przeźroczystość z jaką wyświetlna jest wizualizacja (zmniejszenie tej wartości pozwala na zajrzenie wewnątrz struktury tornada, przy jednoczesnym ukazaniu kontekstu). Parametr **Prędkość brzegowa** oznacza prędkość wiatru w $\frac{m}{s}$ poniżej której części tornada o danej prędkości nie będą wyświetlane na **Wykresie 1**.

Naciśnięcie w przycisk **Oblicz i wyświetl** powoduje wyświetlenie wizualizacji tornada o parametrach zadanych w sekcjach **Siatka**, **Model wiru** i **Wizualizacja** na **Wykresie 1**. Przycisk **Aktualizuj** powoduje wyświetlenie na obszarze **Wykres 1** wizualizacji tornada ze zmienionymi parametrami w sekcji **Wizualizacja**. Został on dodany z uwagi na długi czas przeliczania prędkości wiatru wewnątrz wiru.

Standardowe narzędzia środowiska MATLAB nad wykresem pozwalają na jego manipulację. Inaczej niż w przypadku wykresów w punkcie 3.3.1 środkiem wykresu nie jest punkt (0,0). Punkt ten jest natomiast początkiem układu współrzędnych.

3.4. Architektura klas

Diagram klas stworzony zgodnie z informacjami zawartymi w książce [35] przedstawiony jest na rysunku 3.6. Architektura klas stanowi odwzorowanie modelu opisanego w rozdziale 2, jednak została tak zaprojektowana aby możliwe było zastosowanie innych szczegółowych modeli wiru oraz łączliwości drzew niż Rankine i HWIND, stąd też komunikacja z tymi modelami odbywa się poprzez interfejs **AbstractVortexModel** i **AbstractTreeModel**. Ponadto aby oddzielić warstwę modelu od warstwy kontrolera stworzono klasy mediujące **VortexData** i **TreeData**. Za warstwę prezentacji odpowiadają klasy **Simulation** i **Visualization**.

Klasy na diagramie 3.6 zostaną szczegółowo opisane w kolejnych podrozdziałach.

3.4.1. Klasa AbstractTreeModel

Klasa **AbstractTreeModel** jest macierzystą klasą abstrakcyjną odpowiedzialną za implementację modeli łączności drzew.

Jedyną metodą tej klasy jest:

double calculateTreeForce(tree,speed,treeI,treeJ) – argumenty metody:

tree – Struktura opisująca pojedyncze drzewo, składająca się z elementów opisanych w klasie **HWINDData** (3.4.3).

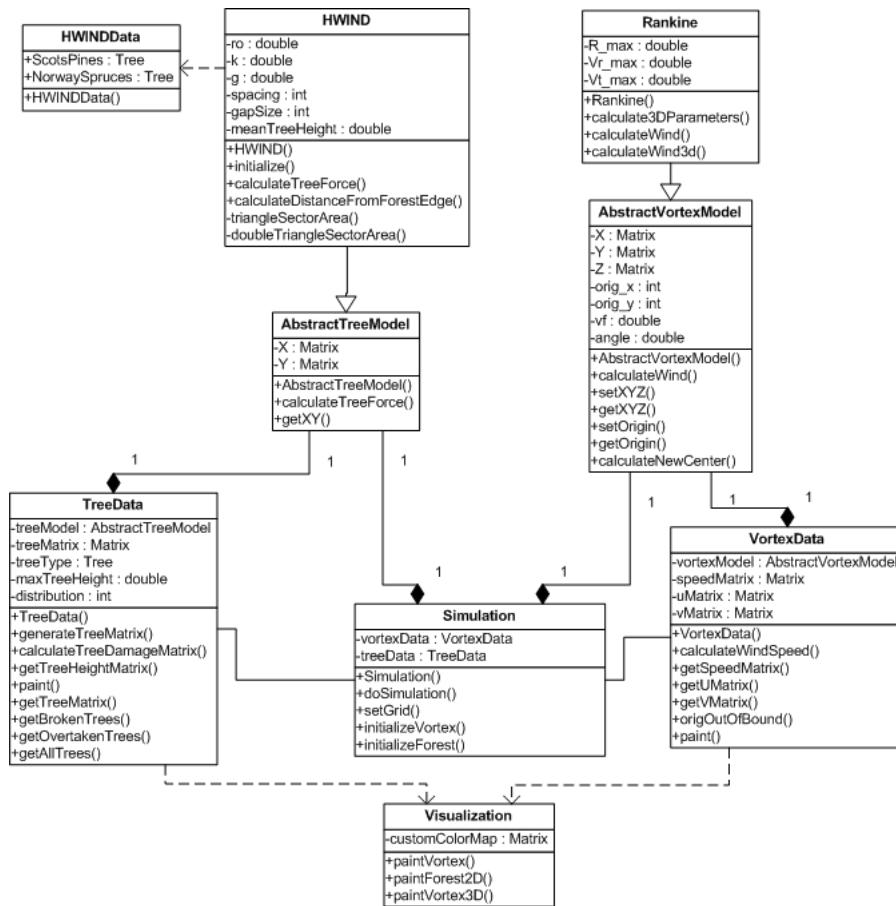
speed – prędkość wiatru oddziałująca na dane drzewo wyrażona jako liczba zmiennoprzecinkowa.

treeI, treeJ – położenie drzewa na macierzy **X**.

Metoda oblicza czy prędkość wiatru jest wystarczająca do złamania lub przewrócenia drzewa. Metoda zwraca wartość całkowitą w przedziale [0,2] gdzie:

- 0 – drzewo nie uległo sile tornada.
- 1 – drzewo zostało złamane.
- 2 – drzewo zostało przewrócone (wyrwane).

(X,Y) = getXY() – Metoda zwracająca macierz układu odniesienia.



Rysunek 3.6: Diagram klas.

3.4.2. Klasa HWIND

Klasa **HWIND** dziedziczy po klasie **AbstractTreeModel** i stanowi implementację modelu HWIND opisanego w rozdziale 2.2.

Klasa składa się z następujących metod:

initialize(treeHeights) – argumenty:

treeHeights – macierz równa rozmiarowi macierzy **X** i **Y** składająca się z liczb zmiennoprzecinkowych opisujących wysokości drzew w lesie.

Metoda ta musi być wywołana przed rozpoczęciem symulacji, jeśli zmianom uległy parametry badanego wycinka lasu.

double calculateTreeForce(tree,speed,treeI,treeJ) – metoda implementuje pustą metodę z klasy macierzystej zgodnie z modelem HWIND.

double calculateDistanceFromForestEdge(treeI,treeJ) – metoda zwraca odległość drzewa o zadanym parametrami **treeI** oraz **treeJ** od brzegu macierzy **X**.

W modelu HWIND w równaniu 2.3 potrzebna jest znajomość powierzchni drzewa stawiającej opór wiatrowi na danej wysokości **A(z)**. W tym celu posłużono się aproksymacją powierzchni drzewa gdzie pień stanowi prostokąt, zaś korona trójkąt równoramienny w przypadku *świerku pospolitego* oraz dwa trójkąty równoramienne złączone podstawami w przypadku *sosny zwyczajnej*. Algorytm obliczania wycinka powierzchni drzewa o wysokości 1 m dla obu przypadku prezentują fragmenty kodu źródłowego 3.1 i 3.2.

Listing 3.1: Obliczanie pola powierzchni wycinka trójkąta

```

1  function [ Area ] = triangleSectorArea( height , width , i )
2      dx = 0.5*width/height ;
3
4      x1 = 0;
5      xr = width ;
6
7      x1_base = x1 + i*dx ;
8      xr_base = xr - i*dx ;
9
10     x1_top = x1 + (i+1)*dx ;
11     xr_top = xr - (i+1)*dx ;
12
13     a = xr_base - x1_base ;
14     b = xr_top - x1_top ;
15
16     Area = (a+b)*0.5 ;
17 end

```

Algorytm przedstawiony we fragmencie 3.1 opiera się na podziale trójkąta na trapezy o wysokości 1 m. W tym celu wykorzystano zmodyfikowaną metodę rysowania linii w układzie współrzędnych kartezjańskich; poczynając od punktu (0, 0) ustalamy współrzędne podstawy trójkąta w liniach 4 i 5. Aby znaleźć położenie współrzędnych znajdujących się ponad podstawą trójkąta w liniach 10 i 11 współrzędne górnej podstawy trapezu. W liniach 13 i 14 obliczana jest długość obydwu podstawa, zaś w liniach 16 powierzchnia trapezu.

$$d_x = \frac{x_{czubek} - x_{podstawa}}{h} \quad (3.1)$$

Ponieważ mamy do czynienia z trójkątem równoramiennym przesunięcie **dx** jest takie same dla współrzędnych lewej oraz prawej krawędzi. Każde powiększenie (pomniejszenie) współrzędnych o **dx** odpowiada zmianie wysokości **y**, stąd w liniach 7 i 8 obliczane są współrzędne dolnej podstawy trapezu na wysokości $(i + 1)$ (**i** numerowane jest począwszy od 0) a w liniach 10 i 11 współrzędne górnej podstawy trapezu. W liniach 13 i 14 obliczana jest długość obydwu podstawa, zaś w liniach 16 powierzchnia trapezu.

Listing 3.2: Obliczanie pola powierzchni wycinka dwóch trójkątów zwróconych do siebie podstawami

```

1  function [ Area ] = doubleTriangleSectorArea( this , height , width , i )
2      dx = width/height ;
3
4      x1 = 0;
5      xr = width ;
6      xmiddle = width / 2;
7
8      if(i < floor(height/2))
9          x1_top = xmiddle - i*dx ;
10         xr_top = xmiddle + i*dx ;
11
12         x1_base = xmiddle - (i+1)*dx ;
13         xr_base = xmiddle + (i+1)*dx ;
14     else if(i >= ceil(height/2))
15         x1_top = x1 + (i - height/2)*dx ;
16         xr_top = xr - (i - height/2)*dx ;
17
18         x1_base = x1 + (i + 1 - height/2)*dx ;

```

```

19         xr_base = xr - (i + 1 - height/2)*dx;
20     else
21         xl_base = xm样子 - i*dx;
22         xr_base = xm样子 + i*dx;
23
24         xl_top = xl + (i+1 - height/2)*dx;
25         xr_top = xr - (i+1 - height/2)*dx;
26
27         a = xr_base - xl_base;
28         b = width;
29         c = xr_top - xl_top;
30
31         h1 = height/2 - i;
32         h2 = i + 1 - height/2;
33
34         A1 = (a+b)/2*h1;
35         A2 = (b+c)/2*h2;
36         Area = A1 + A2;
37         return;
38     end
39 end
40
41     a = xr_top - xl_top;
42     b = xr_base - xl_base;
43
44     Area = (a+b)*0.5;
45 end

```

Algorytm obliczania wycinka powierzchni korony w przypadku aproksymacji dwoma trójkątami (fragment 3.2) jest analogiczny do tego zastosowanego we fragmencie 3.1. W linii 2 do obliczania wysokości trójkąta użyta jest połowa wysokości korony. A ponieważ nie ma gwarancji co do parzystości liczby reprezentującej tą wysokość obsługiwane są 3 przypadki obliczeń. W liniach 8 - 13 obliczane są podstawy trapezów dla odwróconego trójkąta, w liniach 14 - 19 obliczane są podstawy trapezów dla trójkąta będącego na górze korony, zaś w liniach 20 - 37 obsługiwany jest przypadek kiedy aproksymowana figura jest wielokątem złożonym z dwóch trapezów połączonych szerszymi podstawami. W linii 34 obliczany powierzchnię dolnego trapezu, a w linii 35 trapezu górnego. Powierzchnia wielokąta jest sumą powierzchni tych trapezów.

3.4.3. Klasa HWINDData

Klasa *HWINDData* jest pojemnikiem na struktury drzew *Tree*.

