

Marcin Kowalski, Mateusz Sztangret

Komputerowa analiza wpływu zmian geometrii nadwozia pojazdu na współczynnik oporu aerodynamicznego

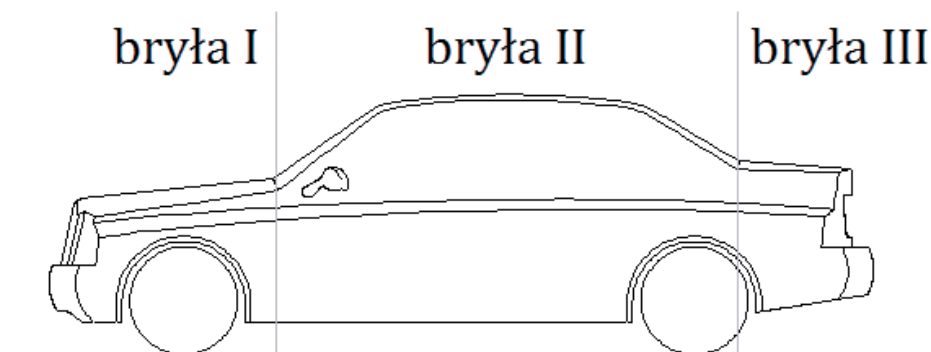
Wprowadzenie

Na samochód jadący z pewną prędkością działają siły oporu. Jedną z nich jest siła oporu stawiana przez powietrze. Zależy ona od geometrii karoserii. Dobre własności aerodynamiczne w oczywisty sposób przekładają się na dynamikę jazdy i zużycie paliwa. Wpływają również na maksymalne, bezpieczne prędkości, z jakimi samochód może pokonywać zakręty. Tylko nieliczni kierowcy zdają sobie sprawę z tego, że aerodynamika ma wpływ na widoczność w deszczowy dzień, chłodzenie silnika, cyrkulację powietrza w kabinie, poziom hałasu odczuwany przez kierowcę, pasażerów i przechodniów. Poznanie wpływu poszczególnych parametrów geometrycznych na zmianę oporów przepływu powietrza na karoserii samochodu osobowego stanowi podstawę przedstawionych badań.

Różnorodność modeli samochodów osobowych może przyprawić o zawrót głowy. Nawet najbardziej wybredny kierowca będzie w stanie wybrać auto o parametrach i stylistyce najbardziej mu odpowiadających. Z punktu widzenia geometrii nadwozia można jednak wyodrębnić trzy grupy pojazdów: o nadwoziu trójbryłowym (rys. 1), o nadwoziu dwubryłowym i o nadwoziu jednobryłowym. Każde z powyższych rozwiązań konstrukcyjnych posiada wady i zalety, zarówno jeśli chodzi o aerodynamikę, jak i funkcjonalności. Już od początków przemysłu motoryzacyjnego konstruktorzy stają przed wyzwaniem stworzenia pojazdu o geometrii, która będzie się charakteryzować dużą funkcjonalnością, atrakcyjną stylistyką oraz dobrymi własnościami aerodynamicznymi. Mimo zmieniających się trendów inżynierom udało się wyodrębnić trzy podstawowe formy nadwozia, wymienione powyżej, które reprezentują odmienną funkcjonalność akceptowaną przez ich właścicieli.

W pracy podjęto analizę przepływu powietrza wokół nadwozia trójbryłowego, które z praktycznego punktu widzenia wydaje się rozwiązaniem najbardziej racjonalnym. Bryła druga, która ma największy udział objętościowy, tworzy przestrzenie wnętrza. Pierwsza bryła mieści silnik, a trzecia przestrzeń bagażową. Geometria tych obszarów umożliwiła uzyskanie dobrej widoczności ze środka pojazdu z pozycji kierowcy. Takie rozwiązanie konstrukcyjne przysparza wiele problemów

inżynierom zajmującym się aerodynamiką. Z punktu widzenia użyteczności taki układ nadwozia wydaje się najbardziej uniwersalny, a przez to dosyć atrakcyjny dla użytkowników. Geometria ta jest jednak skomplikowana, a obraz przepływu wokół niej dużo bardziej złożony [1–4].



