

Opinia dotycząca zagrożeń związanych z eksploatacją i awariami turbin wiatrowych

Streszczenie

Łopaty turbiny wiatrowej oraz gromadzące się na nich lód, śnieg lub inne osady przemieszczają się z ogromnymi prędkościami. W chwili odseparowania się od turbiny jakiegokolwiek elementu może on zostać odrzucony na znaczną odległość. W oparciu o podstawowe prawa fizyki stworzono model numeryczny pozwalający na obliczanie trajektorii lotu i maksymalnego zasięgu rzutu. Dla typowej turbiny o mocy kilku megawatów odłamki lodu o masach od kilku do kilkunastu kilogramów mogą być odrzucane na odległość ponad 700 m. Z analizy statystycznej wynika, że wbrew obiegowej opinii większość odłamków (o danej masie) oderwanych podczas pracy turbiny spada daleko od niej. W przypadku awarii polegającej na urwaniu się fragmentu łopaty lub rozpadu wskutek rozkręcenia się turbiny powyżej prędkości konstrukcyjnej – nie można wykluczyć ciskania odłamkami na odległości powyżej kilometra. Pożary turbin, wywołane przez uderzenia piorunów lub awarie aparatury, mogą podczas silnego wiatru spowodować zagrożenie w odległości nawet 10-krotnej wysokości turbiny. Wobec realnego zagrożenia dla bezpieczeństwa publicznego związanego z eksploatacją i awariami turbin wiatrowych oraz brakiem jakichkolwiek uregulowań prawnych w Polsce w tym zakresie, konieczne jest ich jak najszybsze opracowanie i wdrożenie. Za obszar zagrożony należy uznać co najmniej teren o promieniu określonym przez maksymalny zasięg rzutu przy obrotach turbiny powodujących jej rozerwanie.

1. Wstęp

W związku z obserwowanym w ostatnich latach w Polsce gwałtownym nasileniem procesów inwestycyjnych związanych z budową i eksploatacją turbin wiatrowych o dużej mocy oraz całkowitym brakiem uregulowań prawnych związanych z bezpieczeństwem publicznym konieczne jest zwrócenie uwagi na poważne zagrożenia związane z eksploatacją tych urządzeń w sąsiedztwie siedzib ludzkich i terenów użytkowych.

Wiele turbin instalowanych w Polsce to urządzenia regenerowane pochodzące z demontażu, o znacznym stopniu zużycia. Instalacje takie, wobec narastającego zmęczenia materiałowego (przede wszystkim łopat z laminatu epoksydowego lub poliestrowego) są szczególnie narażone na awarie polegające na urwaniu fragmentu śmigła.

Jest wobec tego niezbędne, by najszybciej jak to możliwe, np. w oparciu o art. 5 ust. 3. *Ustawy o dozorcze technicznym*, Rada Ministrów wydała rozporządzenie obejmujące dozorem technicznym turbiny wiatrowe. Szczegółowe wytyczne powinny określać w szczególności maksymalne rezerwy dla poszczególnych elementów elektrowni wiatrowej. Należy też zmodyfikować ustawy o planowaniu przestrzennym i prawo budowlane tak, by uwzględniały realną strefę zagrożenia wokół turbiny.

2. Stan prawny

Turbiny wiatrowe nie polegają kontroli ani ze strony Dozoru Technicznego, ani Nadzoru Budowlanego. Art. 4. ust 1. pkt b) *Ustawy o dozorze technicznym* (Dz. U. Nr 122, poz 1321) określa, że ustawa dotyczy urządzeń technicznych, które mogą stwarzać zagrożenie dla życia lub zdrowia ludzkiego oraz mienia i środowiska wskutek wyzwolenia energii potencjalnej lub kinetycznej przy przemieszczaniu ludzi lub ładunków w ograniczonym zasięgu. W definicji tej nie mieszczą się turbiny wiatrowe, ze względu na brak elementu “przemieszczania ludzi lub ładunków”. *Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 16 lipca 2002 r. w sprawie rodzajów urządzeń technicznych podlegających dozorowi technicznemu* nie wymienia turbin wiatrowych. Z kolei Nadzór Budowlany [1] nie zajmuje się ruchomymi częściami budowli twierdząc, że w kręgu ich zainteresowań znajdują się jedynie fundament i maszt turbiny.

Tymczasem urządzenie techniczne w postaci gondoli wraz z pędnikiem stwarza zagrożenie życia i mienia na znacznym obszarze wskutek wyzwolenia energii potencjalnej (dla samych łopat jest ona rzędu 20,000,000 Nm *) i kinetycznej (rzędu 6,000,000 Nm) zarówno w przypadku awarii jak i podczas normalnej eksploatacji.

3. Zagrożenia

Typowe turbiny dużej mocy (Tabela 1.) pracują w zakresie prędkości wiatru od kilku do ok. 20 m/s obracając się w tempie od 9 do 19 obrotów na minutę. W nominalnych warunkach eksploatacyjnych (prędkość wiatru rzędu 10 m/s) końcówka łopaty porusza się z prędkością liniową ok. 80-90 m/s, czyli 290-320 km/h.

Przy tak dużych prędkościach oraz znacznej wysokości turbiny nad poziomem terenu dowolna masa odrywająca się od końcówki łopaty staje się pociskiem, który może poszybować na znaczną odległość.