Struktura *Tree* składa się z następujących pól:

height – wysokość drzewa.

dbh – średnica drzewa na wysokości piersi człowieka (1.3 m) [m]

MOR – współczynnik pękania drewna [MPa]

MOE – współczynnik elastyczności [MPa]

Cd – współczynnik tarcia

Crown_mass – masa korony [kg]

Stem_mass – masa pnia [kg]

f_RW – stosunek wagi gleby wokół korzeni do masy całego drzewa [%]

R_mass – masa korzeni [kg]

R_depth – głębokość korzeni [m]

Crown_d – wysokość korony [m]

Crown_w – szerokość korony [m]

Dane użyte w programie zebrane są w tabeli 3.1 oraz 3.2.

drzewo	korona			pień		korzeń	
wysokość (m)	średnica (cm)	masa korony (kg)	wysokość korony (m)	szerokość korony (m)	masa pnia (kg)	masa korzenia (kg)	wysokość korzenia (m)
Sosna zwyczajna							
12	10	13	5	3.1	42	345	0.44
12	12	18	5	3.5	60	485	0.48
12	15	28	5	4	94	719	0.55
16	13.3	28	7	3.7	92	573	0.51
16	16	40	7	4.2	134	817	0.57
16	20	63	7	5	209	1261	0.64
20	16.7	52	8	4.3	173	887	0.58
20	20	74	8	5	248	1252	0.64
20	25	116	8	5.9	388	1988	0.7
Świerk pospolity							
12	10	19	9	3.7	38	451	0.24
12	12	27	9	3.9	55	583	0.26
12	15	43	9	4.3	86	770	0.3
16	13.3	44	12	4.1	87	645	0.28
16	16	63	12	4.4	126	850	0.31
16	20	99	12	4.9	197	1193	0.36
20	16.7	83	15	4.5	167	914	0.32
20	20	120	15	4.9	239	1203	0.36
20	25	187	15	5.6	374	1762	0.42

Tablica 3.1: Dane dla poszczególnych drzew. Źródło: [34] oraz obliczenia własne

Parametr	Sosna zwyczajna	Świerk pospolity
Współczynnik pękania drewna (MOR) (MPa)	39.1	30.6
Współczynnik elastyczności (MOE) (MPa)	7000	6300
Gęstość powietrza (ρ) ($\frac{kg}{m^3}$)	1.226	1.226
Współczynnik tarcia (C_d)	0.29	0.35
Stosunek wagi gleby do masy drzewa (f_{RW})	0.3	0.2
Typ korony	trójkąt	podwójny trójkąt

Tablica 3.2: Dane dla różnych gatunków drzew. Źródło: [34]

3.4.4. Klasa AbstractVortexModel

Klasa *AbstractVortexModel* jest macierzystą klasą abstakcyjną odpowiedzialną za implementację modeli wiru.

Klasa składa się z następujących metod:

(speedMatrix, uMatrix, vMatrix) = calculateWind() – główna metoda klasy, odpowiedzialna jest za obliczanie macierzy prędkości wiatru oraz macierzy wektorów wiatru na podstawie aktualnego stanu klasy.

(speedMatrix, uMatrix, vMatrix, wMatrix) = calculateWind3d(f3dParameters) – metoda tak jak poprzednia odpowiedzialna jest za obliczanie macierzy prędkości oraz macierzy wektorów w przypadku symulacji trójwymiarowej. Metoda przyjmuje dodatkowy argument **f3dParameters** który jest referencją do funkcji obliczającej środek i parametry tornada na różnych wysokościach.

setXYZ(X, Y, Z) – metoda pomocnicza odpowiedzialna za przypisywanie macierzy układu odniesienia.

(X, Y, Z) = getXYZ() – metoda pomocnicza odpowiedzialna za zwracanie macierzy układu odniesienia.

setOrigin(orig_x, orig_y) – metoda pomocnicza odpowiedzialna za przypisywanie środka tornada w układzie współrzędnych.

(orig_x, orig_y) = getOrigin() – metoda pomocnicza odpowiedzialna za zwracanie środka tornada w układzie współrzędnych.

double getVf() – metoda pomocnicza zwracająca prędkość translacji.

calculateNewCenter(t) – metoda odpowiedzialna za zmianę stanu obiektu poprzez wyliczenie miejsca nowego środka tornada po upływie czasu **t**.

3.4.5. Klasa Rankine

Klasa *Rankine* dziedziczy po klasie **AbstractVortexModel** i stanowi implementację modelu Rankine przedstawionego w rozdziale 2.1.

Klasa składa się z następujących metod:

(r, x_orig_new, y_orig_new) = calculate3dParameters(height, R_max, x_orig, y_orig, angle) – metoda pomocnicza używana przy symulacji trójwymiarowej. Odpowiedzialna jest za obliczanie maksymalnego promienia **r** oraz środka tornada **x_orig_new** i **y_orig_new** na danej wysokości **height** na podstawie parametrów **R_max**, **x_orig**, **y_orig** i **angle** z modelu dwuwymiarowego.

(speedMatrix, uMatrix, vMatrix) = calculateWind() – metoda implementuje pustą metodę z klasy macierzystej zgodnie z modelem Rankine.

(speedMatrix, uMatrix, vMatrix, wMatrix) = calculateWind3d(f3dParameters) – metod implementuje pustą metodę z klasy macierzystej.

Kierunek obrotu wirów powietrznych na wysokościach geograficznych w jakich znajduje się Polska jest cykliczny, tzn. odwrotny do ruchu wskazówek zegara [29].

3.4.6. Klasa Simulation

Klasa *Simulation* stanowi trzon programu. Klasa ta zarządza przepływem informacji podczas trwania symulacji oraz odpowiedzialna jest za przesyłanie danych do interfejsu użytkownika.

Klasa składa się z następujących metod:

treeData = doSimulation(vortex_axis, forest_axis, broken_label, overtaken_label) – metoda odpowiedzialna jest za przeprowadzenie obliczeń których wynikiem jest macierz lasu po przejściu tornada **treeData**. W trakcie trwania symulacji uaktualniane są informacje w interfejsie użytkownika na wykresach **vortex_axis** i **forest_axis** oraz uaktualniana jest informacja o statystyce zniszczeń w polach **broken_label** i **overtaken_label**.

initializeVortex(vortexModel, spacing) – metoda ustawiająca parametry początkowe modelu wiru użytego do symulacji.

initializeForest(treeModel, treeType, distribution, maxTreeHeight) – metoda ustawiająca parametry początkowe modelu łamliwości drzew użytego do symulacji. Parametr **distribution** oznacza sposób losowania wielkości i grubości drzew w lesie, wartość 1 tego parametru oznacza że drzewa będą miały różne średnice ale wszystkie będą wysokości **maxTreeHeight**, natomiast wartość 0 oznacza że drzewa będą miały różne średnice i wysokość nieprzekraczającą **maxTreeHeight**.

3.4.7. Klasa TreeData

Klasa *TreeData* wykorzystuje wzorzec Mediatora do zarządzania klasami związanymi z modelem łamliwości drzew.

Klasa składa się z następujących metod:

generateTreeMatrix() – metoda zmienia stan obiektu poprzez wygenerowanie, w zależności od wartości argumentu **distribution** jednorodnie lub losowo, macierzy początkowej reprezentującej las składający się z drzew gatunku **treeType**, którego struktura została opisana w klasie **HWIND-Data**.

calculateTreeDamageMatrix(speedMatrix, uMatrix, vMatrix) – metoda zmienia stan obiektu poprzez wyliczenie nowej macierzy stanu drzew w lesie za pomocą metody **calculateTreeForce** klasy **AbstractTreeModel**. Jeśli drzewo w danym punkcie siatki jest już połamane lub przewrócone, obliczenia nie są ponownie wykonywane.

allHeights = getTreeHeightMatrix() – metoda pomocnicza, zwraca macierz wysokości drzew w lesie. Macierz ta potrzebna jest do obliczeń średniej wysokości drzew dla modelu **HWIND**.

paint(figureHandle) – metoda rysuje zniszczenia w lesie na wykresie **figureHandle**.

result = getTreeMatrix() – metoda pomocnicza, zwraca macierz lasu wygenerowaną przez metody **generateTreeMatrix** i **calculateTreeDamageMatrix**.

result = getBrokenTrees() – metoda pomocnicza, zwraca ilość połamanych drzew w macierzy **treeMatrix**.

result = getOvertakenTrees() – metoda pomocnicza, zwraca ilość wyrwanych drzew w macierzy **treeMatrix**.

result = getAllTrees() – metoda pomocnicza, zwraca ilość wszystkich drzew w macierzy **treeMatrix**.

3.4.8. Klasa VortexData

Klasa *VortexData* wykorzystuje wzorzec Mediatora do zarządzania klasami związanymi z modelem wiru.

Klasa składa się z następujących metod:

calculateWindSpeed() – metoda zmienia stan obiektu poprzez wyliczenie macierzy prędkości i wektorów wiatru po zmianie położenia środka tornada po czasie **deltaT**.

result = getSpeedMatrix() – metoda pomocnicza, zwraca macierz prędkości wiatru.

result = getUMatrix(), result = getVMatrix() – metody pomocnicze, zwracają macierze wektorów wiatru.

result = origOutOfBound() – metoda pomocnicza która zwraca prawdę jeśli środek tornada znajduje się poza układem współrzędnych i fałsz jeśli środek jest zawarty w granicach tego układu.

paint(figureHandle) – metoda rysuje tornado 2D na wykresie **figureHandle**.

3.4.9. Klasa Visualization

Całkowicie statyczna klasa *Visualization* odpowiedzialna za rysowanie lasu oraz wiru na wykresach. Klasa składa się z następujących metod:

paintVortex(figureHandle, X, Y, sMatrix, uMatrix, vMatrix) – metoda rysuje wir. Na początku na wykresie za pomocą polecenia **surf** rysowana jest mapa kolorów odpowiadająca wartościom z macierzy prędkości **sMatrix** - najniższa wartość w macierzy oznaczana jest kolorem czarnym, zaś najwyższa kolorem czerwonym. Następnie za pomocą polecenia **quiver** rysowane są wersory wiatru mające punkt zaczepienia w koordynatach odpowiadającej im prędkości.

paintForest2D(X, Y, treeMatrix) – metoda rysuje zniszczenia w lesie. W zależności od stanu drzewa w danym punkcie siatki za pomocą polecenia **quiver** rysowana jest:

dla niepołamanych i nieprzewróconych drzew – nic nie jest rysowane, pozostawiona jest pusta przestrzeń.

dla połamanych drzew – rysowany jest czerwony wersor reprezentujący złamane drzewo.

dla przewróconych drzew – rysowany jest zielony wersor reprezentujący przewrócone drzewo.

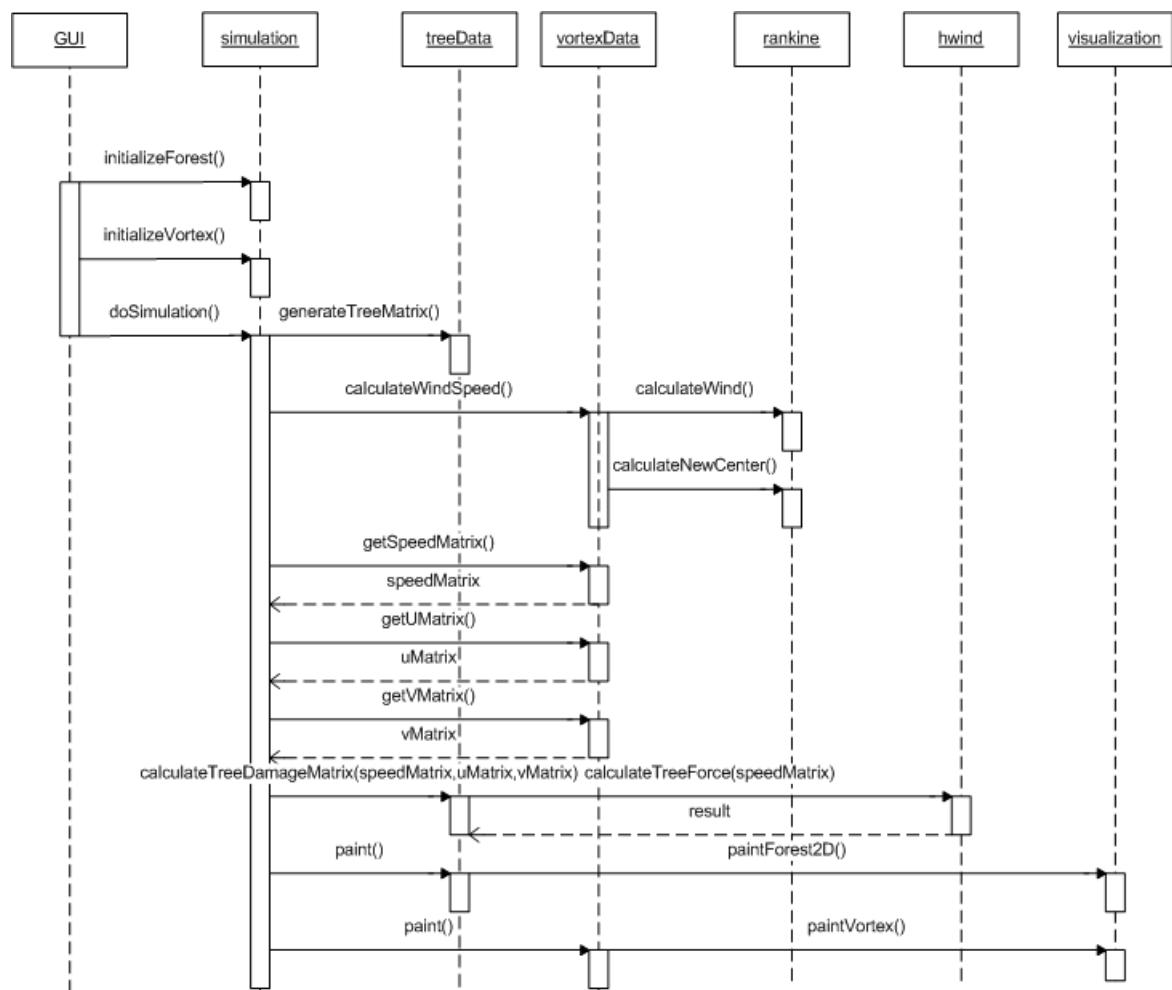
paintVortex3D(vortexData) – metoda rysuje trójwymiarową macierz prędkości wiatru za pomocą narzędzia **vol3d** opisanego w punkcie 3.1.

