

Phd Eng. Tomasz Łusiak

Department of Thermodynamics, Fluid Mechanics
and Aviation Propulsion Systems
Lublin University of Technology
Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, POLAND
E-mail: t.lusiak@pollub.pl

Analiza eksperymentalna oraz numeryczna eksploatacji śmigłowców w aglomeracjach miejskich oraz w akcjach ratowniczych

The experimental and numerical analysis of helicopter performance in urban areas and in SAR operations

Keywords: numerical modeling, helicopter, aerodynamic interference, maintenance in town

Abstract: The paper discusses the methods of experimental and numerical analysis of helicopter performance in urban areas and search and rescue operations. The phenomenon of aerodynamic interference between the helicopter and the object located in its immediate vicinity was examined. The main focus was on the impact of interference on helicopter loading, airflow around the helicopter and helicopter properties in these specific cases. The paper provides a set of research results using the FLUENT software on the dynamic response to the disturbed simulation model of the helicopter rotor including the deformation of helicopter blades as well as the results of laboratory research on physical helicopter models.

Słowa kluczowe: modelowanie numeryczne, śmigłowiec, interferencja aerodynamiczna, użytkowanie w mieście

Streszczenie: Praca przedstawia sposoby analizy eksperymentalnej oraz numerycznej użytkowania śmigłowca w aglomeracjach miejskich oraz akcjach ratowniczych. Rozpatrzono zjawisko interferencji aerodynamicznej pomiędzy śmigłowcem a obiektem znajdującym się w jego bezpośredniej bliskości. Analizie poddano wpływ zjawiska interferencji na obciążenia, opływ i własności śmigłowca w szczególnych przypadkach jego użytkowania. Przedstawiono wyniki obliczeń wykorzystujących program FLUENT, odpowiedzi dynamicznych na zaburzenia symulacyjnego modelu wirnika śmigłowca uwzględniającego deformacje łopat oraz rezultaty laboratoryjnych badań eksperymentalnych na modelach fizycznych śmigłowca.

1. Wprowadzenie

Charakterystyczną cechą śmigłowców jest możliwość wykonywania najważniejszych manewrów statku powietrznego: startów, lądowań, wznoszenia i opadania w kierunku pionowym z zerową prędkością lotu. Stąd śmigłowce bywają wykorzystywane często do specjalnych zadań lotnych, takich jak ratownictwo wysokościowe, akcje wojskowe, ratownictwo górskie i inne akcje lotnicze

wykonywane w aglomeracjach miejskich o wysokiej zabudowie. Przypadki tego typu występują w ratownictwie wysokościowym wokół budynków wielokondygnacyjnych, heliportów, a także w ratownictwie wysokogórskim i medycznym (Tatrzański Ochotnicze Pogotowie Ratunkowe - TOPR, Lotnicze Pogotowie Ratunkowe – LPR). Podobne sytuacje występują podczas prac dźwigowych, w misjach wojskowych podczas prowadzenia akcji w miastach oraz w lotach śmigłowców pracowników mediów oraz policyjnych monitorujących życie miast. Użytkowanie śmigłowców w terenie zurbanizowanym powoduje pojawienie się zjawiska interferencji aerodynamicznej opływu śmigłowca – obiekt [6], [7], [8]. Zjawisko to w trakcie lotu wymaga wyjątkowej uwagi pilota, szczególnie w warunkach turbulencji, wywołanej przez opływ budynków wiatrem oraz podczas występowania zjawiska konwekcji w wyniku kontrastów temperatury obiektów i terenu – w tym w wyniku lokalnych stref pożaru [10], [11]. Jednym z najniebezpieczniejszych przypadków interferencji śmigłowca - obiekt jest interferencja pojawiająca się podczas prowadzenia akcji specjalnych po stronie zawietrznej obiektu.