Tabela 1

Turbina Moc [MW]	Średnica [m]	Wysokość masztu [m]	Masa łopaty [kg]	Zakres prędkości wiatru [m/s]	Prędkość obrotowa [obr. /min]	Max. prędkość końcówki łopaty		Źródło
						[m/s]	[km/h]	
Gamesa G90 – 2 MW	90	67-78-100	5800	3 – 21/25	9 – 19	90	320	[3], [4]
Gamesa G97 – 2 MW	97	78-90-100-120	7313	3 – 25	9.6 – 17.8	90	320	[5][7]
Vestas V80 – 2 MW	80	60-67-78-100	6500	4 – 25	10.8 – 19.1	80	288	[8]
Vestas V90 – 3 MW	90	80-90-105	6700	3.5 – 25	8.6 – 18.4	87	312	[6]

3.1 Zagrożenia podczas normalnej eksploatacji

W okresie zimowym, a w górach także w innych porach roku, w (nie)sprzyjających okolicznościach pogodowych na łopatach turbiny gromadzi się śnieg i lód (rys. 1.), który jest rorzucany wokół wiatraka.

^{*)} 20,000,000 Nm odpowiada energii jaka wyzwoliłaby się podczas upadku autobusu miejskiego z wierzchołka Pałacu Kultury



Rys. 1. Oblodzenie turbiny i fragmenty odrzuconego lodu [2],[9].

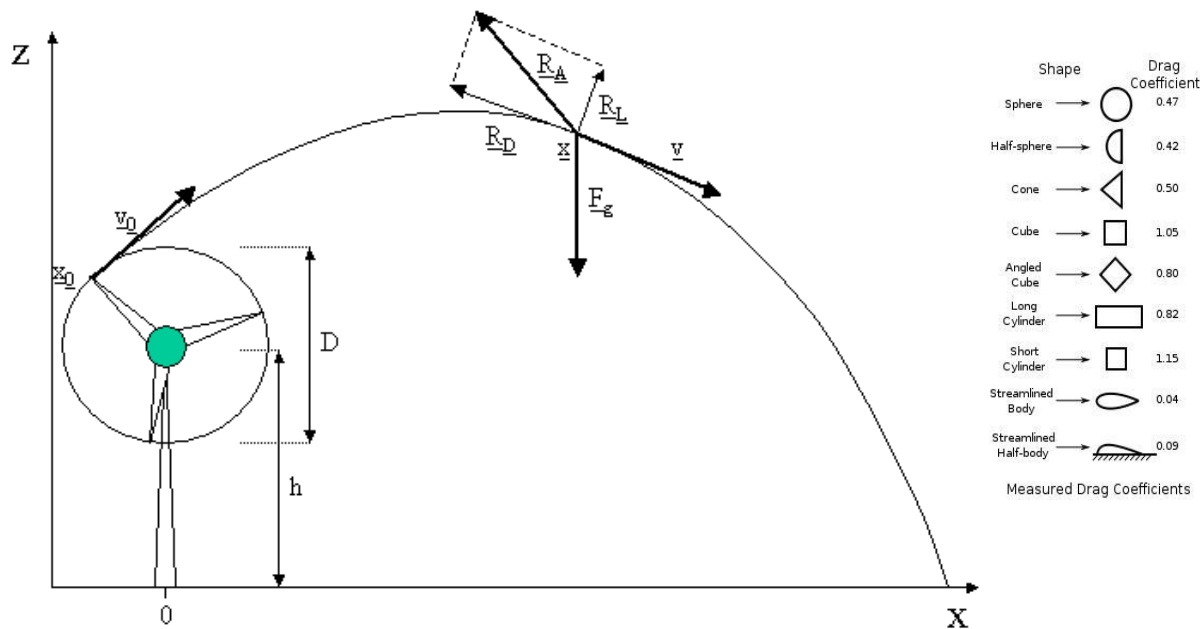
Często cytowana “odległość bezpieczna” ze względu na rzucanie lodem, $d = 1.5(D+H)$, gdzie H jest wysokością masztu, a D średnicą turbiny, jest w rzeczywistości rekomendacją [2] opartą na bardzo szacunkowych ocenach prawdopodobieństwa upadku odłamków lodu w pobliżu turbiny i ma niewiele wspólnego z rzeczywistą odległością na jaką ciskane mogą być kawałki lodu.

W przypadku typowej turbiny wiatrowej odległość określana jako „bezpieczna” wynosi ok. 280 m i jest ponad dwukrotnie mniejsza od rzeczywistego zasięgu rzutu.

W celu poprawnego zbadania zagrożenia wynikającego z rzucania lodem należy możliwie wiarygodnie określić maksymalną odległość na jaką mogą być ciskane odłamki. Badania dotyczące tego problemu były podejmowane w przeszłości (np. [10],[11],[13],[14]), ale w większości przypadków służyły jedynie do wykazania, że w pewnej odległości od turbiny prawdopodobieństwo uderzenia odłamkiem lodu jest niewielkie i dlatego może zostać zignorowane. Oznacza to, że tzw. „bezpieczna odległość” dotyczy tylko pewnej części odłamków ciskanych przez turbiny wiatrowe i jako taka nie może być uznana za w pełni spełniająca wymogi bezpieczeństwa.

Poprawna metodologia badań wymaga określenia warunków brzegowych problemu, zastosowania równań dynamiki dla ruchu bryły sztywnej i ich całkowania. W zagadnieniu, z jakim mamy do czynienia, podstawowym problemem jest nieznanostwo kształtu i rozkładu gęstości bryły podlegającej rzutowi. Rachunek można jednak wykonać metodą symulacji dla skończonej liczby przypadków szczególnych i odszukać “najgorszy możliwy scenariusz”, wynikający z praw fizyki.