3.5. Przepływ danych

Rysunek 3.7 przedstawia diagram sekwencji dla pojedynczej iteracji algorytmu symulacji.

Po wprowadzeniu przez użytkownika danych oraz kliknięciu przycisku “Start symulacji” tworzone są obiekty klas **Simulation**, **HWIND** oraz **Rankine**. Następnie w obiekcie *simulation* ustawiane są referencje do utworzonych klas poprzez metody *initializeForest()* i *initializeVortex()* oraz tworzone są instancje klas **TreeData** i **VortexData**. Po skończeniu tych czynności następuje wywołanie funkcji *doSimulation()* i oddanie sterowania do obiektu *simulation*. Wywoływaną jest metoda *generateTreeMatrix()*, która tworzy początkową macierz lasu. Następnie obliczana jest macierz wiatru *calculateWindSpeed()* w obiekcie *vortexData*, która z kolei wywołuje metodę *calculateWind()* i przesuwa środek tornada za pomocą *calculateNewCenter()* w obiekcie *rankine*. Obiekt *simulation* pobiera z obieku *vortexData* macierze prędkości oraz macierze wektorów, a następnie korzystając z tych danych wywołuje metodę *calculateTreeDamageMatrix()* w obiekcie *treeData*, która z kolei wywołuje metodę *calculateTreeForce()* w obiekcie *hwind*. Tak obliczone macierze wyświetlane są w GUI za pomocą wywołań metody *paint()* w klasach **VortexData** i **TreeData**, które odwołują się odpowiednio do *paintVortex()* i *paintForest2D()* w klasie **Visualization**.

Obiekt *simulation*, którego nie pokazano na diagramie, sprawdza czy środek tornada nie wyszedł poza widoczny obszar siatki za pomocą metody *origOutOfBounds()* w obiekcie **vortexData** lub czy nie przekroczyo limitu licznika pętli ustawionego na wartość 100. Jeśli któryś z tych warunków została spełnione symulacja zostaje zakończona.



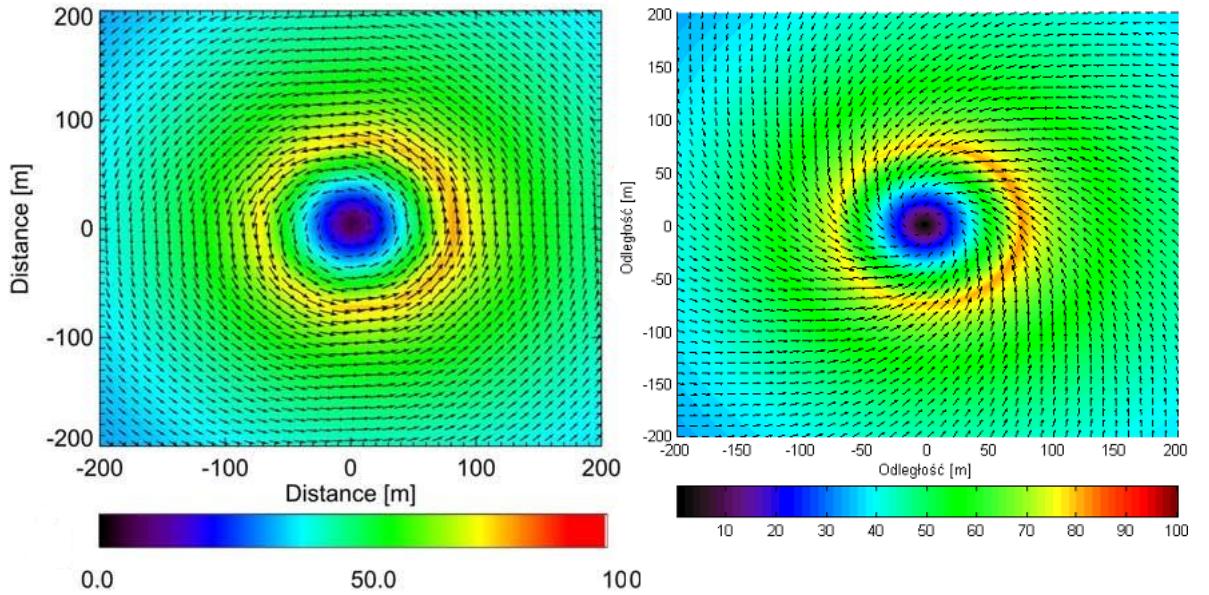
Rysunek 3.7: Diagram sekwencji.

4. Rezultaty

W rozdziale tym opisano wyniki działania zaimplementowanego modelu. Z uwagi na brak wiarygodnych danych rzeczywistych o ustalonych parametrach zdecydowano się na weryfikację poprawności implementacji z wynikami uzyskanymi w innych pracach. Rozdział prezentuje także wnioski z działania modelu oraz potencjalne kierunki rozwoju.

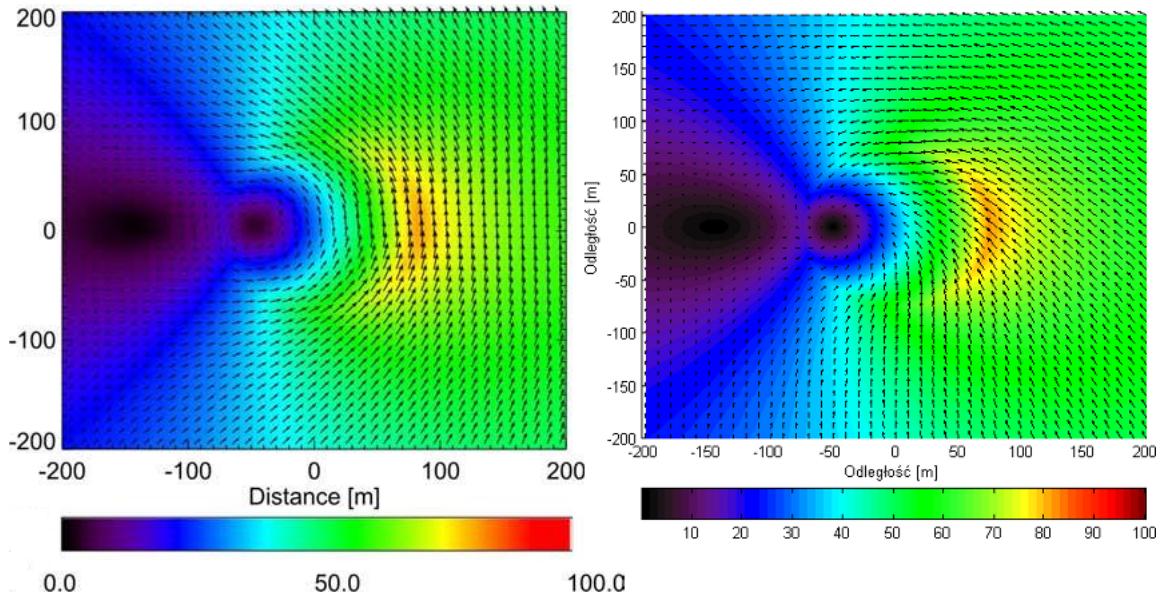
4.1. Weryfikacja implementacji modelu Rankine

Implementacja modelu trąby powietrznej została zweryfikowana z implementacją opisaną w pracy [17].



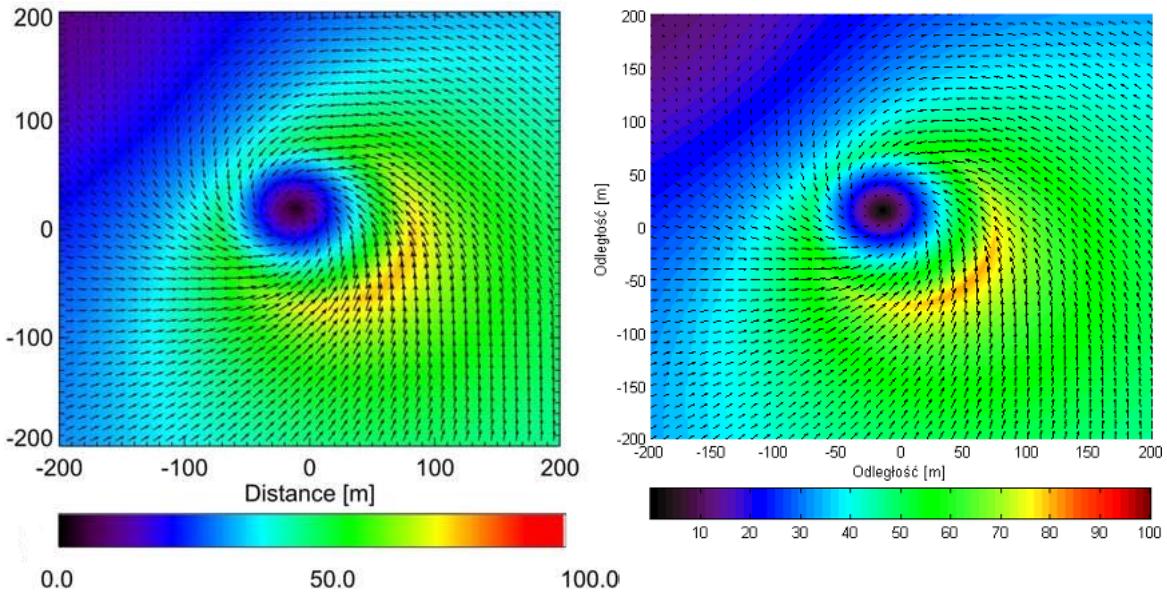
Rysunek 4.1: Po lewej stronie wyniki symulacji tornada z pracy [17], po prawej stronie wyniki symulacji tej pracy dla maksymalnej prędkości trawersalnej $V_{\varphi,max} = 79 \frac{m}{s}$, maksymalnej prędkości radialnej $V_{r,max} = 0 \frac{m}{s}$, prędkości translacji $V_{trans} = 3 \frac{m}{s}$, maksymalnego promienia 75m i kącie przesuwania środka 180°. Drobne różnice pomiędzy obrazami wynikają z różnej skali barw.

Rysunek 4.1 przedstawia porównanie wizualizacji tornada 2D dla wiru czysto trawersalnego (gdzie pomijana jest prędkość radialna). Jak widać na ilustracji wektory wiatru tworzą zamknięte koła wokół środka wiru, a dystrybucja prędkości wokół niego jest symetryczna, z poprawką na niewielkie przesunięcie w prawo spowodowanego działaniem wektora translacji. Zwiększenie prędkości translacji będzie powodowało dalszą asymetrię dystrybucji prędkości z obszarem maksymalnej prędkości położonym na prawo od środka tornada, jak można to zaobserwować na rysunku 4.2. Ten efekt spowodowany jest superpozycją składowych prędkości dla rotacji cyklonicznej, dla dodatniej superpozycji prędkości translacji i prędkości cyrkularnej po prawej stronie środka i negatywnej superpozycji po stronie lewej. Dalsze



Rysunek 4.2: Po lewej stronie wyniki symulacji tornada z pracy [17], po prawej stronie wyniki symulacji tej pracy dla maksymalnej prędkości trawersalnej $V_{\varphi,max} = 49 \frac{m}{s}$, maksymalnej prędkości radialnej $V_{r,max} = 0 \frac{m}{s}$, prędkości translacji $V_{trans} = 33 \frac{m}{s}$, maksymalnego promienia 75m i kącie przesuwania środka 180°. Drobne różnice pomiędzy obrazami wynikają z różnej skali barw.

zmniejszanie prędkości trawersalnej i zwiększanie prędkości translacji spowoduje wzmacnienie asymetrii, jednak jak można zauważyć wektory prędkości wewnątrz obszaru maksymalnej prędkości nadal tworzą zamknięte koło.