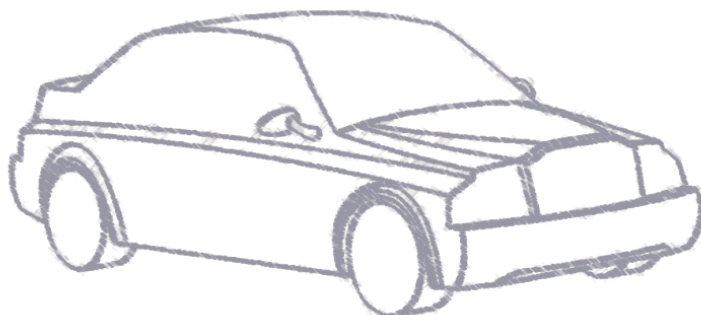
Rys. 1. Rozwiązanie konstrukcyjne nadwozia trójbryłowego

Model do badań aerodynamicznych

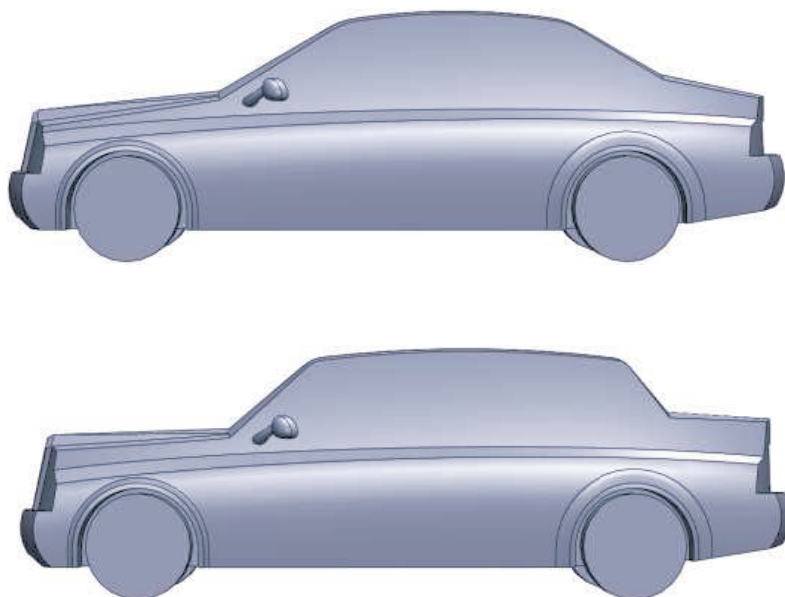
Podjęta tematyka wymaga stworzenia koncepcyjnego modelu 3D, będącego uśrednieniem geometrycznym współczesnych samochodów osobowych o nadwoziu trójbryłowym. Zachowanie odpowiednich proporcji pomiędzy poszczególnymi bryłami nadwozia jest niezwykle istotne, ponieważ opływ powietrza wokół nich jest silnie ze sobą sprzężony. By móc uogólnić wyniki i wcielić w życie nowe rozwiązania konstrukcyjne, należy zaprojektować nadwozie będące przedstawicielem aut należących do jednej klasy pojazdów. Modele aut takich marek, jak Audi, BMW, Honda czy Volkswagen, należące do tej samej klasy, choć różne stylistycznie, charakteryzują się dosyć spójną proporcjonalnością poszczególnych brył. Niski, agresywnie nachylony przód, stanowiący około 30% długości auta, kryje silnik pojazdu. Bryła ta przechodzi dosyć gwałtownie w dużą, przestronną kabinę, ograniczoną szybami i dachem, tworzącymi łagodną krzywiznę, która zajmuje największą część długości – ponad 50%. Wysoki tył samochodu zapewnia płynne przejście pomiędzy bryłą drugą a trzecią. Tworzy on bagażnik o dużej przestrzeni, stanowiącej około 20% długości samochodu.

Zebranie tych wszystkich informacji pozwoliło na wykonanie pierwszych szkiców (rys. 2) koncepcyjnego samochodu osobowego do badań aerodynamicznych, będącego przedstawicielem i uśrednieniem geometrii trójbryłowej aut klasy średniej. Prosta stylistyka nadwozia łączy w sobie elegancję ze sportową linią. Cel badań zakłada wyznaczenie wpływu zmian danego czynnika geometrii nadwozia na wartość współczynnika oporu powietrza. Rysunek 3 obrazuje zakres zmian geometrii pojazdu, dla jakich wykonano kompleksowe analizy opływu powietrza. Wartości kątów pochylenia, jakie będą przyjmować przednie i tylne klapy oraz szyby, określono w założeniach projektowych. Obliczenia wykonano dla 81 kombina-

cji parametrów, które opisano w dalszej części. Obliczenia wykonano w programie CosmosFloWorks [5].