W przypadku rzutu elementem oderwanym od turbiny warunki brzegowe określone są przez prędkość początkową \underline{v}_0 i punkt oderwania elementu \underline{x}_0 (początkowe wektory prędkości i położenia elementu), prędkość wiatru oraz kształt i rozkład masy w elemencie. Na element działa siła grawitacji \underline{F}_g oraz siła aerodynamiczna \underline{R}_A , której składowe – siła oporu \underline{R}_D i siła nośna \underline{R}_L zależą od orientacji elementu względem chwilowego wektora prędkości \underline{v} . Określenie współczynnika oporu C_D i współczynnika siły nośnej C_L dla dowolnej bryły nie jest w ogólności możliwe (w praktyce wyznacza się je w tunelu aerodynamicznym) i dlatego uzyskane rozwiązania są w pewnym stopniu przybliżone. Dla wielu brył (profil skrzydła turbiny, kula śniegowa, sople) współczynniki te są jednak dość dobrze znane.

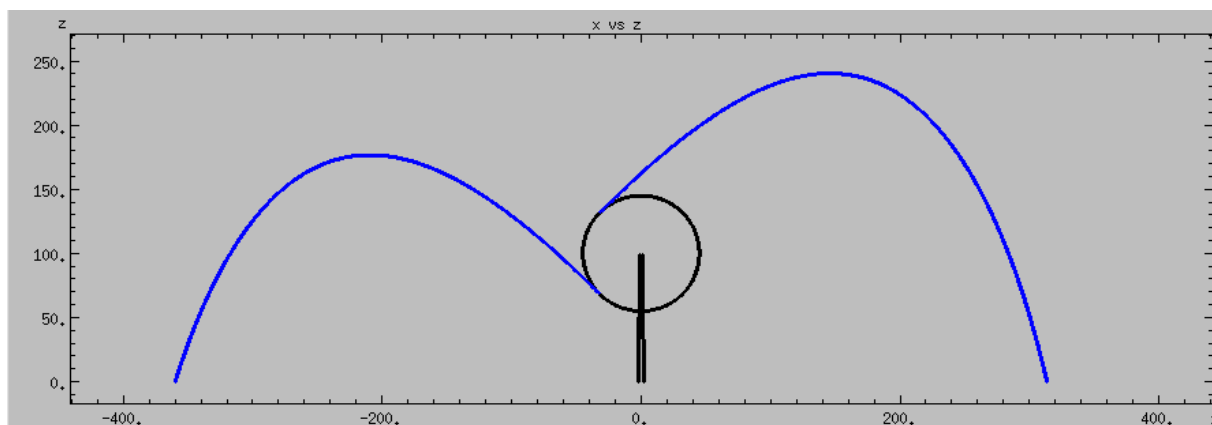


Rys 2. Trajektoria wystrzelonego odłamka i działające na niego siły.

W tej części analizy zajmiemy się rzutem kawałka lodu z turbiny o średnicy $D=90$ m i wysokości masztu $h=100$ m z prędkością początkową $v_0=90$ m/s pod kątem 45 stopni do horyzontu. Jako przykładowe bryły rozważymy kulę (współczynnik oporu $C_D=0.47$) i sopol ($C_D=0.82-1.17$).

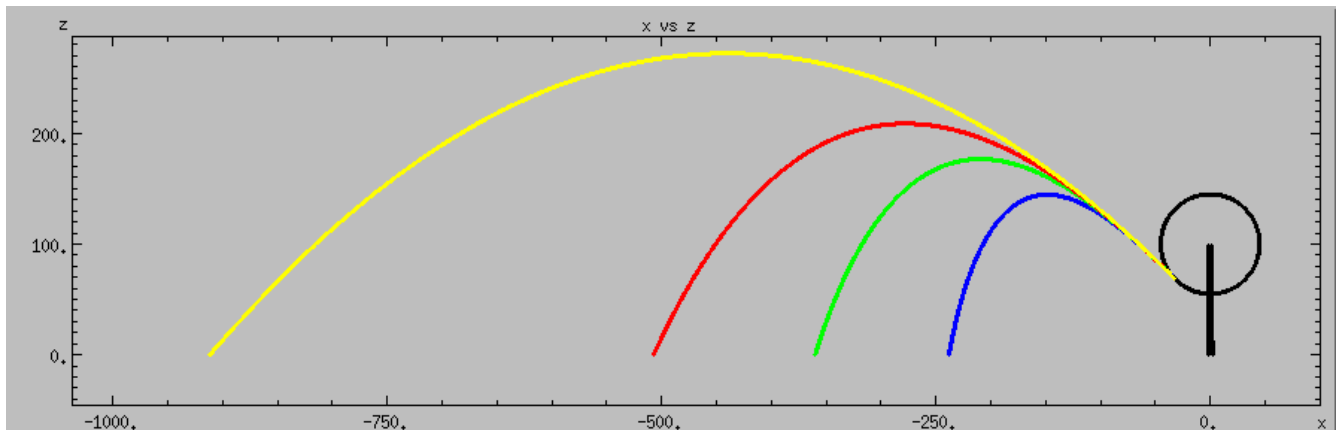
Wiarygodne uwzględnienie siły nośnej jest większości przypadków praktycznie niemożliwe. Siła ta działając na nieregularny fragment będzie miała dość przypadkową wartość a jej kierunek i zwrot będą się zmieniać podczas rotacji bryły. Może to oczywiście doprowadzić do zmiany trajektorii lotu, ale zważywszy, że działa ona prostopadle do kierunku lotu, nie powinna zmienić zasięgu w sposób istotny. Pełne rachunki aerodynamiczne przedstawione zostały m.in. przez Slegersa [14], który pokazał, że nawet dla profilu ściśle aerodynamicznego (urwany fragment łopaty) wpływ siły nośnej na zasięg rzutu i zachowanie głównej płaszczyzny rotacji bryły jest nieznaczny. Z tego powodu w przedstawionej analizie (podobnie jak np. u Seiferta [10]) nie uwzględniono wpływu siły nośnej na trajektorię lotu.