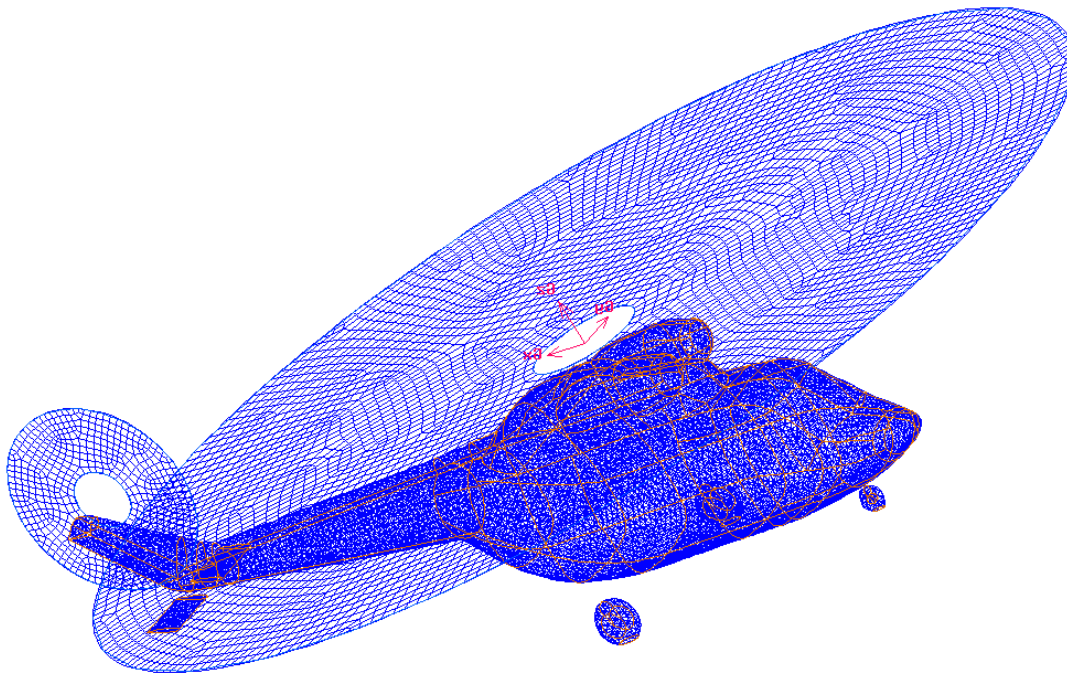
Badania z tego zakresu prowadzone są intensywnie w przodujących światowych ośrodkach śmigłowcowych, czemu sprzyja szybki wzrost mocy obliczeniowej komputerów, wykorzystywanie oprogramowań wizualizujących złożone pola zakłóceń opływu śmigłowca, a także rozwój metod obliczeniowych. Równolegle prowadzone są badania eksperymentalne w tunelach aerodynamicznych i w locie, weryfikujące badania teoretyczne. Ze względu na szybkie tempo rozwoju tej tematyki, najnowsze osiągnięcia w tej dziedzinie można śledzić jedynie w publikacjach zawartych w materiałach konferencyjnych – głównie Forum American Helicopter Society (np.[1], [2], [3]) lub European Rotorcraft Forum. Pozycje książkowe, a także publikacje w znaczących czasopiśmie, jakkolwiek zawierające podstawowe informacje metodyczne, stanowią materiał informacyjny znacznie opóźniony w stosunku do szybko rozwijanych aplikacji, o których wzmianki można uzyskać w wyżej wymienionych materiałach konferencyjnych.

2. Analiza numeryczna przypadków eksploatacji śmigłowców w aglomeracjach miejskich

Obliczenia numeryczne prowadzono dla założonego rozkładu ciśnień na wirniku nośnym oraz wyznaczono, posługując się oprogramowaniem FLUENT, opływ śmigłowca z uwzględnieniem obiektów w jego bliskim otoczeniu [4]. Wyznaczane pole prędkości przepływu przez płaszczyznę wirnika nośnego posłużyło do wyznaczania charakterystyk głównych parametrów obciążeń (program OBCWN opracowano w Instytucie Lotnictwa i zmodyfikowano odpowiednio do potrzeb analizy zjawiska interferencji aerodynamicznej). Wprowadzając nowy przepływ strumienia przez tarczę wirnika określano parametry obciążeń wirnika i nowy rozkład ciśnień na jego powierzchni. Nowy rozkład ciśnień wprowadzano, dla korekcji, do ponownego obliczania opływu śmigłowca oprogramowaniem FLUENT. Prowadzono proces iteracji aż do uzyskania zbieżności wynikowych wartości. W celu przyśpieszenia procesu zbieżności wczytywano do następnej iteracji pole prędkości przepływu będące średnią arytmetyczną pola z poprzedniej iteracji i z bieżących obliczeń. Dla łopaty o dużej elastyczności taki zabieg był konieczny ze względu na znaczną wrażliwość łopaty na zaburzenie i odpowiedź w postaci funkcji skręcenia łopaty. Przy takim zabiegu uzyskiwano zadowalającą zbieżność już w drugim kroku obliczeń.

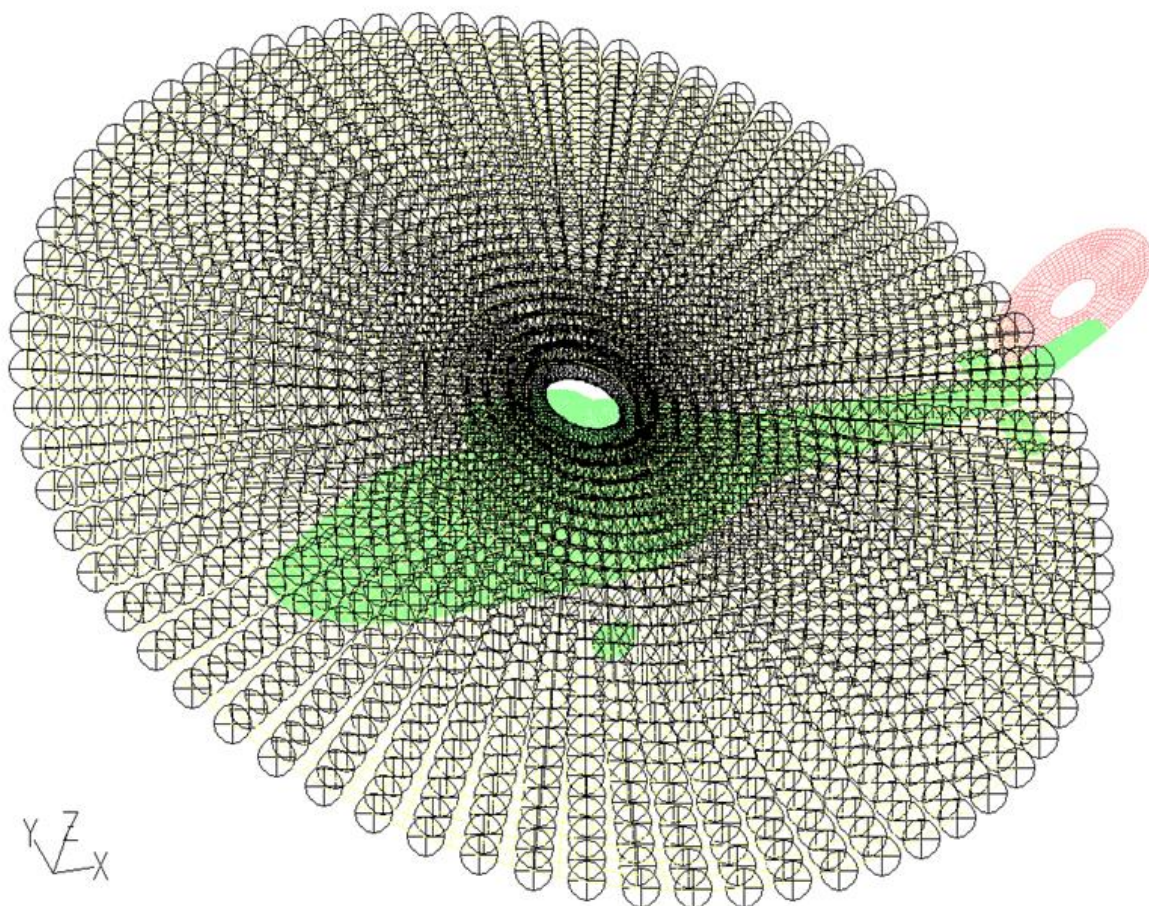
Rysunek 1 przedstawia model śmigłowca bazujący na geometrii rzeczywistej śmigłowca W3-A SOKÓŁ. Geometria bazuje na elementach trójkątnych oraz