Rysunek 4.3: Po lewej stronie wyniki symulacji tornada z pracy [17], po prawej stronie wyniki symulacji tej pracy dla maksymalnej prędkości trawersalnej $V_{\varphi,max} = 49 \frac{m}{s}$, maksymalnej prędkości radialnej $V_{r,max} = 40 \frac{m}{s}$, prędkości translacji $V_{trans} = 18 \frac{m}{s}$, maksymalnego promienia 75m i kącie przesuwania środka 135°. Drobne różnice pomiędzy obrazami wynikają z różnej skali barw.

Na rysunku 4.3 porównanie odbywa się pomiędzy wirami o dodatniej prędkości trawersalnej i radialnej. Wektory prędkości wiatru tworzą prawie zamknięte koła wokół centrum. Zwiększenie prędkości radialnej spowodowało rozrost obszaru prędkości maksymalnej i przesunięcie go bardziej w kierunku

przeciwnym do kierunku poruszania się całego wiru. W porównaniu z rysunkami 4.1 i 4.2 oznacza to że poprzez zwiększenie prędkości radialnej zmianie ulega kształt wyznaczany przez ułożenie wektorów z kołowego na spiralny, zaś wraz ze zmianą prędkości translacyjnej zmianie ulega symetria rozkładu prędkości wokół centrum.

4.2. Implementacja trójwymiarowego modelu Rankine

Wir trójwymiarowy jest w istocie zastosowaniem statycznego modelu Rankine powielonego na różnych wysokościach z , gdzie na każdej wysokości zmianie ulega parametr promienia \mathbf{R} oraz położenia środka tornada (\mathbf{x}, \mathbf{y}). Zmiana ta opisana jest za pomocą funkcji \mathbf{f} oraz \mathbf{g} :

$$R_z = f(z, R_0) \quad (4.1)$$

$$(x_z, y_z) = g(z, x_0, y_0) \quad (4.2)$$

Tornada w zależności od swojej klasy w skali Fujity i warunków pogodowych przyjmują różne kształty, co zostało przedstawione na rysunku 4.4. W tej pracy skupiono uwagę na tornadach V-kształtnych w pełni połączonych z gruntem.



Rysunek 4.4: Wybrane kształty tornad. Źródło: [31].

W celu znalezienia kształtu funkcji opisanych w równaniach 4.1 i 4.2 porównano zdjęcia trzech tornad o podobnym kształcie (4.5, 4.6, 4.7).

Pierwszym krokiem było znalezienie na zdjęciach punktów odniesienia które umożliwiałyby oszacowanie rozmiarów fotografowanego zjawiska [10]. Oszacowanie takie jest oczywiście bardzo zgrubne z powodu niepewności co do odległości pomiędzy środkiem tornada a szacowanych punktów odniesienia. Pozwala to jednak na ustalenie skali i sprowadzenie danych z trzech zdjęć do wspólnego mianownika.

Na zdjęciu 4.5 znajdują się słupy linii telefonicznej oraz ciągnik rolniczy. Standardowa wysokość słupów użytkowych w Stanach Zjednoczonych wynosi 10.5 m [15], zaś przykładowy ciągnik Zetor Proxima ma wysokość ok. 2.6 m [16]. Korzystając z tych danych oszacowano średnicę tornada przy podstawie na 8 m.

Na zdjęciu 4.6 znajdują się duże drzewa liściaste oraz kilka budynków gospodarczych. Wysokość jednego z budynków oszacowano na 5 m, zaś drzewa na średnio 14 do 15 m. Daje to oszacowanie średnicy tornada przy podstawie na 21 m.



Rysunek 4.5: Tornado nr. 1. Źródło: [31].



Rysunek 4.6: Tornado nr. 2. Źródło: [25].

Na zdjęciu 4.7 znajdują się budynki fabryczne. Ich wysokość oszacowano na 8 m, co daje średnicę tornada równą 8 m.

Kolejnym krokiem jest przedstawienie średnic tornad oraz środków ich szerokości jako danych w środowisku MATLAB za pomocą Image Processing Toolbox [14]. Z powodu dużego szumu przy podstawie tornad ich kształt został zaznaczony na zdjęciach ręcznie za pomocą programu graficznego. Następnie zdjęcia zostały skonwertowane do postaci czarno-białej i przeskalowane w ten sposób aby 1 px oznaczał odległość 1 m. Obrys tornad przedstawiono na rysunku 4.8.

Rysunki zostały wczytane do MATLAB'a za pomocą polecenia **imread**, następnie obrócone o kąt 90° zgodnie z ruchem wskazówek zegara, tak aby podstawa wiru znajdowała się w lewym dolnym rogu. Ponieważ 0 reprezentuje kolor czarny, a 1 kolor biały, oznaczenia zostały odwrócone, a liczby pikseli czarnych w każdej kolumnie zsumowane. Elementy otrzymanej macierzy zostały następnie podzielone przez 2, przez co utworzone zostały macierze promieni. Wykres 4.9 prezentuje zestawienie tych macierzy.

Jak widać na wykresie 4.9 dane dotyczące tornada z rysunku 4.6 wyraźnie odstają od pozostałych wyników, stąd zostają one odrzucone w dalszych etapach.

Dane z tornad na zdjęciach 4.5 i 4.7 zostały uśrednione oraz przeskalowane tak aby wartości rozpoczynały się od 1. Funkcja aproksymująca wyliczona za pomocą narzędzia **Basic Fitting** za pomocą



Rysunek 4.7: Tornado nr. 3. Źródło: [12].



Rysunek 4.8: Obrys tornad z rysunków 4.5, 4.6 i 4.7.

modelu **cubic** (wykres 4.10). Ostatecznie funkcja 4.1 przyjmuje postać równania 4.3 z błędem aproksymacji równym 1.0444.

$$f(z, R_0) = (-8.5637 \cdot 10^{-8}z^3 + 0.00018695z^2 + 0.0078765z + 0.94933) R_0 \quad (4.3)$$

gdzie

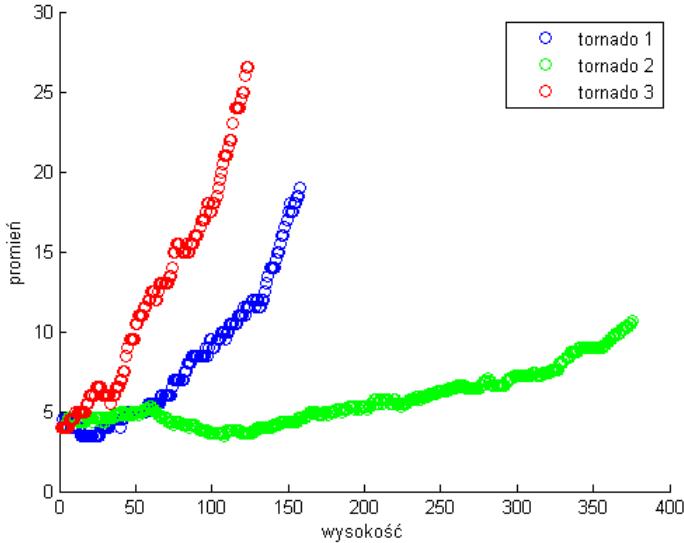
$f(z, R_0)$ – funkcja zmiany maksymalnego promienia tornada R w zależności od wysokości z

z – wysokość nad powierzchnią Ziemi

R_0 – maksymalny promień tornada przy powierzchni Ziemi

Kolejnym krokiem było ustalenie kształtu funkcji środka tornada (4.2). Na początku należało wyznaczyć na każdym obrysie przebieg centrum wiru. Niestety standardowe rozwiązania w postaci wykonania operacji erozji i szkieletyzacji na obrazie nie spełniły pokładanych w nich oczekiwani z powodu powstawania odgałęzień na początku i końcu tornada. W kroku tym natomiast potrzebna jest cała linia przebiegu środka wiru, stąd też odwołano się do prostszego algorytmu:

1. Wczytanie wiersza obrazu
2. Obliczenie promienia wiru w danym wierszu
3. Odnajdywanie krawędzi tornada w danym wierszu, a następnie wstawienie wartości 1 do macierzy wynikowej w danym wierszu i w kolumnie wyznaczonej poprzez zsumowanie pozycji krawędzi oraz promienia wiru
4. Jeśli jest więcej wierszy przejdź do punktu 1



Rysunek 4.9: Wykres zależności pomiędzy wysokością a promieniem tornada.

Wyznaczone tym sposobem szkielety obrysów przedstawiono na wykresie 4.11. Następnie utworzono wektory reprezentujące odchylenie środka tornada na różnych wysokościach od środka przy podstawie oraz wektor będący uśrednieniem wartości odchyleń (wykres 4.12).

Kształt funkcji 4.2 został oszacowany poprzez aproksymację uśrednionych odchyleń od punktu środkowego przy podstawie za pomocą narzędzia **Basic Fitting** i modelu **4th degree**. Dopasowanie zostało zwizualizowane na wykresie 4.13.

Dane ze zdjęć pozwalają jedynie na obserwację zjawiska z jednego profilu, jednakże analiza dodatkowych materiałów wideo z przesuwającym się tornadem wykazała że środek ciężkości wiru znajduje się z tyłu kierunku w którym tornado się przesuwa. Przekłada się to na traktowanie współrzędnych x i y jako wektorów \mathbf{u} i \mathbf{v} o długości opisanej aproksymowaną funkcją. Ponadto aby kształt tornado zostało zachowany mimo różnej średnicy tornada funkcja \mathbf{g} została odpowiednio przeskalowana. Ostatecznie kształt funkcji został opisany wzorem 4.4 z błędem aproksymacji **4.7035**.

$$\begin{aligned} shift(z, R_0) &= \left(1.3142 \cdot 10^{-7} z^4 - 3.864 \cdot 10^{-5} z^3 + 0.0048048 z^2 - 0.10169 z - 0.46675\right) \frac{R_0}{5} \\ (u, v) &= pol2cart(angle, shift(z, R_0)) \\ g(z, x_0, y_0) &= (u + x_0, v + y_0) \end{aligned} \quad (4.4)$$

gdzie

$shift(z, R_0)$ – funkcja przesunięcia środka tornada w zależności od wysokości z i promienia przy podstawie R_0

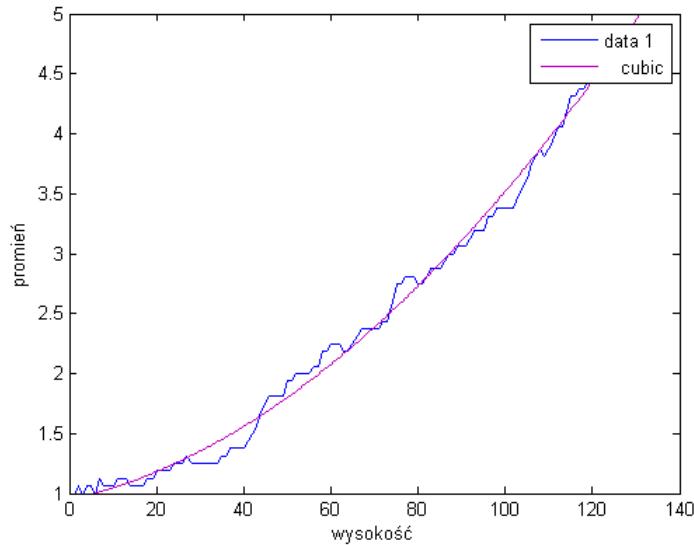
z – wysokość nad powierzchnią Ziemi

R_0 – maksymalny promień tornada przy powierzchni Ziemi

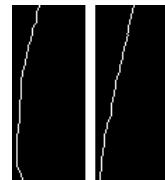
u, v – wektory wiatru

$g(z, x_0, y_0)$ – funkcja zmiany współrzędnych środka tornada w zależności od wysokości z

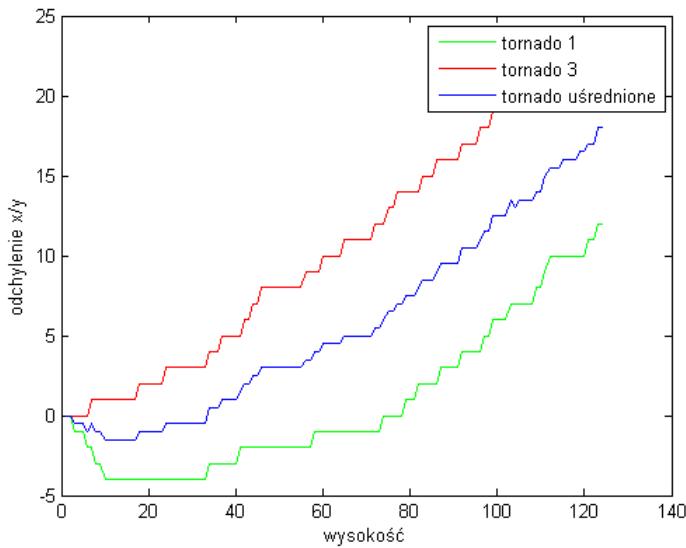
Na rysunku 4.14 przedstawiono porównanie wizualizacji tornada trójwymiarowego z prawdziwym tornadem (innym jednak niż tornado służące za podstawę modelu 4.5 i 4.6). Kształt wiru zbliżony jest do tego występującego w rzeczywistości. W prawdziwym zjawisku lewa strona trąby powietrznej stanowi



Rysunek 4.10: Aproksymacja uśrednionych wartości promieni dla tornado 1 i tornada 3.