Maksymalny zasięg rzutu uzyskuje się przy początkowym nachyleniu toru lotu ok. 45 stopni do horyzontu. Rzut z wyższego położenia (w prawo, nad turbiną - rys. 3.) ma nieco dłuższą trajektorię, ale ostatecznie odłamek spada bliżej turbiny niż podczas rzutu z położenia niższego.

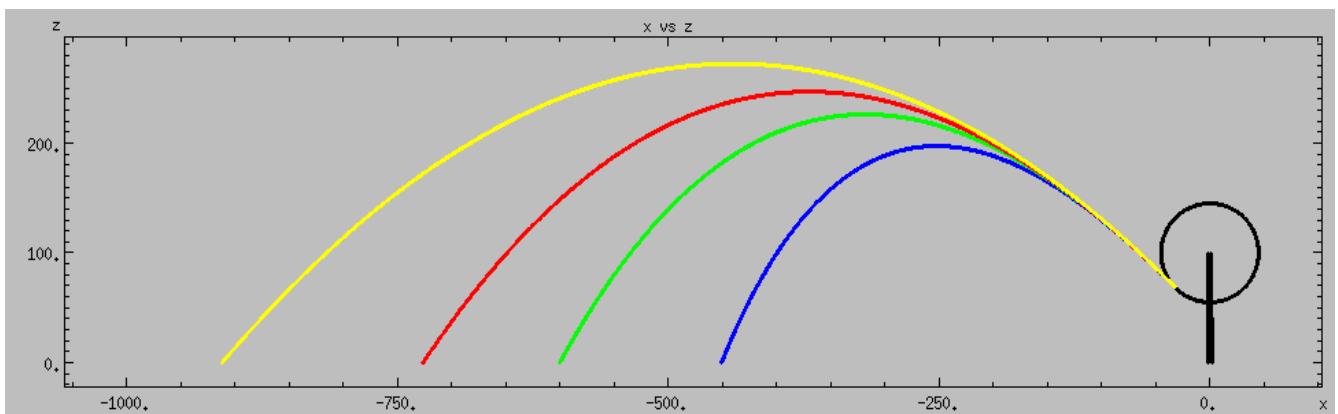


Rys. 3. Maksymalny zasięg rzutu z położenia wyższego (rzut nad turbiną) i niższego.

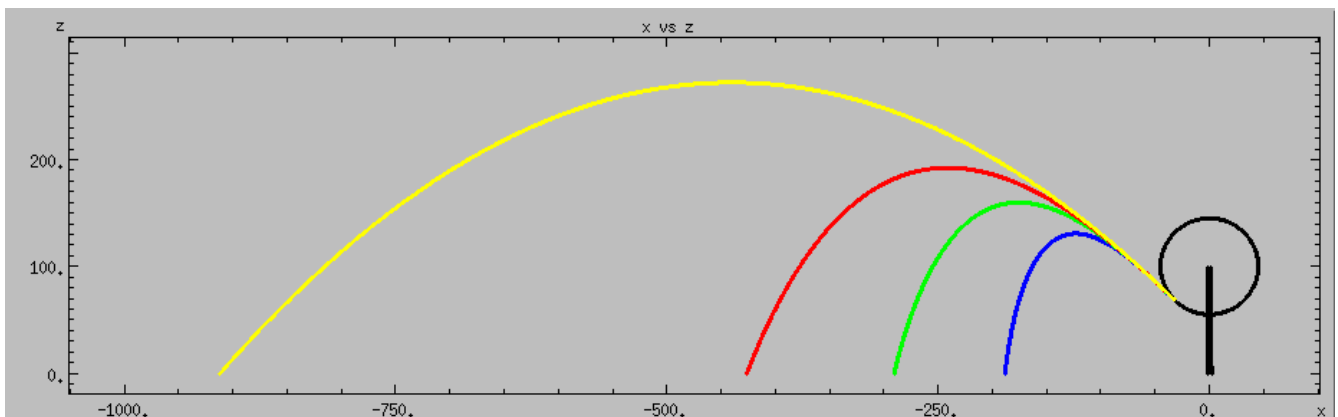
Trajektorie lotu odłamków lodu dla przykładowych brył przedstawione są na rys. 4-6.



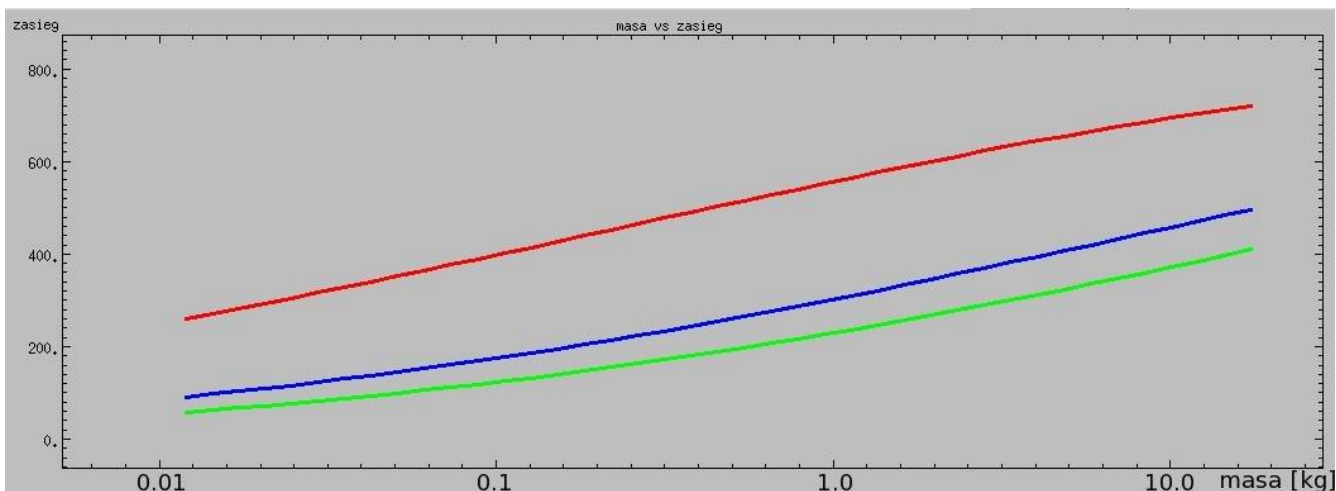
Rys. 4. Trajektorie lotu kul lodowych o masach 0.1 kg (niebieski), 1 kg (zielony) i 10 kg (czerwony). Kolorem żółtym zaznaczono teoretyczną trajektorię bez oporu powietrza.