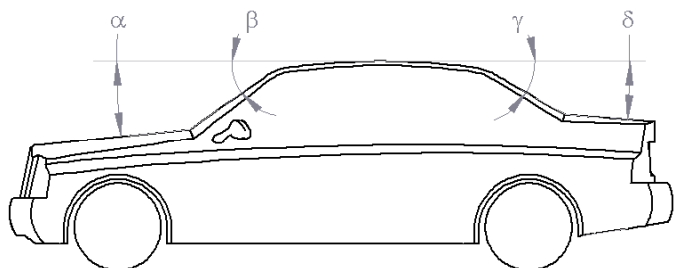
Rys. 2. Szkic koncepcyjnego samochodu



Rys. 3. Granice zmian geometrii karoserii

Badania kompleksowe

Podjęta tematyka zakłada wyznaczenie wpływu każdego z analizowanych czynników geometrii samochodu osobowego na zmianę wartości współczynnika oporu powietrza. W badaniach rozpatrywano zmiany kątów pochylenia pokrywy przedziału silnika (α), przedniej szyby (β), tylnej szyby (γ) i pokrywy bagażnika (δ). Każdy z tych parametrów przyjmował odpowiednio trzy wartości, a pomiary współczynnika oporu odbywały się dla każdej z możliwych kombinacji (rys. 4).



Rys. 4. Rozpatrywane zmiany parametrów geometrycznych w kształcie nadwozia

Model wykonano specjalnie na potrzeby badań i jest on uśrednieniem geometrii samochodów osobowych średniej klasy. Forma trójbryłowa nadwozia jest uniwersalna i obecnie najchętniej wybierana przez użytkowników. Kształt karoserii jest jednak skomplikowany, a podczas opływu powietrza występuje szereg problemów. Te kwestie zadecydowały o wyborze kierunku badań.

Znalezienie optymalnej konfiguracji geometrycznej nadwozia samochodu osobowego jest problemem bardzo złożonym. Dzieje się tak dlatego, że charakter przepływu w jednej strefie karoserii zależy silnie od tego, co dzieje się z przepływem w innym obszarze nadwozia. Takie sprzężenia wykluczają możliwość badania wpływu jednego czynnika i optymalne jego ustawienie, a następnie analizę następnego. Znalezienie takiej wartości danego parametru geometrii nadwozia, dla której minimalny będzie współczynnik oporu, nie gwarantuje, że to ustawienie będzie równie dobre przy zmianie innego parametru geometrycznego. Z tego względu konieczna jest analiza kompleksowa. W tabeli 1 zestawiono uzyskane w toku kompleksowych badań wartości współczynnika oporu powietrza dla każdej z analizowanych kombinacji geometrycznych nadwozia. W celach porządkowych odpowiednio nazwano każdą z pomiarowych konfiguracji geometrycznych.

Tab. 1. Zestawienie wartości współczynnika oporu powietrza

| Lp. | Geometria | Pochylenie [°] | | | | współczynnik oporu powietrza |
|-----|-----------|----------------------------|-----------------|--------------|-------------------|------------------------------|
| | | pokrywy przedziału silnika | przedniej szyby | tylnej szyby | pokrywy bagażnika | |
| | | (5, 7, 9) | (30, 35, 40) | (30, 40, 50) | (4, 8, 12) | |
| | | α | β | γ | δ | c_x |
| 1 | 1 | 5 | 30 | 30 | 4 | 0,351752270 |
| 2 | 2 | | | | 8 | 0,349635216 |
| 3 | 3 | | | | 12 | 0,345597605 |
| 4 | 4 | | | 40 | 4 | 0,353100343 |
| 5 | 5 | | | | 8 | 0,347543844 |
| 6 | 6 | | | | 12 | 0,345915341 |
| 7 | 7 | | | 50 | 4 | 0,355921745 |
| 8 | 8 | | | | 8 | 0,352814604 |
| 9 | 9 | | | | 12 | 0,351155633 |