czworobocznych, a wielkości podziałów zadawano na krawędziach powierzchni lub przyjmowano stałą długość krawędzi elementów.



Rys. 1. Schemat struktury siatki śmigłowca (niestrukturalna – elementy trójkątne na kadłubie (dł. krawędzi 0,05m), elementy czworoboczne na wirniku głównym oraz śmigle ogonowym(dł. krawędzi 0,2m))

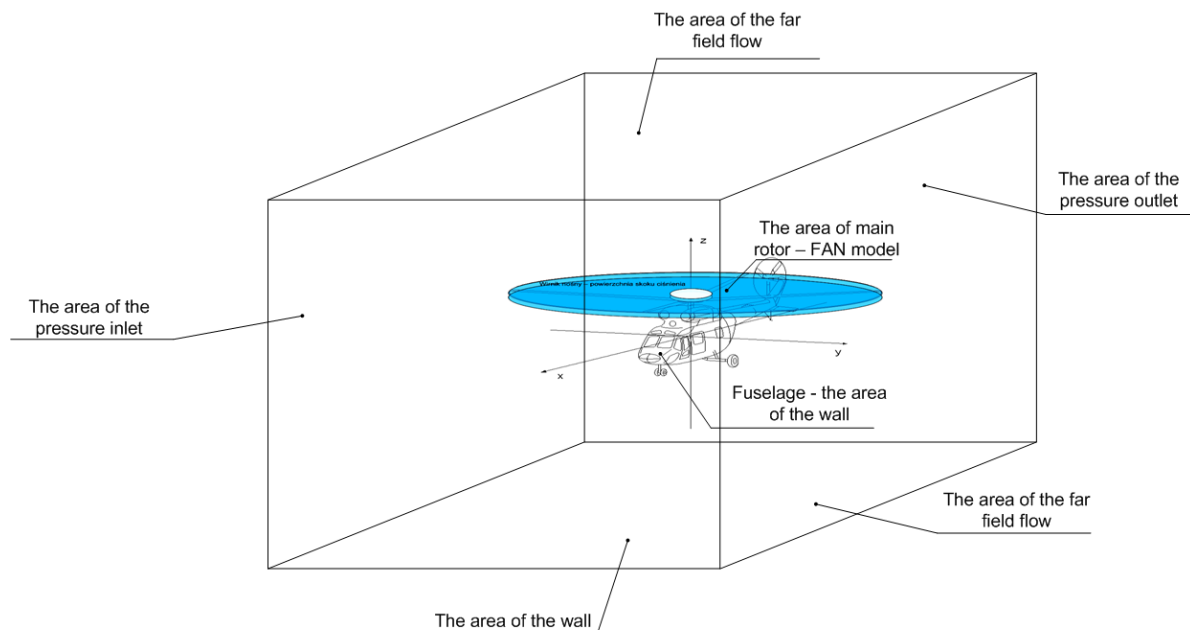
Rysunek 2 przedstawia rozkład punktów kontrolnych wygenerowanych za pomocą pliku wejściowego do programu FLUENT. Plik „Journal” jest spisem komend, które należałoby wprowadzić ręcznie przy użyciu środowiska graficznego. Plik wejściowy przyspiesza się i automatyzuje tworzenie punktów pomiarowych.



Rys. 2. Schemat rozmieszczenia punktów kontrolnych na wirniku nośnym

Wartości składowej pionowej prędkości odczytane w punktach pomiarowych zapisywano w formie tabeli, która następnie została wykorzystana w programie do obliczeń wytrzymałościowych, jako źródło informacji o prędkości indukowanej na wirniku nośnym.

Ponadto do obliczeń przyjęto następujące założenia: obliczenia dla przepływu niestacjonarnego, symulację przeprowadzono dla swobodnego ruchu śmigłowca oraz zamodelowano za pomocą stacjonarnej siatki (*static mesh*), obliczenia przeprowadzono dla płynu lepkiego i ściśliwego, zastosowano model turbulencji $k-\epsilon$ [5], [9]. Rozkłady parametrów na modelu wirnika nośnego zdefiniowano za pomocą odpowiednio przygotowanych profili prędkości (rys. 3).