Rys. 5. Trajektorie sopli lodowych lecących tak jak strzała. Oznaczenia jak na rys. 4.



Rys. 6. Trajektorie fragmentów sopli lodowych obracających się dookoła osi poprzecznej. Oznaczenia jak na rys. 4.



Rys. 7. Zasięg maksymalny rzutu w zależności od masy lodu. Kolor czerwony - sople lecące jak strzała, kolor niebieski – kule lodowe, zielony – sople obracające się.

Na rys. 7. przedstawiono zasięg rzutu w zależności od masy odłamka.

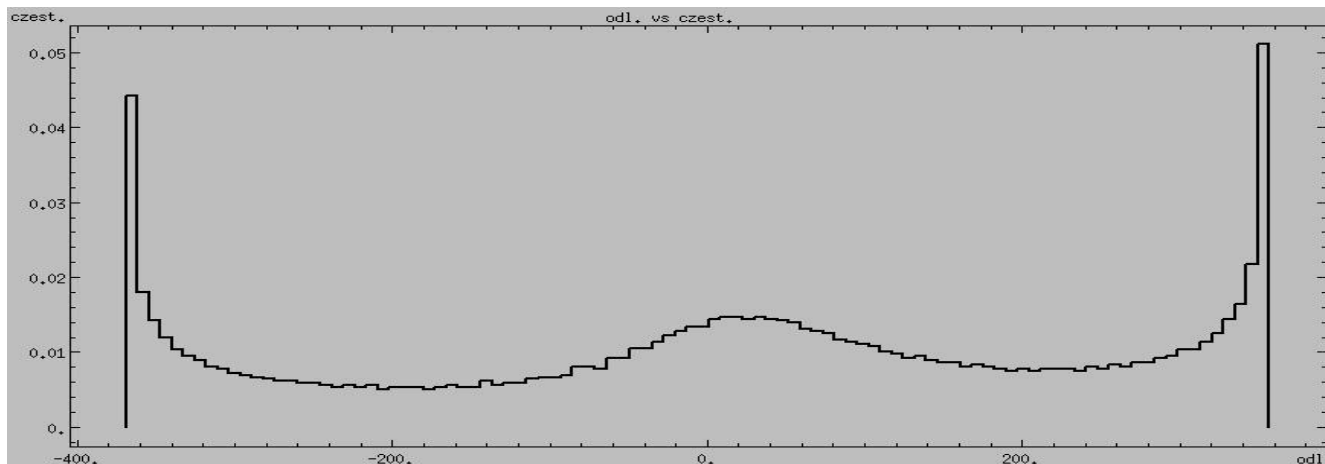
Prędkość końcowa silnie zależy od masy odłamka i skaluje się liniowo z jej logarytmem:

$$V_{\text{konc}} \sim 48 + 13 \log(m) \text{ [m/s]}.$$

Oznacza to, że jednokilogramowy odłamek spadnie na ziemię z prędkością ok. 170 km/h.

Często przytaczana jest opinia, że większość wyrzucanych odłamków spada w pobliżu turbiny.

Symulacje pokazują, że to nieprawda. Ze względu na specyfikę krzywej balistycznej znaczna część przypadkowo wystrzelianych odłamków ląduje w pobliżu zasięgu maksymalnego. Ukazuje to rys. 8, na którym przedstawiono prawdopodobieństwo upadku w zależności od odległości od turbiny.



Rys. 8. Prawdopodobieństwo upadku odłamka o masie 1kg w funkcji odległości od turbiny. Prawa część diagramu odpowiada rzutowi ponad wiatrakami (w prawo), lewa część – rzutowi w lewo.

Widać na nim, że prawdopodobieństwo upadku odłamka najpierw maleje wraz z odległością od masztu, a następnie gwałtownie rośnie w pobliżu maksymalnego zasięgu rzutu.

Z diagramu wynika, że 1/4 odłamków o danej masie poleci na odległość większą niż 85% zasięgu maksymalnego.

Środkowa część rozkładu jest z grubsza zgodna z obserwacjami prowadzonymi w sąsiedztwie turbiny, natomiast brak obserwacji odłamków na dużych odległościach wynika prawdopodobnie z faktu, że nikt ich nie szuka tak daleko!

Kawałki lodu spadające wokół turbin mają zwykle niewielkie rozmiary. Wielokrotnie jednak znajdowano fragmenty o masie ponad 1 kg i rozmiarach rzędu 1m (np. 1.8 kg, 100 cm w [17]). Zgodnie z przeprowadzonymi symulacjami oznacza to, że istnieje realne zagrożenie, że największe i najgroźniejsze odłamki mogą spaść w odległościach większych od 600-700 m.