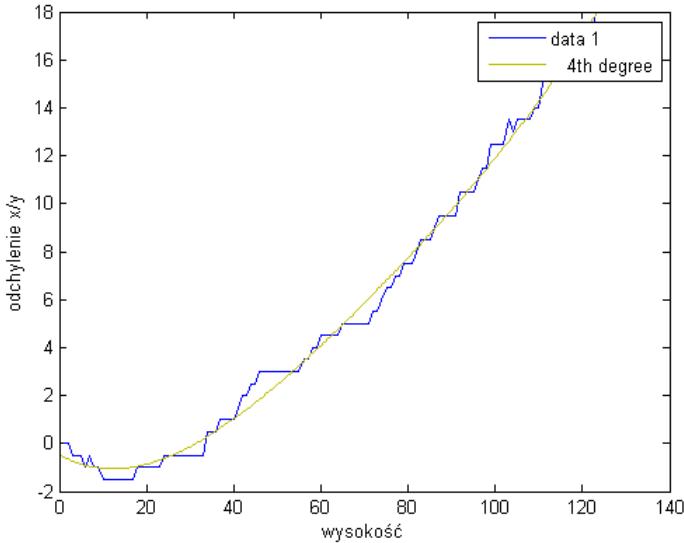


Rysunek 4.11: Szkieletyzacja obrysów tornada 1 i tornada 3.

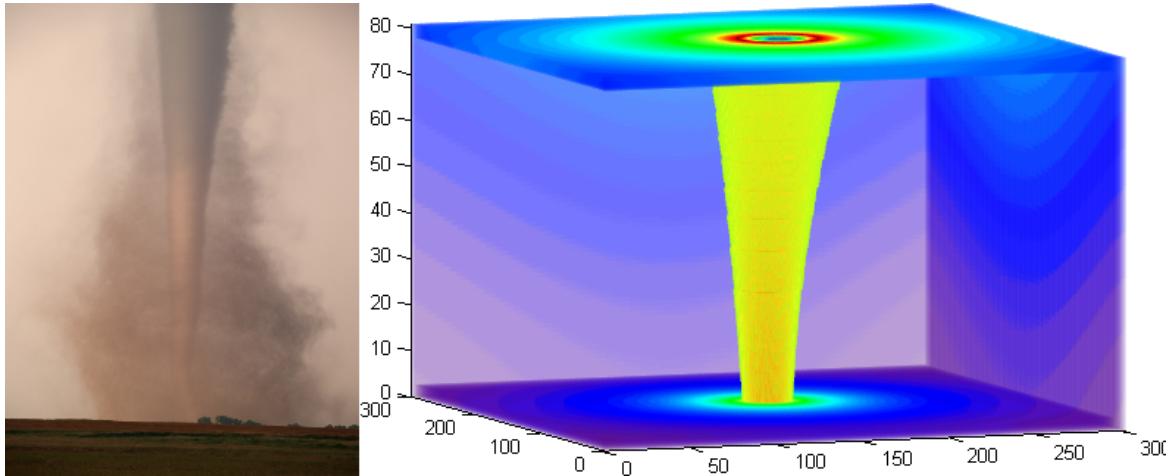


Rysunek 4.12: Odchylenia punktu środkowego na różnych wysokościach od punktu środkowego przy podstawie tornada.

linię prostą pomiędzy powierzchnią Ziemi a podstawą chmury, zaś prawa strona odchyla się pod pewnym kątem, co można zaobserwować także na symulacji komputerowej. Proporcje zostały zatem zachowane, więc można mówić o pewnej zgodności modelu z faktycznymi zachowaniami pogodowymi.



Rysunek 4.13: Aproksymacja uśrednionych wartości odchyleń dla tornada 1 i tornada 3.



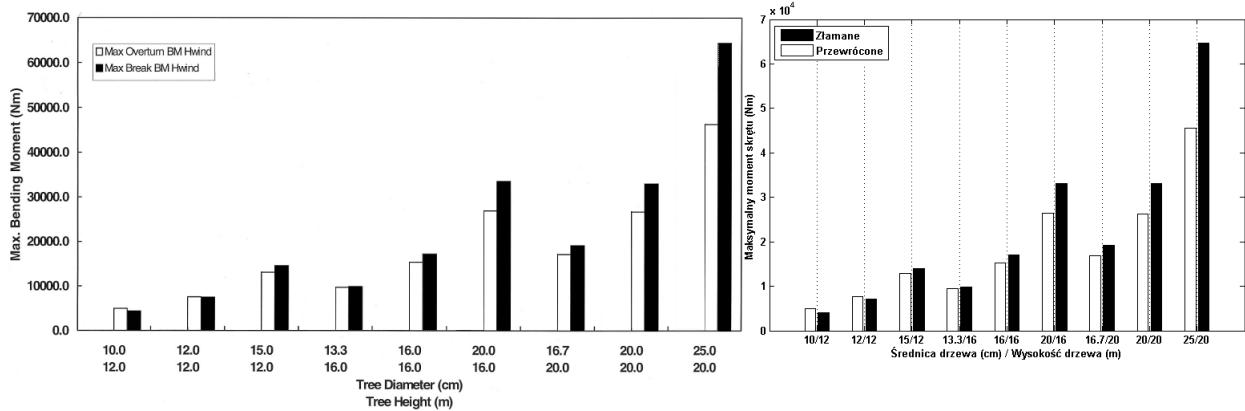
Rysunek 4.14: Po lewej stronie zdjęcie tornada [25], po prawej stronie wyniki symulacji dla maksymalnej prędkości trawersalnej $V_{\varphi,max} = 50 \frac{m}{s}$, maksymalnej prędkości radialnej $V_{r,max} = 50 \frac{m}{s}$, prędkości translacji $V_{trans} = 0 \frac{m}{s}$, maksymalnego promienia przy podstawie $8m$, kącie przesuwania środka 0° . Tornado zostało zasymulowane na prostopadłościanie $350 \times 350 \times 100m$.

Użyty w programie kształt tornada nie jest oczywiście kształtem uniwersalnym. Jak można było zauważać na rysunku 4.4 w rozdziale 3.4.5 różne tornady charakteryzują się różnymi kształtami. Autorowi pracy nie udało się jednak znaleźć odpowiedniego opracowania na ten temat, zaś wstępna analiza zdjęć tornad nie wykazała związku pomiędzy parametrami użyтыmi w modelu (promień maksymalny, prędkość cyrkulacji oraz prędkość translacji) a zmianą kształtu. Stąd można wysnuć wniosek iż kształt wiru zależy od innego parametru lub zbioru parametrów. Analiza ta wykracza jednak poza ramy tej pracy.

4.3. Weryfikacja modelu drzew

Kolejnym krokiem jest weryfikacja modelu łamliwości drzew HWIND. Wyniki uzyskane w pracy zostały porównane z rezultatami z pracy [21].

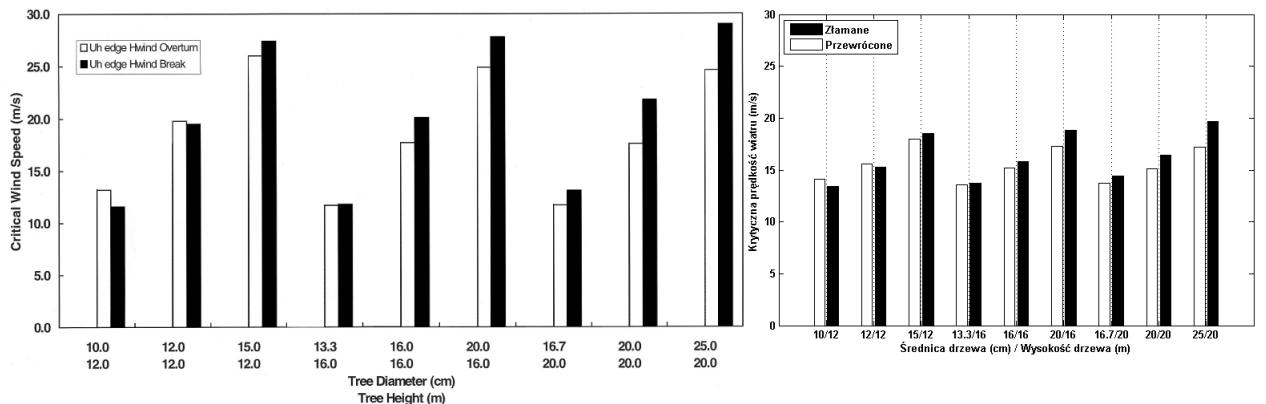
Rysunek 4.15 przedstawia porównanie maksymalnego momentu skręcającego dla sosny zwyczajnej.



Rysunek 4.15: Po lewej stronie znajdują się maksymalne momenty skręcające dla modelu HWIND z pracy [21], zaś po prawej momenty skręcające uzyskane w tej pracy dla sosny zwyczajnej.

Jak okazało się podczas tego porównania zaimplementowany model musiał zostać poddany kalibracji, z powodu bądź pomyłki w pracach źródłowych, lub braku jawnie podanej informacji. W ten sposób uległy zmianie masa korzeni z otaczającą ich glebą dla sosny zwyczajnej i świerku pospolitego (zmiany zostały uwzględnione tabeli w podanej w rozdziale 3.4.3), zaś wzór na siłę oporu drzewa na złamanie 2.11 został przeskalowany o współczynnik 1.0796. O współczynniku tym wspomniano w pracy [21], lecz nie podano jego wartości.

Co było spodziewane siła potrzebna na złamanie bądź przewrócenie drzewa rośnie wraz ze zwiększeniem się średnicy drzewa oraz jego wysokości (wieku). Siła potrzebna na przewrócenie drzewa dla niskich i chudych drzew jest większa niż siła potrzebna na ich złamanie, trend ten ulega odwróceniu wraz ze wzrostem wysokości drzewa i jego średnicy. Zależność tą można tłumaczyć relatywnie małym zwiększeniem masy korzenia oraz ziemi wokół niego wraz z wiekiem drzewa i ponad proporcjonalnym wzrostem części naziemnej.



Rysunek 4.16: Po lewej stronie znajdują się krytyczne prędkości wiatru dla modelu HWIND z pracy [21], zaś po prawej prędkości krytyczne uzyskane w tej pracy dla sosny zwyczajnej, przy odległości pomiędzy drzewami równej 5m i pustej przestrzeni przed ścianą lasu równej 10m.

Na rysunku 4.16 znajduje się porównanie prędkości wiatru przy której następuje złamanie bądź przewrócenie drzewa. Jak można zauważyć wyniki zgadzają się co do proporcji, ale nie co do wartości. Różnica ta wynika z różnego sposobu obliczania prędkości na różnych wysokościach w pracy [21]. W tej pracy przyjęto za [24] taką samą prędkość na różnych wysokościach dla dwuwymiarowego modelu tornada, zaś w pracy w stosunku do której następuje porównanie profilu prędkości jest logarytmiczny, stąd na dużych wysokościach prędkość może się znacznie różnić. W tej pracy zdecydowano się na ujednolicenie prędkości na różnych wysokościach z uwagi na chęć rozszerzenia modelu wiru o trzeci wymiar.