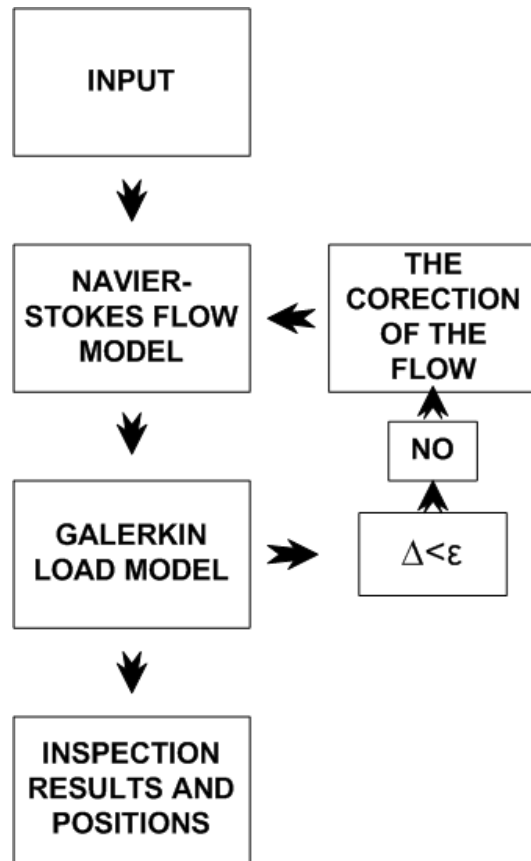


Rys. 3. Geometryczne założenia przyjętego modelu obliczeniowego oraz struktura rozważanego pola przepływu

Wynikiem obliczeń wytrzymałościowych była tabela zmian rozkładu ciśnienia na wirniku nośnym. Rozkład ten stanowił źródło do tworzenia rzeczywistego warunku początkowego dla modelu skoku ciśnienia na wirniku. Wprowadzano go za pomocą pliku profilu zgodnego z wcześniej określonym rozmieszczeniem punktów pomiarowych.

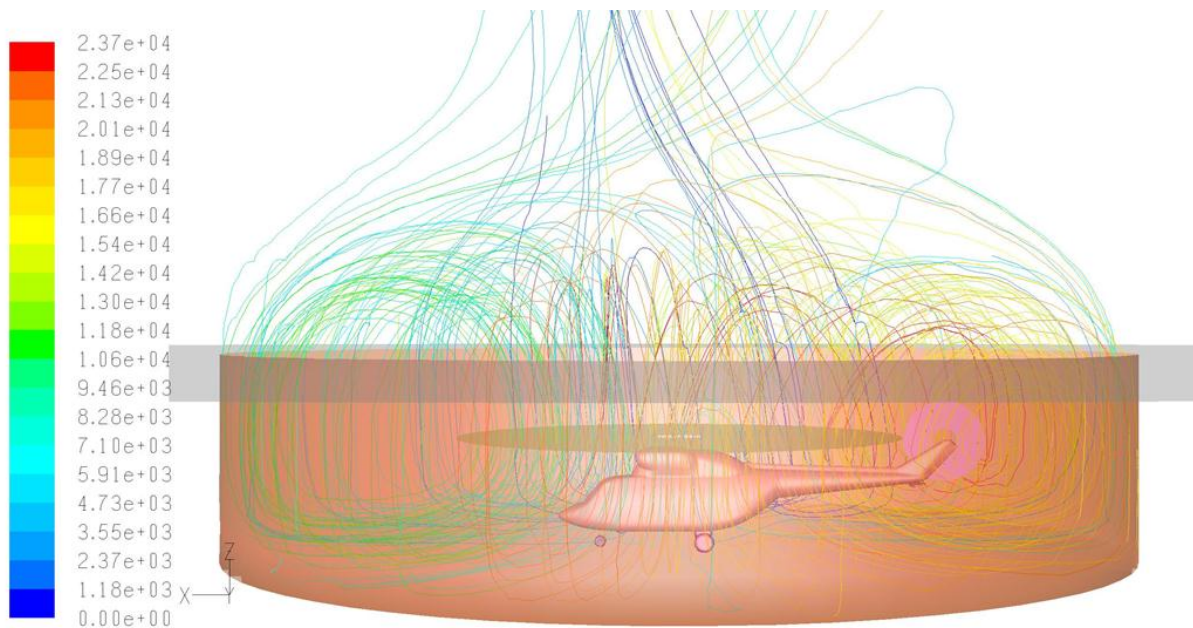
2.1. Wyniki badań numerycznych

Rozpatrzono jeden ze sposobów analizy numerycznej interferencji aerodynamicznej pomiędzy śmigłowcem a obiektem znajdującym się w jego bezpośredniej bliskości. Poddano analizie wpływ zjawiska interferencji aerodynamicznej na obciążenia, opływ i własności śmigłowca w szczególnych przypadkach jego użytkowania. Przedstawiono wyniki obliczeń wykorzystujących program FLUENT, odpowiedzi dynamicznych na zaburzenia symulacyjnego modelu wirnika śmigłowca uwzględniającego deformacje łopat oraz rezultaty laboratoryjnych badań eksperymentalnych na modelach fizycznych śmigłowca. Powyższy sposób analizy zjawiska przedstawia rys. 4, który obrazuje metodę analizy zjawiska interferencji aerodynamicznej jaka powstaje podczas użytkowania śmigłowców w terenie zabudowanym lub akcjach ratowniczych.