3.2 Zagrożenie związane z awariami turbiny

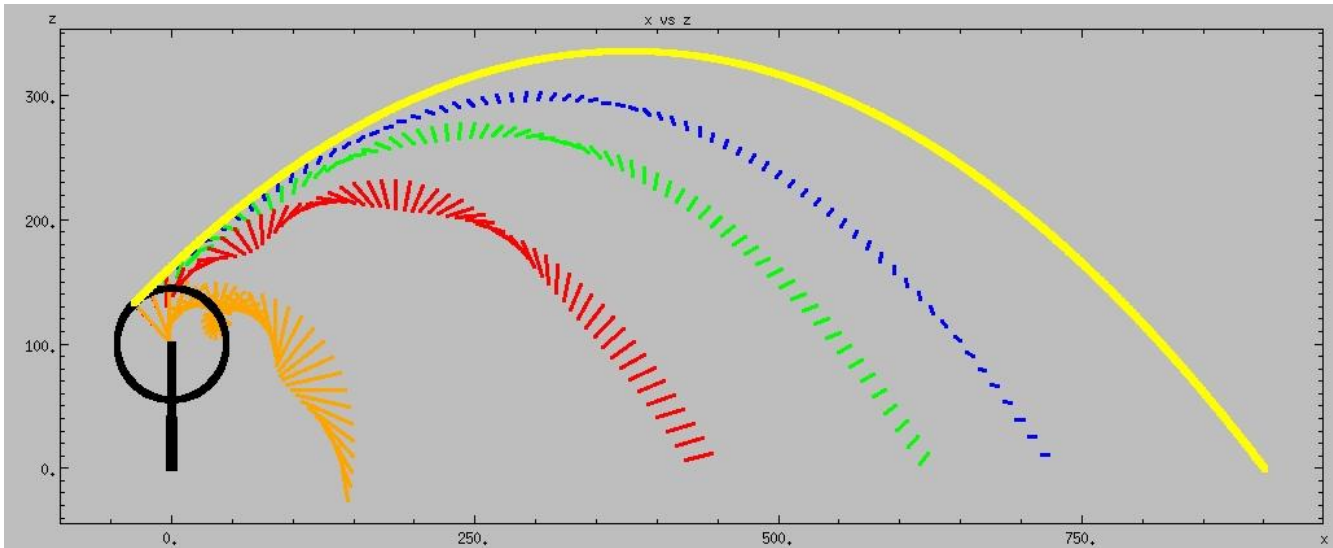
Łopaty turbin wiatrowych zbudowane są z laminatu epoksydowego lub poliestrowego na bazie włókien szklanych i węglowych. Materiał ten charakteryzuje się dużą, w stosunku do ciężaru, wytrzymałością, która jednak maleje pod wpływem powtarzalnych obciążeń [18]. Dlatego żywotność łopat jest dopasowana do projektowanego czasu eksploatacji elektrowni. Po tym okresie ich wytrzymałość może zmaleć poniżej poziomu obciążeń eksploatacyjnych, co prowadzi do złamania łopaty. Jednak według danych BZ WBK Finance & Leasing 90% inwestycji wiatrakowych kredytowanych w Polsce w latach 2009-2010 stanowiły turbiny używane [19], co może oznaczać, że wiele pracujących w Polsce urządzeń stanowi zagrożenie.

Częstość występowania awarii polegającej uszkodzeniu rotora (urwaniu się łopaty lub jej fragmentu) jest znana z literatury. Larwood [11] cytuje m.in. następujące badania: 0.02 awarii/turbinę rocznie w Holandii, 0.003 do 0.005 w Danii, 0.003 w USA, 0.012 z badań SERI, 0,015 w Niemczech z analiz WindStats. Pomimo stosunkowo nikłej statystyki i oczywistej niechęci operatorów farm wiatrowych do ujawniania takich danych przyjąć należy, że częstość awarii rotora jest rzędu 0.01. Na farmie liczącej 50 turbin można się zatem spodziewać awarii raz na kilka lat, czyli wielokrotnie w okresie jej eksploatacji. Konieczne jest zatem uwzględnienie zagrożenia związanego z awarią rotora przy planowaniu lokalizacji turbin w sąsiedztwie terenów zamieszkałych i użytkowych. Ostatnio takie zdarzenie miało miejsce na farmie wiatrowej w Korszach (rys. 9.) , gdzie urwał się 5.5-metrowy koniec łopaty i według opinii świadków zdarzenia “przeleciał pół kilometra” [12].



Rys. 9. Łopata na farmie w Korszach, z której urwała się 5.5 metrowa końcówka.

Ze względu na dostępność danych dotyczących profili aerodynamicznych w analizie tych przypadków można próbować uwzględnić siłę nośną. Procedura sprowadza się do dodatkowego całkowania siły aerodynamicznej (zależnej do kąta natarcia) po powierzchni płata. Lot urwanego fragmentu jest o tyle specyficzny, że współczynnik oporu płata w kierunku jego ruchu jest bardzo mały ($C_D \sim 0.01$ od strony krawędzi natarcia, 0.025 od strony krawędzi spływu) i pozostaje taki tak długo, jak długo wirująca łopata nie zmieni istotnie kąta natarcia. Sorensen [15] pokazał, że stosowanie współczynników oporu większych od $0.15-0.4$ do analizy ruchu urwanej łopaty jest nieuzasadnione.



Rys. 10. Trajektoria lotu urwanej łopaty: kolor niebieski - fragment o długości 5.5 m (przypadek Korsze); zielony - $\frac{1}{4}$ łopaty; czerwony – połowa łopaty; pomarańczowy – cała łopata. Kolorem żółtym oznaczo maksymalny zasięg rzutu w próżni.

Na rys. 10 przedstawione zostały możliwe trajektorie lotu urwanego fragmentu łopaty w zależności od jego długości. Elementy o masach rzędu kilkudziesięciu kilogramów i więcej mogą odlecieć na odległość niewiele mniejszą od maksymalnego zasięgu rzutu. Skrócenie zasięgu następuje dla małych fragmentów łopaty, o masie kilku-kilkunastu kilogramów lub w przypadku zmiany kąta natarcia łopaty podczas lotu.