Prędkości krytyczne przedstawione tutaj są prędkościami wiatru wiejącego na wysokości 10 metrów nad Ziemią przez co najmniej 10 minut. Celem jednak tego modelu jest zasymulowanie zjawisk gwałtownych, stąd prędkość wiatru potrzebna do wyrządzenia szkód w lesie jest większa. Jak wynika z prac [21] i [20] średnia prędkość 10, 15 i 19 $\frac{m}{s}$ i odpowiada nagłym zrywom o prędkości 25, 30 i 50 $\frac{m}{s}$. Dane te pozwalają na aproksymację odwróconej funkcji, funkcją kwadratową o postaci przedstawionej w równaniu 4.5.

$$v_{srednie} = -0.0032158v_{zryw}^2 + 0.54722v_{zryw} - 0.1285 \quad (4.5)$$

gdzie

$v_{srednie}$ – prędkość wiatru wiejącego stale na wysokości 10 m nad Ziemią przez co najmniej 10 minut

v_{zryw} – prędkość nagłego podmuchu wiatru

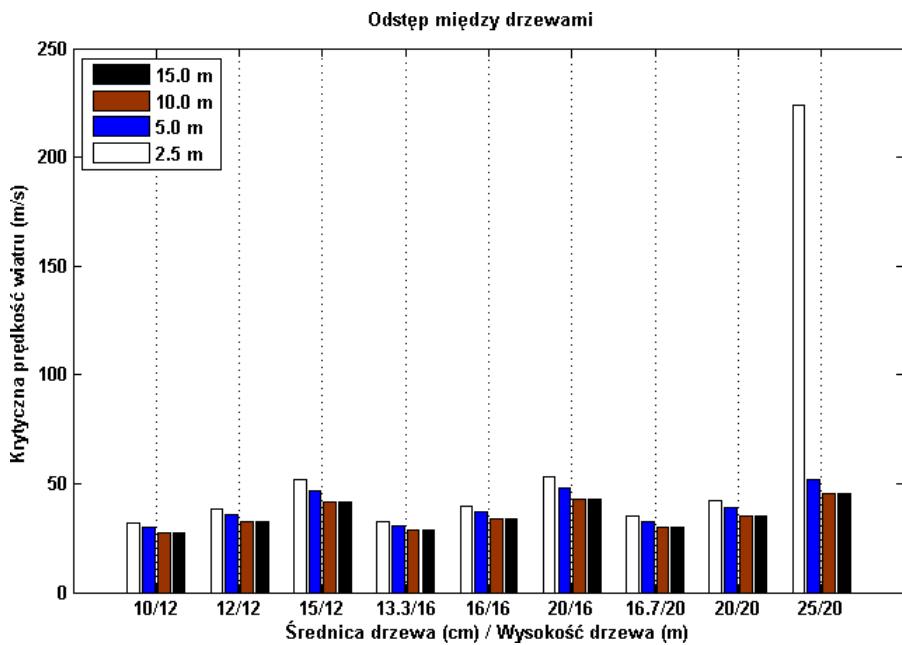
Następnie równanie 4.5 wstawione jest do równania 2.3 w celu obliczenia średniej prędkości wiatru, dzięki czemu prędkością krytyczną stanie się prędkość nagłego zrywu wiatru. Prędkości krytyczne dla poszczególnych drzew różnych gatunków zebrane są w tabeli 4.1.

drzewo	prędkości krytyczne wiatru		
wysokość (m)	średnica (cm)	prędkość złamania ($\frac{m}{s}$)	prędkość przewrócenia ($\frac{m}{s}$)
Sosna zwyczajna			
12	10	29.9	32.1
12	12	35.6	36.6
12	15	46.9	44.8
16	13.3	30.8	30.6
16	16	37.0	35.2
16	20	48.1	42.2
20	16.7	32.7	30.9
20	20	39.0	34.9
20	25	52.0	42.1
Świerk pospolity			
12	10	23.7	27.6
12	12	27.6	30.5
12	15	34.3	34.9
16	13.3	25.1	26.2
16	16	29.4	29.1
16	20	37.2	33.9
20	16.7	26.3	25.9
20	20	30.9	28.7
20	25	39.0	33.5

Tablica 4.1: Dane dotyczące prędkości krytycznych wiatru dla poszczególnych drzew. Źródło: własne

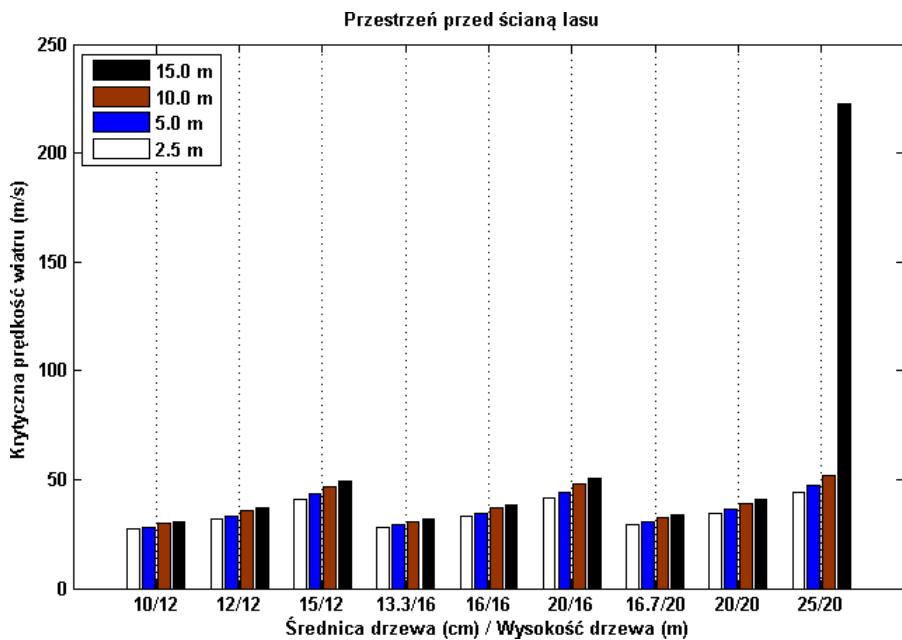
Jak można zauważyć w danych w tabeli 4.1 prędkości krytyczne w zastosowanym modelu dla świerku są niższe niż dla sosny zwyczajnej.

W dalszej części rozdziału sprawdzany będzie wpływ różnych parametrów na prędkości graniczne. Pierwszym zmienianym parametrem będzie odstęp pomiędzy drzewami w lesie.



Rysunek 4.17: Porównanie prędkości krytycznych wiatru dla których następuje złamanie drzew gatunku sosny zwyczajnej przy zmiennym parametrze odstępu.

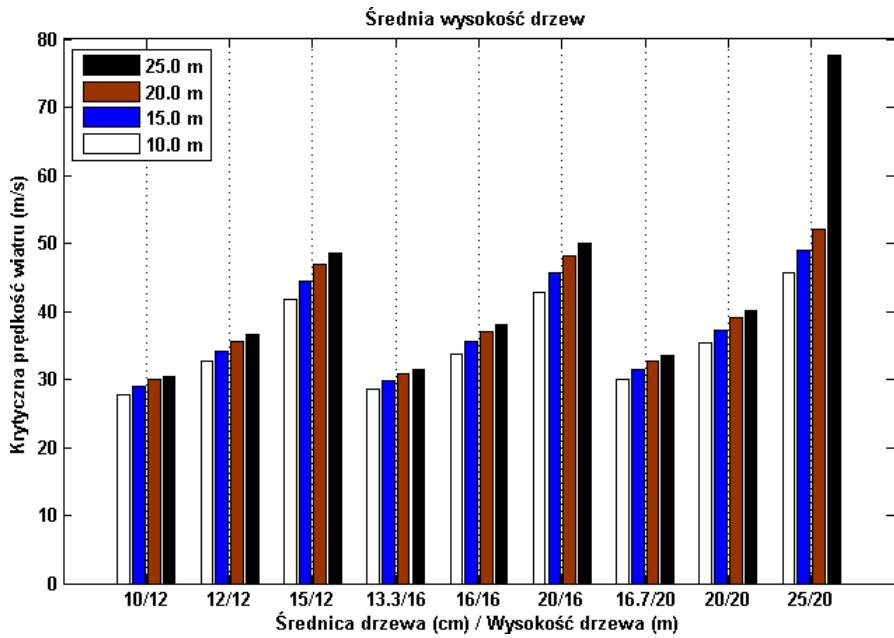
Jak widać na rysunku 4.17 im mniejsza odległość pomiędzy drzewami tym potrzebna jest większa siła w celu złamania drzewa. Oznacza to że lasy gęsto osadzone lepiej sprawdzą się w strefie zagrożenia tornadami, choć w modelu tym nie brane są pod uwagę efekty drugorzędne, takie jak działanie siły spadających drzew na inne drzewa, co może w istotny sposób wpływać na zachowanie w środowisku rzeczywistym.



Rysunek 4.18: Porównanie prędkości krytycznych wiatru dla których następuje złamanie drzew gatunku sosny zwyczajnej przy zmiennym parametrze wolnej przestrzeni przed ścianą lasu.

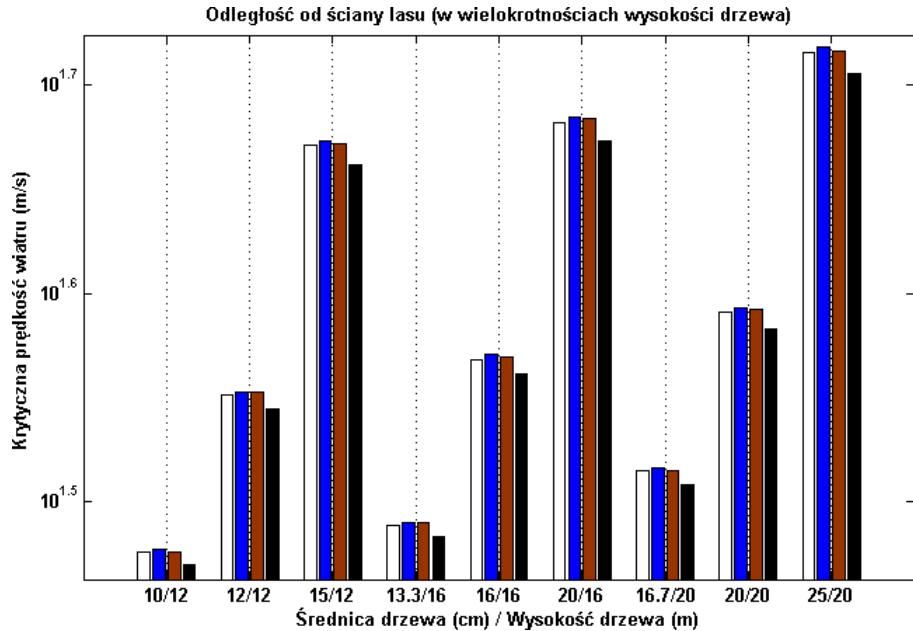
Na rysunku 4.18 znajdują się prędkości trąby powietrznej dla różnych pustych przestrzeni przed ścianą lasu. Z modelu wynika że im większa pusta przestrzeń przed ścianą lasu, tym las jest bardziej

odporny na działanie wiatru. Zjawisko to można tłumaczyć tym że wiatr wciśnięty w wąską przestrzeń nabiera większej prędkości, stąd pozostawienie pustej przestrzeni nie powoduje takiego wzrostu.



Rysunek 4.19: Porównanie prędkości krytycznych wiatru dla których następuje złamanie drzew gatunku sosny zwyczajnej przy zmiennym parametrze średniej wysokości drzew w lesie.

Na rysunku 4.19 znajdują się prędkości przy zmiennym parametrze średniej wysokości drzew w lesie. Jak można zauważyć im większa średnia wysokość drzew w lesie tym las odporniejszy na działanie wiatru. Tłumaczyć można to tym że większe drzewa niejako “chronią” drzewa młodsze swoją masą.