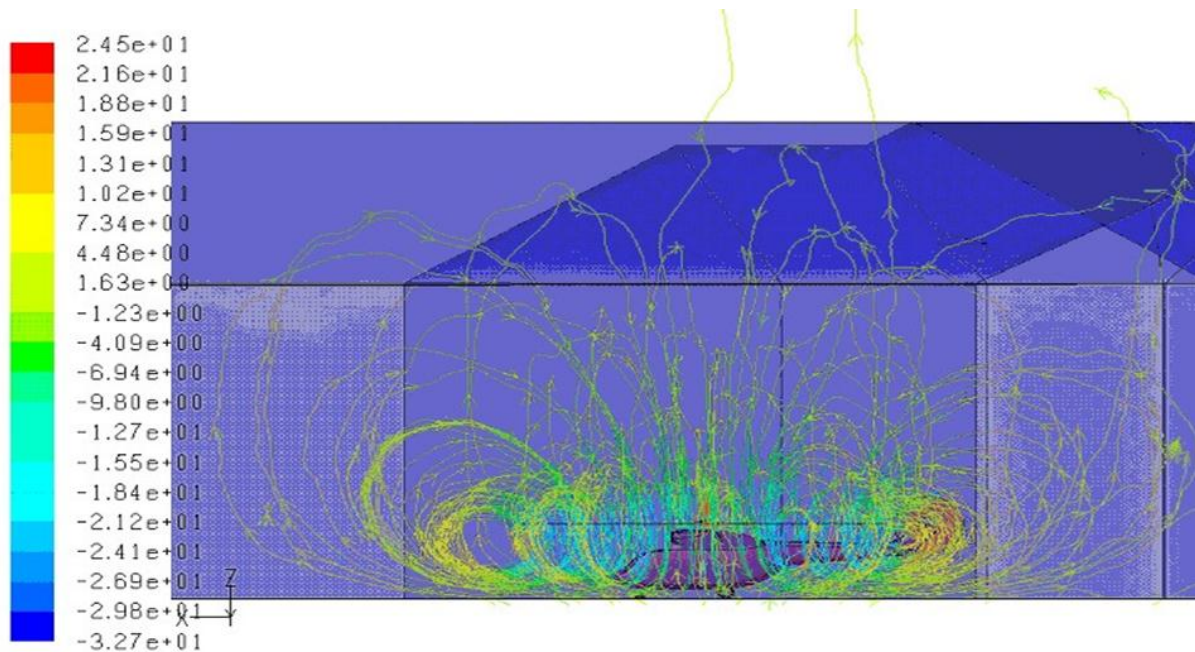


Rys. 4. Schemat blokowy jednej z metod rozwiązywania interferencji aerodynamicznej

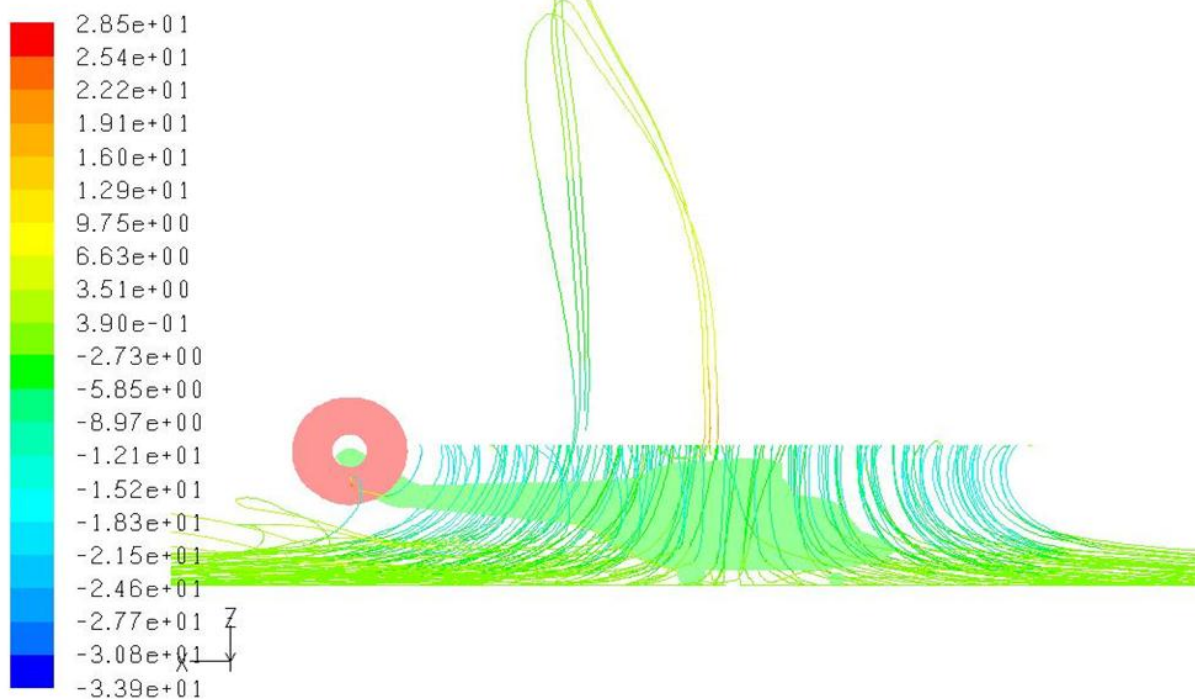
W oparciu o wspomnianą metodę przeprowadzono analizę użytkownika śmigłowca w trakcie wykonywania manewru zawisu dla przypadków przedstawionych na rys. 5 - 7.