| | | | | | | | | |
|----|----|---------------|----|----|----|----|-------------|-------------|
| 10 | 10 | Kappa 2.1.1 | 5 | 35 | 30 | 4 | 0,352532774 | |
| 11 | 11 | Kappa 2.1.2 | | | | 8 | 0,350549565 | |
| 12 | 12 | Kappa 2.1.3 | | | | 12 | 0,348571413 | |
| 13 | 13 | Kappa 2.2.1 | | | 40 | 4 | 0,354019613 | |
| 14 | 14 | Kappa 2.2.2 | | | | 8 | 0,349071523 | |
| 15 | 15 | Kappa 2.2.3 | | | | 12 | 0,347470587 | |
| 16 | 16 | Kappa 2.3.1 | | | 50 | 4 | 0,356878145 | |
| 17 | 17 | Kappa 2.3.2 | | | | 8 | 0,353646137 | |
| 18 | 18 | Kappa 2.3.3 | | | | 12 | 0,352507079 | |
| 19 | 19 | Kappa 3.1.1 | | 40 | 30 | 4 | 0,371424715 | |
| 20 | 20 | Kappa 3.1.2 | | | | 8 | 0,359888665 | |
| 21 | 21 | Kappa 3.1.3 | | | | 12 | 0,358538990 | |
| 22 | 22 | Kappa 3.2.1 | | | 40 | 4 | 0,373474075 | |
| 23 | 23 | Kappa 3.2.2 | | | | 8 | 0,359769274 | |
| 24 | 24 | Kappa 3.2.3 | | | | 12 | 0,353456453 | |
| 25 | 25 | Kappa 3.3.1 | | | 50 | 4 | 0,375901859 | |
| 26 | 26 | Kappa 3.3.2 | | | | 8 | 0,354878537 | |
| 27 | 27 | Kappa 3.3.3 | | | | 12 | 0,362503595 | |
| 28 | 1 | Omicron 1.1.1 | | | 7 | 30 | 4 | 0,349787257 |
| 29 | 2 | Omicron 1.1.2 | | 8 | | | 0,348477320 | |
| 30 | 3 | Omicron 1.1.3 | | 12 | | | 0,335974450 | |
| 31 | 4 | Omicron 1.2.1 | | 40 | | | 4 | 0,350474393 |
| 32 | 5 | Omicron 1.2.2 | | | | | 8 | 0,350377393 |
| 33 | 6 | Omicron 1.2.3 | | | | | 12 | 0,334048819 |
| 34 | 7 | Omicron 1.3,1 | | 50 | | 4 | 0,353730342 | |
| 35 | 8 | Omicron 1.3.2 | | | | 8 | 0,353513564 | |
| 36 | 9 | Omicron 1.3.3 | | | | 12 | 0,339017582 | |
| 37 | 10 | Omicron 2.1.1 | 35 | 30 | | 4 | 0,350609313 | |
| 38 | 11 | Omicron 2.1.2 | | | | 8 | 0,349073615 | |
| 39 | 12 | Omicron 2.1.3 | | | | 12 | 0,337239041 | |
| 40 | 13 | Omicron 2.2.1 | | 40 | | 4 | 0,352187894 | |
| 41 | 14 | Omicron 2.2.2 | | | | 8 | 0,351292362 | |
| 42 | 15 | Omicron 2.2.3 | | | | 12 | 0,335021689 | |
| 43 | 16 | Omicron 2.3.1 | | 50 | | 4 | 0,354702257 | |
| 44 | 17 | Omicron 2.3.2 | | | | 8 | 0,353330552 | |
| 45 | 18 | Omicron 23.3 | | | | 12 | 0,340039341 | |