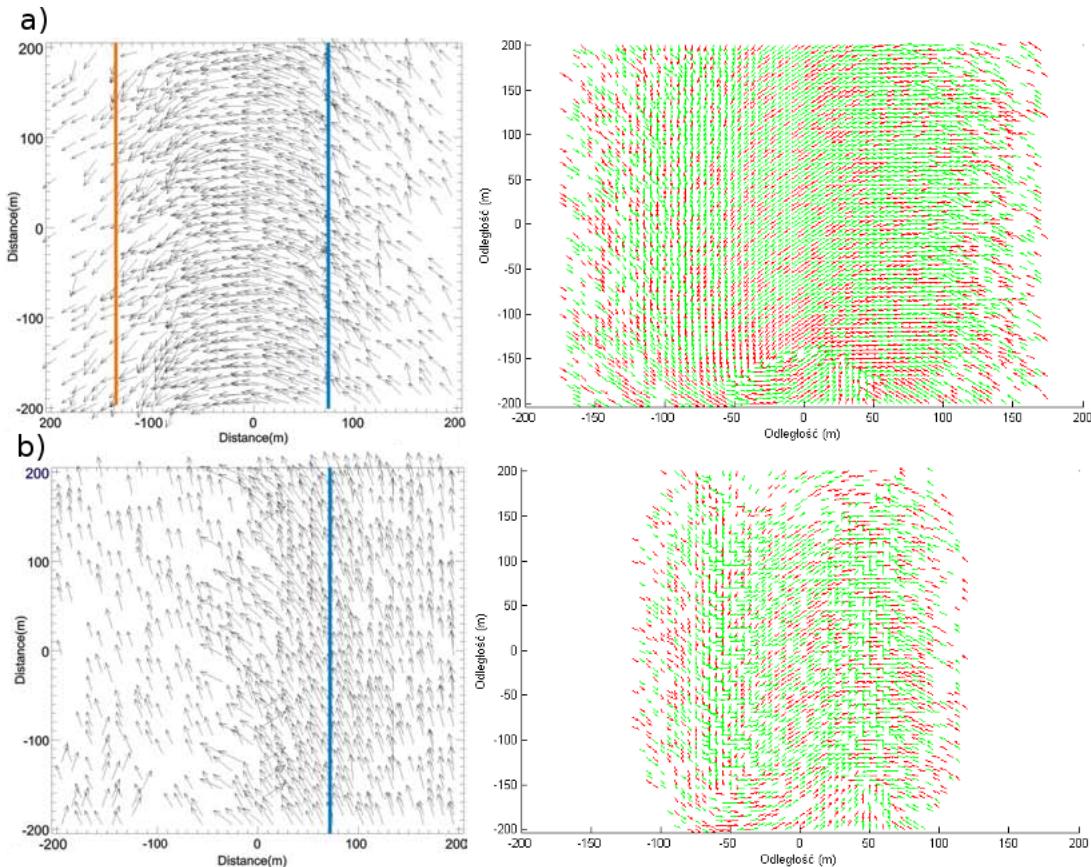
Rysunek 4.20: Porównanie prędkości krytycznych wiatru dla których następuje złamanie drzew gatunku sosny zwyczajnej przy zmiennym parametrze odległości drzewa od ściany lasu.

Na rysunku 4.20 można obserwować zmianę prędkości granicznej w zależności od odległości drzewa od ściany lasu liczonej w wielokrotności jego wysokości. Z uwagi na niewielkie wachania pomiędzy wartościami wyniki przedstawiono w skali logarytmicznej. Jak wynika z wykresu prędkość krytyczna

rośnie na skraju lasu, by osiągnąwszy pewien poziom zacząć spadać wraz z wgłębianiem się w niego. Obserwacja jest zgodna z tą poczynioną w pracy [32]. Wnioskuje się że ma to związek z charakterystyką przepływu powietrza w zamkniętych przestrzeniach.

Oznacza to że aby uchronić młody drzewostan przed wiatrem powinno się go sadzić tuż przy granicy lasu, gdzie granicę stanowią drzewa starsze i wyższe.

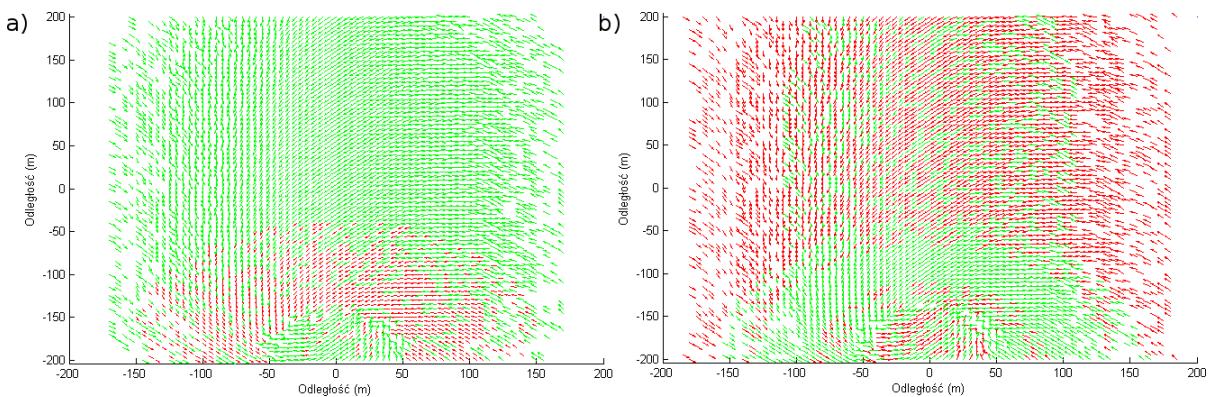
Dalsze rezultaty odnosić się będą do kształtu powałonych drzew po przejściu tornada.



Rysunek 4.21: Po lewej stronie znajdują się wyniki symulacji z pracy [17] dla (a) maksymalnej prędkości trawersalnej $V_{\varphi,max} = 79 \frac{m}{s}$, maksymalnej prędkości radialnej $V_{r,max} = 0 \frac{m}{s}$, prędkości translacji $V_{trans} = 3 \frac{m}{s}$, maksymalnego promienia $75m$; (b) maksymalnej prędkości trawersalnej $V_{\varphi,max} = 49 \frac{m}{s}$, maksymalnej prędkości radialnej $V_{r,max} = 33 \frac{m}{s}$, prędkości translacji $V_{trans} = 3 \frac{m}{s}$. Po prawej stronie znajduje się wynik przejścia uzyskany w ramach tej pracy dla (a) prędkości trawersalnej $V_{\varphi,max} = 48 \frac{m}{s}$, maksymalnej prędkości radialnej $V_{r,max} = 0 \frac{m}{s}$, prędkości translacji $V_{trans} = 3 \frac{m}{s}$; (b) prędkości trawersalnej $V_{\varphi,max} = 28 \frac{m}{s}$, maksymalnej prędkości radialnej $V_{r,max} = 20 \frac{m}{s}$, prędkości translacji $V_{trans} = 3 \frac{m}{s}$. Zielony kolor oznacza drzewa przewrócone, zaś czerwony drzewa złamane.

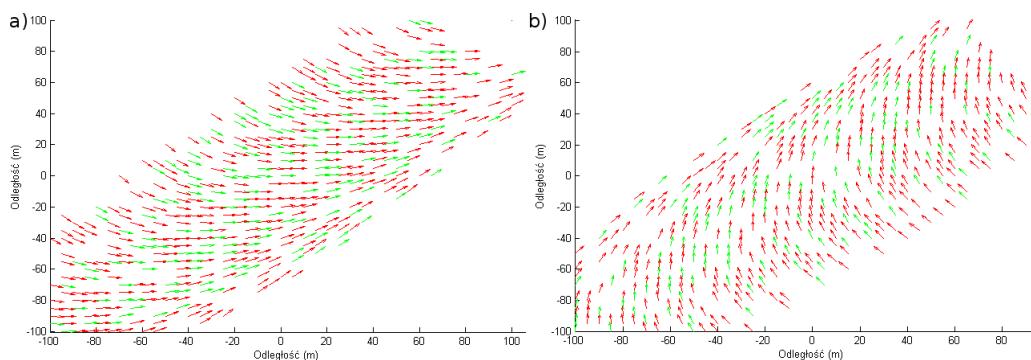
Rysunek 4.21 przedstawia porównanie skutków przejścia tornada dla sosny zwyczajnej. W symulacji użyto lasu sosnowego o przypadkowym rozkładzie wysokości pomiędzy 12 a 20 m i odstępie 5 m. Różnice w zastosowanych prędkościach wynikają z różnej czułości modeli, również z tego względu obszar zniszczeń jest nieporównywalny. W obu przypadkach można natomiast zauważać wyraźną ścieżkę przejścia tornada, ograniczoną obszarami z brakiem lub mniejszymi zniszczeniami. Drzewa w symulacji z tej pracy układają się w kształt odwzorowujący kształt wiru, zaś te z pracy [17] skierowane są bardziej w stronę kierunku przesuwania się trąby, co wynika z innego modelu upadku drzew. Porównując wir o zerowej prędkości radialnej, z tym o prędkości dodatniej można stwierdzić że ten drugi jest bardziej skupiony na mniejszym obszarze.

Na rysunku 4.22 przedstawiono porównanie dla niższego i wyższego lasu sosnowego. Najbardziej znaczącą obserwacją jest to że w lesie niższym większość drzew zostaje wyrwana, zaś w drugim przy-



Rysunek 4.22: Porównanie zniszczeń dla tornada o maksymalnej prędkości trawersalnej $V_{\varphi,max} = 48 \frac{m}{s}$, maksymalnej prędkości radialnej $V_{r,max} = 0 \frac{m}{s}$ i prędkości translacji $V_{trans} = 3 \frac{m}{s}$ dla (a) lasu złożonego z sosen o wysokości 12 m i (b) lasu złożonego z sosen o wysokości 20 m.

padku większość drzew zostaje złamana. Powodem tego jest bardziej rozbudowany system korzeniowy u drzew starszych.



Rysunek 4.23: Porównanie zniszczeń dla tornada o maksymalnej prędkości trawersalnej $V_{\varphi,max} = 16 \frac{m}{s}$, maksymalnej prędkości radialnej $V_{r,max} = 10 \frac{m}{s}$ i prędkości translacji $V_{trans} = 10 \frac{m}{s}$ dla lasu złożonego ze świerków pospolitych o wysokości 20 m dla wiru (a) dwuwymiarowego i (b) trójwymiarowego.

Rysunek 4.23 przedstawia porównanie wyników pomiędzy tornadem dwuwymiarowym a trójwymiarowym. Jak wynika z tego porównania rezultaty są bardzo podobne. Jedyną różnicą jest ułożenie drzew, co spowodowane jest przesunięciem środka ciężkości wiru w przypadku trójwymiarowym nieco do tyłu. W aspekcie ilościowym natomiast nie widać różnic. Spowodowane jest to tym że tornado odbiega kształtem od walca stojącego pionowo dopiero na wyższych wysokościach.

Na rysunku 4.24 przedstawiono skutki przejścia prawdziwego tornada. Z uwagi jednak na brak wiarygodnych danych co do parametrów tego konkretnego zjawiska nie zdecydowano się na bezpośrednie porównanie z wynikami działania programu. Można jednak zaobserwować pewne cechy zbieżne pomiędzy zjawiskiem rzeczywistym a symulowanym. Po pierwsze tornado pozostawiło wyraźny ślad swojego przejścia ograniczony z dwóch stron drzewami nadal stojącymi lub obszarami o małych zniszczeniach. Kolejnym podobieństwem jest to że część drzew uległa złamaniu, a część przewróceniu, przy czym na zdjęciu 4.24 większość drzew jest powalone co można było zaobserwować także w wynikach symulacji na zdjęciu 4.22. Pozwala to na ostrożne stwierdzenie że las ten złożony był z młodego drzewostanu lub też tornado było znacznej siły. Ponadto powalone drzewa układają się w charakterystyczne półkola będące odwzorowaniem kształtu tornado. Ich ułożenie w rzeczywistości nie jest oczywiście tak symetryczne jak w symulacji.



Rysunek 4.24: Zdjęcia lotnicze lasu po przejściu trąby powietrznej w okolicach Radomska w województwie łódzkim w sierpniu 2008 roku. Źródło: [26].

4.4. Potencjalne kierunki rozwoju

Wykonany w ramach pracy model pogodowy wymaga jeszcze wielu poprawek aby mógł być prawdziwie użyteczny. Potencjalne kierunki rozwoju można podzielić na kilka obszarów.

Pierwszy obszar dotyczy danych. Aby uwiarygodnić model i poprawnie go skalibrować potrzebne są dane eksperymentalne, zarówno jeśli chodzi o dane dotyczące kształtu i profilu prędkości tornad, jak i danych na temat rzeczywistych zniszczeń drzew.

Drugi obszar dotyczy przeniesienia obliczeń z modelu drzew na model wiru. W przypadku dwuwymiarowym w zupełni wystarczającym jest zastosowanie statystycznego modelu drzew o znikomym narzucie obliczeniowym. Ulepszeniu lub całkowitej zmianie powinien natomiast ulec model wiru, gdyż ułożenie złamanych lub przewróconych drzew zależy w głównej mierze właśnie od niego. Jeśli zaś chodzi o przypadek trójwymiarowy bardziej skomplikowany model łamliwości drzew jest niezbędny do prawidłowego działania, z powodu niemożności wcześniejszego obliczenia działania wszystkich możliwych profili prędkości na różnych wysokościach na pojedyncze drzewo. W samym zaś modelu wiru należałoby zwrócić szczególną uwagę na zmiany prędkości na różnych wysokościach.