Rys. 5. Rozkład linii prądu podczas manewru zawisu śmigłowca w obiekcie „studnia”



Rys. 6. Rozkład linii prądu podczas manewru zawisu śmigłowca w obiekcie „zamek królewski w Warszawie”



Rys. 7. Rozkład linii prądu podczas manewru zawisu śmigłowca bez obiektów bliskich

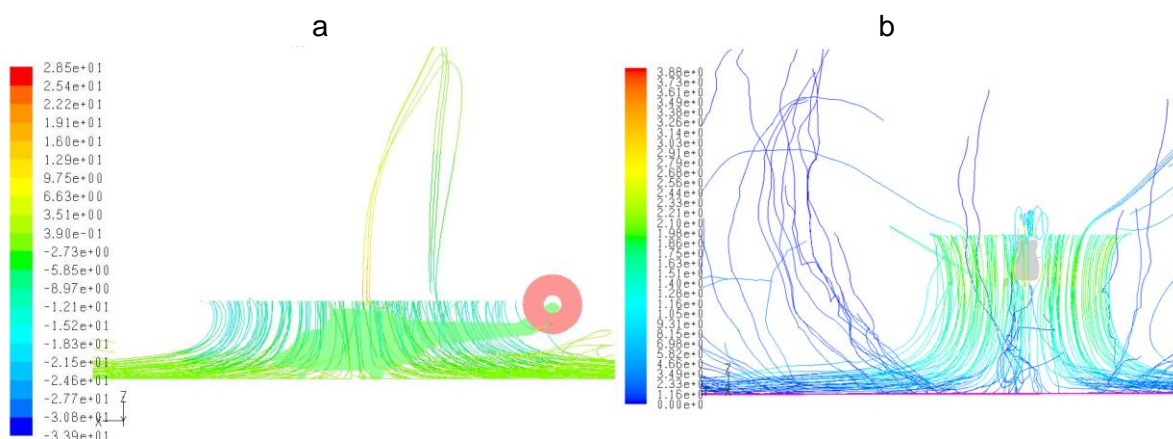
Dla przypadków przedstawionych na rys. 5÷7 uzyskano szereg charakterystyk oraz wartości liczbowych. Najbardziej wiarygodnymi parametrami potwierdzającymi występowanie zjawiska interferencji są wielkości mocy niezbędnej do wykonania danego zadania lotnego oraz współczynnika momentu, które to wartości zamieszczono w tab. 2.1.

Tab. 2.1. Wartości ciągu oraz mocy dla niskiego zawisu

PRZYPADEK	CIĄG - N	MOC - kW	Cz	Cmz
RYS. A	61000	913.26	0.1632	0.01163
RYS. B	61000	810.48	0.1632	0.0103
RYS. C	61000	619.51	0.1632	0.0079

Wartości przedstawione w tab. 2.1 potwierdzają wzrost zapotrzebowania na moc jaką należy dostarczyć do wirnika nośnego w celu wykonania manewru zawisu w otoczeniu obiektu „studnia” względem innych analizowanych przypadków.

Przeprowadzono także analizę interferencji wirnik – kadłub z uwzględnieniem wpływu bliskości ziemi (rys. 8). Wykonano obliczenia opływu modelem Naviera i Stokesa dla trzech przypadków zawisu śmigłowca W3 – SOKÓŁ (rys. 9): 1- zawis z podwoziem (kołami) bardzo blisko podłoża, 2- zawis na wysokości podwozia 16m nad powierzchnią ziemi i 3- zawis na wysokości 32m nad powierzchnią ziemi.

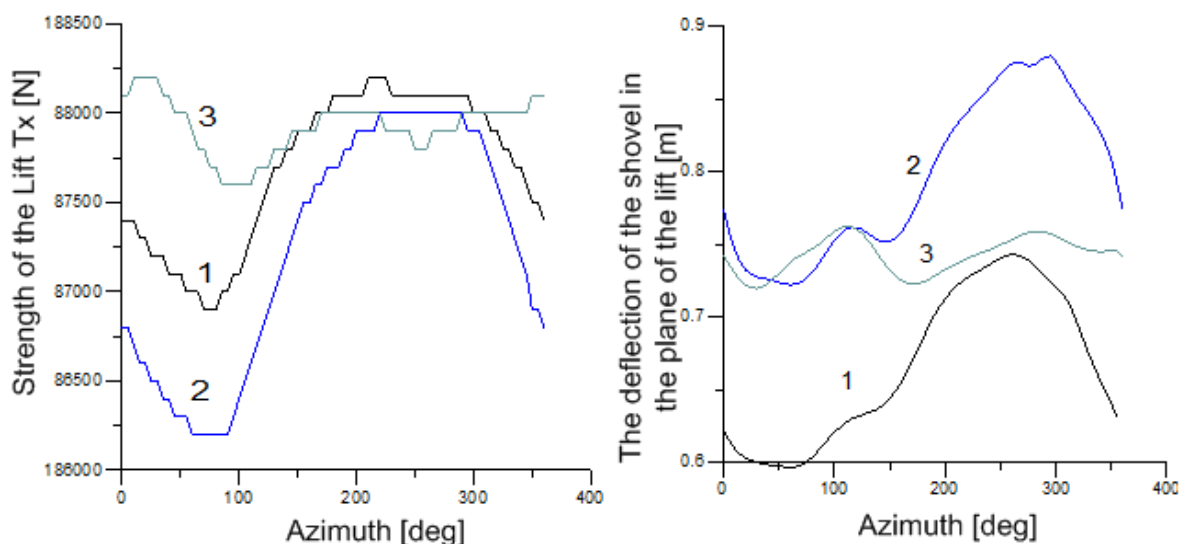


Rys. 8. Wykres linii prądu: a –zawis, podwozie na styku z powierzchnią podłoża, b – zawis, podwozie na wysokości h=16m