Warto podkreślić, że upadek fragmentu bezpośrednio pod turbiną, po jego nawietrznej stronie, jest bardzo mało prawdopodobny, ponieważ w typowych warunkach zmęczeniowe oderwanie łopaty następuje przy silnym wietrze, który znosi fragment kilka- kilkanaście metrów za wiatrak.

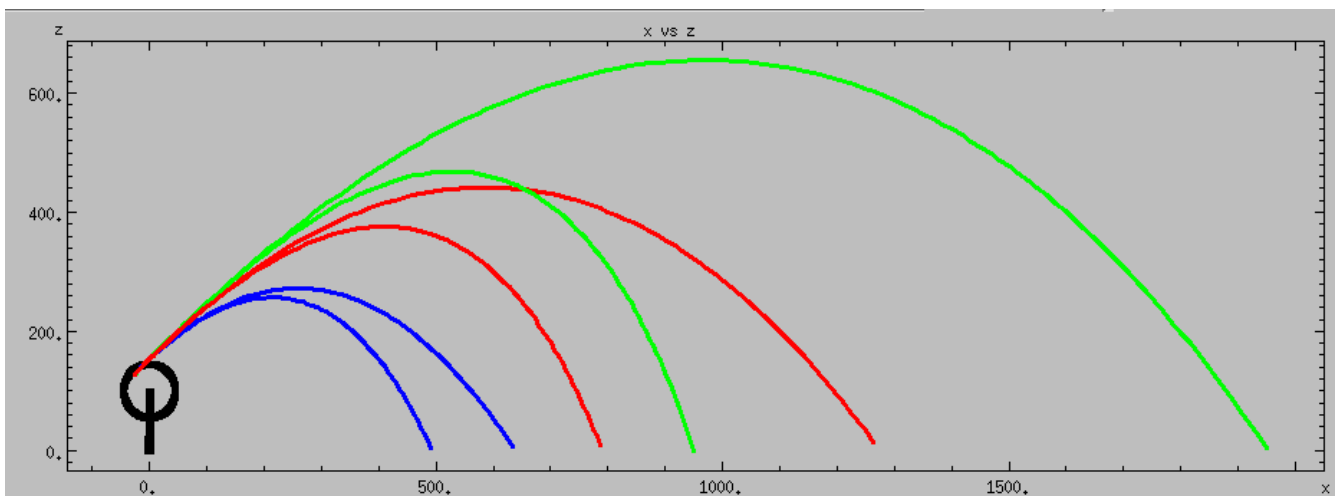
3.3 Awaria systemu hamowania i/lub sterowania

Jeszcze większe zagrożenie wiąże się z możliwością uszkodzenia systemów zatrzymywania turbiny. Najbardziej spektakularny przykład takiego zdarzenia to rozpad turbiny w Hornslet w Danii w dniu 23 lutego 2008, gdzie urządzenie Nordtank NKT 600-180/43 o mocy 600 kW i średnicy 43 m utraciło system hamowania, rozpedziło się znacznie powyżej maksymalnej dopuszczalnej prędkości i rozpadło się, ścinając przy tym stalowy maszt o wysokości 44.5m. Fragmenty łopat zostały odrzucone na odległość 300-500 m.

Turbiny, ze względu na konieczność optymalizacji kosztów i wydajności, projektowane są z niewielkim współczynnikiem bezpieczeństwa wynoszącym typowo 1.5 [11]. Dla łopaty i wirnika współczynnik ten jest rzędu 1.2. Oznacza to, że nawet przy niewielkim przekroczeniu maksymalnych obrotów konstrukcja wirnika zbliża się do granicy wytrzymałości. Dlatego krytycznym elementem w konstrukcji turbin są mechanizmy obracania łopat, które w przypadku zbyt silnego wiatru (zwykle powyżej 25 m/s) powinny ustawić łopaty w "chorągiewkę". Jeśli wskutek awarii urządzenia nie będzie to możliwe – turbina zacznie obracać się z prędkością większą od dopuszczalnej i może ulec rozpadowi. Zdarzenia takie obserwowano wielokrotnie – najczęściej podczas gwałtownych burz i nawałnic.

Obracające się łopaty poddane są ogromnym siłom zginającym i rozciągającym. Dość powiedzieć, że przy nominalnych obrotach 19 obr/min w turbinie G90 przeciążenie na końcu łopaty jest 18-krotnie większe od ciężenia ziemskiego (18 g). Przy zwiększeniu obrotów o 50% przeciążenia te (jak również siły zginające) rosą ponad dwukrotnie, co przy wspomnianym niewielkim współczynniku bezpieczeństwa musi prowadzić do złamania/oderwania łopaty bezpośrednio lub wskutek uderzenia o maszt.

W tej sytuacji prędkość początkowa rzutu fragmentami łopaty będzie znacznie większa niż podczas normalnej pracy. Ilustruje to rys. 11 na którym pokazano zasięg rzutu fragmentem $\frac{1}{4}$ łopaty przy nominalnej prędkości obrotowej, prędkości 1.5 raza większej oraz 2 razy większej. Jak widać, zasięg rzutu zwiększa się wraz ze wzrostem obrotów turbiny i wyrzucone elementy zagrażają terenom znajdującym się w odległości 1.5-2 km od masztu. Szczegóły tych trajektorii bardzo silnie zależą od kształtu urwanego fragmentu i warunków początkowych zagadnienia. Jeśli fragment łopaty zacznie wirować wokół osi podłużnej to średni współczynnik oporu silnie wzrośnie, i odległość rzutu zmaleje. Wyniki odpowiednich symulacji również przedstawiono na rysunku.