Trzecim obszarem jest automatyzacja. Obecna aplikacja pozwala jedynie na obserwację zachowań modelu i wyciąganie wniosków z jego działania. Bardziej jednak użytecznym byłoby, po dostatecznie dokładnej kalibracji, wykorzystanie aplikacji także do automatycznej klasyfikacji tornada na podstawie zniszczeń i zaklasyfikowania go do skali Fujity. Zadanie to mogło by się odbywać według następującego algorytmu:

1. Wczytanie zdjęcia lotniczego.
2. Określenie wymiarów geometrycznych przez użytkownika (wielkość siatki, odstęp pomiędzy drzewami, gatunek drzew, maksymalna wysokość drzew, rozkład wiekowy lasu).
3. Określenie niektórych parametrów wiru przez użytkownika (trasa przebiegu oka tornada, prędkość liniowa).
4. Automatyczne określenie niektórych danych ze zdjęcia
 - (a) Binaryzacja zdjęcia

- (b) Translacja powalonych drzew do postaci siatki danych (drzewo powalone/drzewo stojące, kąt powalenia).
 - (c) Oszacowanie średnicy wiru
5. Poprawienie zdyskretyzowanej reprezentacji lasu przez użytkownika.
 6. Określenie funkcji błędu pomiędzy symulacją a danymi empirycznymi
 - (a) Przeprowadzenie N symulacji przebiegu tornada z różnymi danymi odnośnie jego klasy.
 - (b) Wyznaczenie wartości błędu pomiędzy symulacjami a danymi empirycznymi.
 - (c) Aproksymacja uzyskanych punktów do funkcji błędu.
 7. Minimalizacja funkcji błędu do przedziału.
 8. Powtarzanie kroku 6 aż do uzyskania satysfakcjonującego małego błędu.
 9. Prezentacja klasy tornada użytkownikowi.

5. Podsumowanie

W toku tej pracy stworzono i opisano aplikację modelującą przejście trąby powietrznej przez teren zalesiony, po pierwsze w celu analizy charakteru zjawiska, zaś po drugie w celu sprawdzenia jakie warunki doboru i rozmieszczenia drzew są najbardziej korzystne w rejonach o zwiększym zagrożeniu przejścia takiego zjawiska.

Model statycznie rotującego wiru Rankine spełnił oczekiwania jako podstawa do analizy najważniejszych cech charakterystycznych trąb powietrznych. Wektory wiatru dla wolno poruszającego się tornada układają się w kształt kołowy, jeśli natomiast prędkość radialna wewnętrz tornada rośnie kształt tenaczyna być bardziej spiralny. Również zwiększenie prędkości przesuwania się tornada względem Ziemi powoduje asymetrię prędkości wokół środka wiru, gdzie największe prędkości osiągane są tuż za centrum, w kierunku przeciwnym do kierunku przesuwania się tornada.

Do ważnych osiągnięć autor zalicza rozszerzenie modelu wiru do postaci trójwymiarowej. Kształt wiru różni się znacznie w zależności od parametrów tornada. Z powodu niemożności identyfikacji tych parametrów w toku pracy zdecydowano się na odwzorowanie jedynie kształtu walcowatego leja. Uzyskane wyniki zgadzają się jakościowo z rzeczywistymi zjawiskami. Mimo jednak tej zgodności okazało się że różnice pomiędzy wirami dwuwymiarowymi a trójwymiarowymi na wysokościach do 20 m są niewielkie, zaś różnice w złożoności obliczeniowej są znaczne. Więcej uwagi należy zatem poświęcić zmianom przepływów powietrza pomiędzy drzewami, niż na skupianiu się na pionowemu profilowi prędkości ponad koronami drzew.

Przejście tornada przez las pozostawia za sobą charakterystyczne ułożenie powalonej drzew. Drzewa te układają się w kształt zbliżony do ułożenia wektorów prędkości powietrza wewnętrz wiru. Ścieżka zniszczeń stanowi wąski pas ograniczony stojącymi drzewami lub obszarami o sporadycznie rozłożonych szkodach. Znaczący przy tym jest także fakt że wiatr wiejący stale, nawet z mniejszą prędkością, może powodować takie same zniszczenia jak nagły podmuch wiatru o dużej sile i powodować wymiatanie lasu na dużych obszarach.

Osoby odpowiedzialne za rodzaj obsady w lasach mogą być zainteresowane następującymi konkluzjami płynącymi z analizy działania programu. Drzewa różnią się wytrzymałością w zależności od gatunku. Spośród badanych gatunków sosny zwyczajnej i świerku pospolitego, ten pierwszy okazał się być bardziej trwałym. Siła potrzebna na przewrócenie drzewa dla niskich i chudych drzew jest większa niż siła potrzebna na ich złamanie, trend ten ulega odwróceniu wraz ze wzrostem wysokości drzewa i jego średnicy. Spowodowane jest to bardziej niż proporcjonalnym wzrostem średnicy pnia w porównaniu z rozrostem systemu korzeniowego wraz z wiekiem drzewa, co przesuwa punkt złamania drzewa niżej. Szeroka przestrzeń przed ścianą lasu oraz duże zagęszczenie drzew uodparniają las na działanie tornada. Powodem tego jest dynamika przepływu powietrza w ciasnych przestrzeniach - pustą przestrzeń przed ścianą lasu powoduje równomierne rozłożenie siły nacisku wiatru. Prawidłowość ta zachowana jest jedynie przy założeniu że nie występują efekty drugorzędne upadku drzew, takie jak działanie siły upadającego drzewa na drzewa sąsiednie. Zmniejszeniu zniszczeń przez tornada pomaga także większa średnia wysokość drzew w lesie. Zjawisko to można tłumaczyć przejęciem przez wyższe drzewa siły nacisku, co powoduje zmniejszenie tej siły dla znajdujących się w pobliżu drzew młodszych. Inną znaczącą obserwacją jest to że drzewa znajdujące się tuż na skraju lasu są najbardziej odporne na działanie silnych wiatrów, a odporność ta maleje wraz z zagłębianiem się w jego wnętrze. Wyjaśnia się to profilem przepływu mas powietrza w zamkniętych przestrzeniach.

Do najważniejszych rezultatów pracy według autora należy właśnie sukcesywna implementacja modelu Rankine i HWIND pomimo często niepełnych lub błędnych materiałów źródłowych. Przykładem poradzenia sobie z niepełnymi materiałami może być samodzielne wyprowadzenie przez autora pracy wzoru na współczynnik przepływu wiatru S_t w modelu łamliwości drzew. Sytuację z pracami źródłowymi pogarsza fakt że tematyka ta nie jest praktycznie poruszana w polskiej literaturze naukowej. Jak wspomniano we wstępie jest to spowodowane małą częstotliwością zjawisk tego typu w naszym kraju. Jednakże zmiany klimatyczne będą z czasem podnosiły rangę tego problemu. Sam model, mimo że prosty i wciąż wymagający wielu poprawek, dobrze poradził sobie z odwzorowaniem rzeczywistości. Z uwagi na dużą ilość prostych obliczeń może także z powodzeniem skorzystać na zrównolegleniu. Jak okazało się jednak w trakcie wykonywania pracy, zagadnienie modelowania pogody wymaga dużej wiedzy eksperckiej i w związku z tym pracy całego zespołu o wiedzy z różnych dziedzin poczynając od inżynierii środowiska poprzez fizykę, na informatyce skończywszy.

Bibliografia

- [1] Consortium for small scale modeling. <http://www.cosmo-model.org/>.
- [2] European Severe Weather Database. <http://www.essl.org/ESWD/>.
- [3] IMGW - Prognozy i dane meteorologiczne. http://www.imgw.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=65&Itemid=144.
- [4] MATLAB. <http://www.mathworks.com/products/matlab/>.
- [5] Polskie Lasy Państwowe. http://www.lasy.gov.pl/o_lasach/polskie_lasy.
- [6] Portal Korporacyjny Lasów Państwowych - Trąba powietrzna z 15.VII.2008 r. <http://www.szczecin.lasy.gov.pl/web/koszecin/40>.
- [7] Tornado w Polsce występują coraz częściej. http://www.wiadomosci24.pl/artykul/tornado_w_polsce_wystepuja_coraz_czesciej_34539-2-1-d.html?usun_komentarz=.
- [8] Tornado. <http://www.twojapogoda.pl/encyklopedia/t/105793,tornado>.
- [9] Tornado czy trąba powietrzna? <http://www.twojapogoda.pl/wiadomosci/106827,tornado-czy-traba-powietrzna>.
- [10] Using offset points for forensic height measurement. <http://www.photomodeler.com/kb/entry/75/>.
- [11] VOL3D Volume (voxel) render. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/4927-vol3d-m-vol3dtool-m>.
- [12] The globe and mail. <http://images.theglobeandmail.com/archives/RTGAM/images/20070623/w-tornadogallery0623/tornado2.jpg>, 2007.
- [13] Technical summary of the national hurricane center track and intensity models. Technical report, National Hurricane Center, 2009.
- [14] Image processing toolbox. <http://www.mathworks.com/products/image/>, 2011.
- [15] Public service commision in florida - what's on a utility pole? <http://www.psc.state.fl.us/consumers/utilitypole/en/AllUtilityPoleInfo.aspx>, 2011.
- [16] Zetor proxima. <http://www.zetor.com/zetor-proxima>, 2011.
- [17] V. Beck. Near-surface tornado wind field reconstruction from forest damage. 2008.
- [18] H. Bluestein. Mobile Doppler radar observations of tornadoes. *Preprints. 4th European Conference on Sever Storms*, www.essl.org/ECSS/2007/abs/05-Radar/bluestein-1177432754.pdf, 2007.
- [19] N. Dotzek, R. E. Peterson, B. Feuerstein, and M. Hubrig. Comments on a simple model for simulating tornado damages in forests". 2007.

- [20] B. Gardiner, K. Byrne, S. Hale, K. Kamimura, S. J. Mitchell, H. Peltola, and J.-C. Ruel. A review of mechanistic modelling of wind dome risk to forests. 2008.
- [21] B. Gardiner, H. Peltola, and S. Kellomäki. Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees. 1999.
- [22] D. B. Giaiotti and F. Stel. The rankine vortex model. 2006.
- [23] F. Haugen. *Basic dynamics and control*. TechTeach, Sierpień 2010.
- [24] A. P. Holland, A. J. Riordan, and E. Franklin. A simple model for simulating tornado damages in forests. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45, Grudzień 2006.
- [25] M. Humpage. <http://www.markhumpage.com/Mother-Nature/Severe-Weather>, 2008.
- [26] P. Januszko. *Skutki Trąby Powietrznej w okolicach Radomska*. <https://picasaweb.google.com/przemyslaw.januszko/SkutkiTrByPowietrznejWOkolicachRadomska>, 2008.
- [27] Z. Kazimierski. *Ruch wirowy płynów w przyrodzie oraz w maszynach i urządzeniach*. Politechnika Łódzka, Łódź, 2007.
- [28] K. T. Kilty. Steady-state tornado vortex models. Czerwiec 2005.
- [29] H. Lorenc. Trąby powietrzne w polsce. http://www.imgw.pl/wl/internet/zz/zz_xpages/klimat/klimat_pliki/archiwum/klimat_02032005.html, 2005.
- [30] W. Muła. Wypełnianie trójkątów i czworokątów wypukłych. 2007.
- [31] E. Nguyen. The tornado galleries of eric nguyen. <http://www.mesoscale.ws/pictures/tornadic/>, 2005.
- [32] H. Peltola. Mechanical stability of trees under static loads. 2006.
- [33] H. Peltola and S. Kellomäki. A mechanistic model for calculating windthrow and stem breakage at stand edge. *Silva Fennica*, 27:99–111, 1993.
- [34] H. Peltola, S. Kellomäki, H. Väisänen, and V.-P. Ikonen. A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of scots pine, norway spruce, and birch. 1999.
- [35] M. Russ and H. Kim. *UML 2.0 Wprowadzenie*. Wydawnictwo Helion, Gliwice, 2007.
- [36] E. Sobol and et al. *Nowy słownik języka polskiego*. Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa, 2002.
- [37] L. Yu-Chieng. A preliminary study of retriving vortex circulation using a lagrangian coordinate and single doppler radar data. 1998.