Do obliczeń obciążeń łopat i do analizy zjawiska interferencji wykorzystano program OBCWN obliczający obciążenia wirnika nośnego śmigłowca z możliwością podczytywania dowolnego pola prędkości zakłóceń, w tym pole prędkości zaburzone kadłubem znajdującym się w bliskości podłoża. Wyniki analiz zilustrowano na rys. 9.

a

b



Rys. 9. Wpływ kadłuba oraz podłoża na: a - składową poziomą ciągu Tx, b - ugięcie łopaty

Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono wpływ bliskości ziemi na wypadkowe parametry charakteryzujące wirnik nośny śmigłowca. Zauważono istotny wpływ obecności podłoża wywołującego asymetrię obciążeń i dynamiki ruchu łopat nawet w takim stanie lotu, jakim jest zawis. W idealnym zawisie, dla izolowanego wirnika, nie zauważa się istotnych zmian parametrów jego pracy.

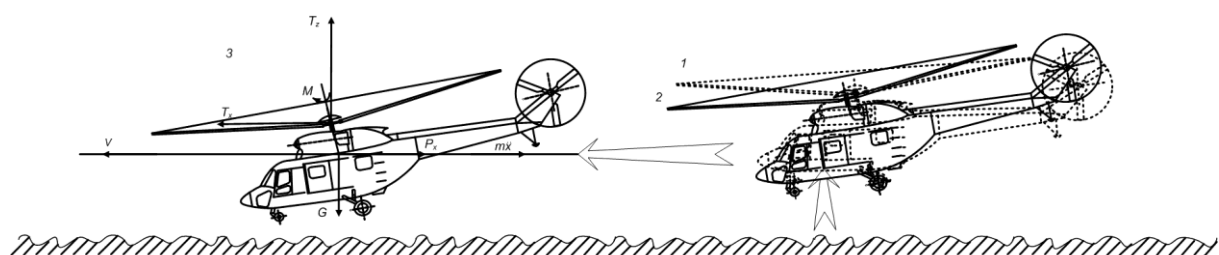
3. Analiza eksperymentalna przypadków eksploatacji śmigłowców w aglomeracjach miejskich

W celu przeprowadzenia weryfikacji niektórych wyników symulacji komputerowej zjawiska interferencji, które powstaje podczas eksploatacji śmigłowca w terenie zurbanizowanym, przeprowadzono badania eksperymentalne odpowiadające analizowanym numerycznie przypadkom (rys. 10).



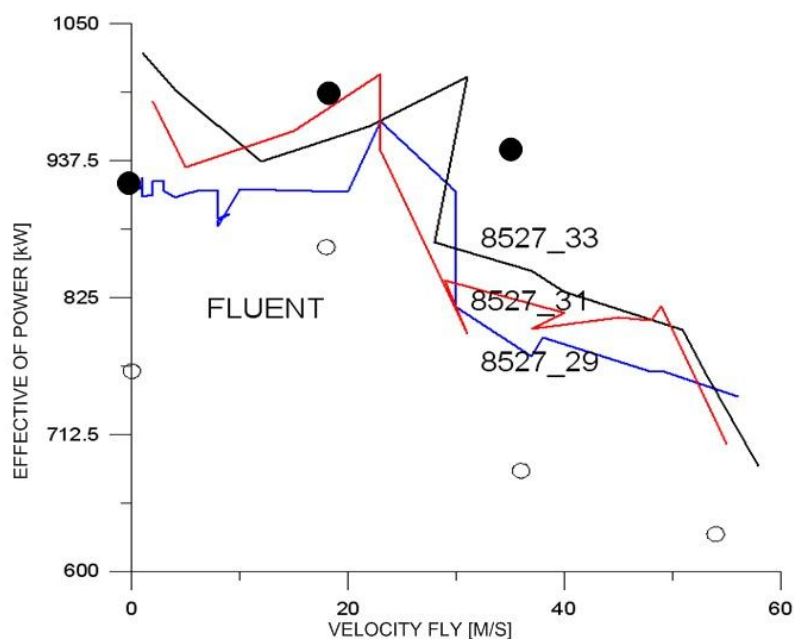
Rys. 10. Struktura strumienia zawirnikowego podczas badań eksperymentalnych na obiekcie rzeczywistym śmigłowca W3-A SOKÓŁ

Podczas wykonywania manewru niskiego zawisu śmigłowca w pobliżu ziemi przy zbyt małym nadmiarze mocy silnika rozpędzanie śmigłowca jest możliwe. Odbić się to może przez wykorzystanie energii kinetycznej inercyjnego układu wirnika nośnego dla pokonania obszaru, w którym moc niezbędna jest większa niż rozporządzalna moc napędu. Skutkiem tego jest spadek prędkości obrotowej wirnika nośnego. Warunkiem granicznym dopuszczalnego stopnia wykorzystania energii kinetycznej wirnika jest nie przekraczalność dopuszczalnej wartości prędkości obrotowej ze względu na możliwość oderwania strug na łopatach. Możliwość zmniejszenia minimalnego nadmiaru mocy do startu przy zastosowaniu takiej techniki startu, znacznie powiększa zakres użytkowania śmigłowca, a mianowicie przyrost udźwigu i pułapu startu z zadaniem ciężarem całkowitym. Na rys. 11 przedstawiono schematyczny rozkład sił działających na śmigłowca w czasie manewru niskiego rozpędzania śmigłowca z zawisu.