Rys. 11. Zasięg rzutu fragmentem łopaty ($\frac{1}{4}$) w przypadku nominalnej prędkości obrotowej (niebieski), prędkości 1.5x większej (czerwony), 2x większej (zielony). Odległości dalsze otrzymano przy założeniu, że łopata nie zmienia kąta natarcia; odległości bliższe przy założeniu, że łopata wiruje wokół długiej osi.

3.4 Pożary



Rys. 12. Pożar turbiny wiatrowej [9].

Jedną z częstszych awarii turbin wiatrowych są pożary, czasami powstające w wyniku oddziaływania wylądowań atmosferycznych podczas gwałtownych burz. W tym przypadku poważne zagrożenie stanowią płonące elementy gondoli i łopat, które z wiatrem przenoszone są na duże odległości i mogą stanowić źródło pożarów wtórnych. Na płonące fragmenty działa siła wyporu związana z obecnością rozgrzanego powietrza wokół elementów, która zmniejsza ciężar efektywny i powoduje, że czas spadku na ziemię oraz droga przebyta z wiatrem znacznie się wydłużają. Nie sposób dokładnie obliczyć jak duża jest zagrożona strefa, ale patrząc na rys. 9. można przyjąć, że dla niektórych płonących fragmentów kąt spadania na ziemię jest nie większy niż 5-10 stopni, co oznacza, że mogą one polecieć na odległość rzędu 10-krotnej wysokości wieży.

4. Podsumowanie

Modelowanie numeryczne rzutu lodem oraz fragmentami urwanej łopaty z turbiny wiatrowej o dużej mocy prowadzi do wniosku, że podczas normalnej eksploatacji bezpośrednie zagrożenie uderzeniem odłamekami istnieje w odległości niewiele mniejszej od teoretycznego zasięgu rzutu maksymalnego, a w przypadku awarii systemów hamowania także nawet w odległości dwukrotnie większej. Również fragmenty płonącej gondoli mogą przenosić się z silnym wiatrem na znaczne odległości.

Przyjmując najgorsze możliwe scenariusze wydarzeń przyjąć należy, że strefa zagrożenia ze strony wiatraka powinna być określona przez maksymalny zasięg rzutu ukośnego z prędkością początkową odpowiadającą zastosowanemu przy budowie śmigła współczynnikowi bezpieczeństwa (1.2-1.5), czyli przynajmniej dwukrotnie większą od prędkości nominalnej. Dla typowej turbiny o mocy 2-3 MW oznacza to strefę zagrożenia o promieniu 1.5-2 km, czyli 15 razy większym od wysokości masztu.

5. Bibliografia

- [1] Pismo Powiatowego Nadzoru Budowlanego dotyczące wydarzenia w Korszach.
- [2] Bengt Tammelin, Massimo Cavaliere, Hannele Holtinnen, Colin Morgan, Henry Seifert, Kristiina Sääntti; Wind Energy in Cold Climate, Final Report WECO (JOR3-CT95-0014), ISBN 951-679-518-6, Finnish Meteorological Institute, Helsinki, Finland, February 2000.
- [3] <http://www.iberdrolarenewables.us/bluecreek/docs/primary/03-Appendices/Q-Brochure-of-G-90-Turbine/Brochure-G-90-Turbine.pdf>
- [4] <http://www.ceoe.udel.edu/windpower/resources/2009-dic-G90-ingles-01.pdf>
- [5] http://g9x.gamesacorp.com/down/cat_eng.pdf
- [6] http://www.vestas.com/Files/Filer/EN/Brochures/Vestas_V_90-3MW-11-2009-EN.pdf
- [7] <http://www.gamesacorp.com/recursos/doc/accionistas-inversores/gobierno-corporativo/junta-general-accionistas/orden-del-dia-2011-ingles/informe-de-sostenibilidad-2011-eng.pdf>
- [8] http://www.vestas-iwt.it/Files/Filer/PL/Brochures/V80_PL.pdf
- [9] http://i.telegraph.co.uk/multimedia/archive/02079/turbine-new_2079144i.jpg
- [10] Henry Seifert, Annette Westerhellweg, Jürgen Kröning, RISK ANALYSIS OF ICE THROW FROM WIND TURBINES,
- [11] Scott Larwood, Permitting Setbacks for Wind Turbines in California and the Blade Throw Hazard
- [12] Gazeta Olsztyńska z 31.10.2012
- [13] Eggers A.J., Holley, W.E. Et al. (2001) Exploratory Study of HAWT Blade Throw Risk to Nearby People and Property 2001 ASME Wind Energy Symposium; January 8- 11, 2001; Reno, Nevada. AIAA and ASME; pp. 355-367.
- [14] Slegers Nathan et al.n Modeling the Risk of a Failed Wind Turbine Blade Impacting a Power Transmission Line , WIND ENGINEERING VOLUME 33, N O . 6, 2009
- [15] Sørensen, J. N. 1984 "On the Calculation of Trajectories for Blades Detached from Horizontal Axis Wind Turbines." Wind Engineering 8(3): pp. 160-175.
- [16] <http://www.aerospaceweb.org/question/aerodynamics/q0231.shtml>
- [17] Cattin, R., Kunz, S., Heimo, A., Russi G., Russi, M., Tiefgraber M., Wind Turbine Ice Throw Studies in the Swiss Alps.
- [18] <http://wind-power.pl/aktualnosci/wiatraki-czekaja-na-ustawe/>
- [19] Gretchen B. Murri, Jeffery R. Schaffb, FATIGUE LIFE METHODOLOGY FOR TAPERED HYBRID COMPOSITE FLEXBEAMS