Rys. 11. Schematyczny rozkład sił działających na śmigłowca podczas rozpędzania z pochyleniem

Na rys. 12 przedstawiono analizę porównawczą zjawiska ETL (Effective Translation Lift) (chwilowego wzrostu zapotrzebowania mocy niezbędnej podczas rozpędzania w locie nisko nad ziemią) uzyskaną na drodze analizy numerycznej i porównano z wynikami uzyskanymi z badań eksperymentalnych przeprowadzonych na obiekcie rzeczywistym W3-A SOKÓŁ [11].



Rys. 12. Zmiana mocy niezbędnej ze wzrostem prędkości lotu. Linie ciągłe – kolejne próby przelotu z oznaczeniem numeru próby; oznaczenie wyników z obliczeń programem FLUENT: „o” – śmigłowiec bez pochylenia, „•” - śmigłowiec z pochyleniem (dodanie mocy na przyspieszanie oraz „ucieczka” poduszki powietrznej ze wzrostem pochylenia i prędkości lotu)

Analiza interferencji strumienia indukowanego wirnikiem z poziomym napływem strumienia i zastosowana metoda wyznaczenia wpływu zjawiska chwilowego zapotrzebowania mocy (ETL) na obciążenia śmigłowca umożliwia określenie wypadkowych obciążeń oraz mocy niezbędnej przy wykonaniu manewru rozpędzania. Analiza ta może być przydatna przy opracowaniu specjalnych technik startu śmigłowców w granicznych warunkach użytkowania.

4. Wnioski

Wnioski wynikające z badań zjawiska interferencji mogą być przydatne w procesie użytkowania śmigłowców w otoczeniu obiektów budowlanych na heliportach, szczególnie w odniesieniu do oceny niebezpiecznych stref ze względu na występowanie intensywnej interferencji aerodynamicznej. Dotyczy to również użytkowania śmigłowców morskich bazujących na helideck'ach (pokładach okrętów i lądowiskach platform wiertniczych). Przydatność takiej wiedzy również dotyczy projektantów lądowisk położonych na dachach wysokich budynków miejskich. Badania przeprowadzono ze względu na pojawienie się problemów użytkowania podczas pracy, ze strony użytkowników takich jak PSP (Państwowa straż Pożarna) oraz LPR Lotnicze Pogotowie Ratunkowe) w związku z prowadzonymi przez te

instytucje akcji ratunkowych w miastach i z budową lądowisk wyniesionych dla śmigłowców sanitarnych.

Na podstawie przeprowadzonych badań numerycznych i eksperymentalnych zjawiska interferencji aerodynamicznej opływu śmigłowca, nasuwa się wniosek o możliwości przestrzegania przez pilota i użytkowników przed sytuacjami stwarzającymi zagrożenie bliskością przeszkód oraz ustalenia minimalnych obszarów separacji, gdzie zjawisko interferencji śmigłowca – obiekt może zagrażać wykonaniu zadania lotnego.

5. Literatura

1. Dietz M, Kneisch T, Roth G, D'Alascio A, Schimke D. EC145 T2: Comprehensive and Challenging Industrial CFD Applications. Proceedings of the 68th AHS Annual Forum. Texas, May 2012.
2. Haycock B, Grant P. Off-Axis Dynamics and Simulator Fidelity, Proceedings of the 68th AHS Annual Forum, Fort Worth, Texas, May 2012.
3. He Ch, Zhao J. High Fidelity Simulation of Tiltrotor Aerodynamic Interference. Proceedings of the 68th AHS Annual Forum, Texas, May 2012.
4. Introductory Fluent Notes. Introduction to CFD Analysis. Introductory FLUENT Training, ANSYS.INC, 2006.
5. Katz J, Plotkin A. Low-speed aerodynamics. From Wing Theory to Panel Method. International Edition, 1991.
6. Łusiak T, Dziubiński A, Szumański K. Interference between helicopter and its surroundings, experimental and numerical analysis. TASK QURTAERLY 2008; 13(4): 379 – 392.
7. Łusiak T. Szczególne przypadki interferencji aerodynamicznej opływu śmigłowca. Przegląd Mechaniczny; Maj 2007; 86-88.
8. Łusiak T, Dziubiński A, Specific case of interference between a helicopter and surrounding: hover flight over a well-shaped object. Transactions of the Institute of Aviation 2007; 191: 43-50.
9. Piechna J, Szumowski A. Numerical Simulation of the Vortex Airfoil Interaction in Transonic Flow, Second Seminar on RDPAE 1996: 29-34.
10. Szabelski K, Łucjanek W, Jancelewicz B. Wstęp do konstrukcji śmigłowców. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 2002.
11. Wyd. Wew. ILot Nr GR/0032/BP/2009, Projekt badawczo-rozwojowy Nr R 00 033 02 pt.: Określenie granicznych warunków użytkowania śmigłowców w systemie operacji z wysokich budynków.