| | | | | | | | | |
|----|----|---------------|----|----|----|-------------|-------------|-------------|
| 46 | 19 | Omicron 3.1.1 | | 40 | 30 | 4 | 0,358858303 | |
| 47 | 20 | Omicron 3.1.2 | | | | 8 | 0,357828953 | |
| 48 | 21 | Omicron 3.1.3 | | | | 12 | 0,346440410 | |
| 49 | 22 | Omicron 3.2.1 | | | 40 | 40 | 4 | 0,361296941 |
| 50 | 23 | Omicron 3.2.2 | | | | | 8 | 0,359819269 |
| 51 | 24 | Omicron 3.2.3 | | | | | 12 | 0,345456506 |
| 52 | 25 | Omicron 3.3.1 | | | 40 | 50 | 4 | 0,363676500 |
| 53 | 26 | Omicron 3.3.2 | | | | | 8 | 0,363614512 |
| 54 | 27 | Omicron 3.3.3 | | | | | 12 | 0,350344958 |
| 55 | 1 | Ypsilon 1.1.1 | 9 | 30 | 30 | 4 | 0,339149418 | |
| 56 | 2 | Ypsilon 1.1.2 | | | | 8 | 0,337459815 | |
| 57 | 3 | Ypsilon 1.1.3 | | | | 12 | 0,330425576 | |
| 58 | 4 | Ypsilon 1.2.1 | | | 40 | 40 | 4 | 0,340210538 |
| 59 | 5 | Ypsilon 1.2.2 | | | | | 8 | 0,339242555 |
| 60 | 6 | Ypsilon 1.2.3 | | | | | 12 | 0,333823262 |
| 61 | 7 | Ypsilon 1.3.1 | | | 50 | 50 | 4 | 0,343427505 |
| 62 | 8 | Ypsilon 1.3.2 | | | | | 8 | 0,342296846 |
| 63 | 9 | Ypsilon 1.3.3 | | | | | 12 | 0,336886961 |
| 64 | 10 | Ypsilon 2.1.1 | | 35 | 30 | 4 | 0,339958767 | |
| 65 | 11 | Ypsilon 2.1.2 | | | | 8 | 0,338489227 | |
| 66 | 12 | Ypsilon 2.1.3 | | | | 12 | 0,331614155 | |
| 67 | 13 | Ypsilon 2.2.1 | | | 40 | 40 | 4 | 0,342048463 |
| 68 | 14 | Ypsilon 2.2.2 | | | | | 8 | 0,341C09458 |
| 69 | 15 | Ypsilon 2.2.3 | | | | | 12 | 0,332030621 |
| 70 | 16 | Ypsilon 2.3.1 | 50 | | 50 | 4 | 0,344336436 | |
| 71 | 17 | Ypsilon 2.3.2 | | | | 8 | 0,343162065 | |
| 72 | 18 | Ypsilon 2.3.3 | | | | 12 | 0,335481972 | |
| 73 | 19 | Ypsilon 3.1.1 | 40 | 30 | 4 | 0,349694670 | | |
| 74 | 20 | Ypsilon 3.1.2 | | | 8 | 0,347822998 | | |
| 75 | 21 | Ypsilon 3.1.3 | | | 12 | 0,341339592 | | |
| 76 | 22 | Ypsilon 3.2.1 | | 40 | 40 | 4 | 0,351131193 | |
| 77 | 23 | Ypsilon 3.2.2 | | | | 8 | 0,350436370 | |
| 78 | 24 | Ypsilon 3.2.3 | | | | 12 | 0,345939088 | |
| 79 | 25 | Ypsilon 3.3.1 | | 50 | 50 | 4 | 0,353950556 | |
| 80 | 26 | Ypsilon 3.3.2 | | | | 8 | 0,352624791 | |
| 81 | 27 | Ypsilon 3.3.3 | | | | 12 | 0,348437817 | |

Jak widać, zmiany geometrii w założonych przedziałach pozwoliły na zredukowanie współczynnika oporu powietrza z 0,38 do 0,33. Dla geometrii *Ypsilon 1.1.3* o maksymalnie pochylonych pokrywach przedziału silnika i bagażnika oraz minimalnie nachylonych szyb uzyskano minimalną wartość współczynnika $c_x = 0,3304$. Model *Kappa 3.3.1*, charakteryzujący się minimalnym pochyleniem pokrywy przedziału silnika i bagażnika oraz maksymalnym nachyleniem szyb, posiadał najwyższy współczynnik $c_x = 0,3759$.

Na tej podstawie można już wnioskować, że optymalny kształt nadwozia cechować się będzie gwałtownym wzrostem przekroju geometrii bryły I i III (rys. 1), natomiast kabina pasażerska wykazywać musi łagodne nachylenie przedniej i tylnej powierzchni. Przeprowadzone pomiary pozwoliły wyznaczyć procentowy udział poszczególnych parametrów geometrii w zmianie współczynnika oporu powietrza. Wartości procentowe obliczono, odnosząc proporcjonalnie zmiany uzyskane przez jeden czynnik do globalnej zmiany współczynnika oporu jaką udało się uzyskać dla założonych parametrów. I tak, pochylenie przedziału silnika to udział blisko 46%, przedniej szyby – ok. 20%, tylnej szyby – ok. 8,5% i pokrywy bagażnika – ok. 26,5%.

Podsumowanie

Okazuje się, że największy wpływ na wartość współczynnika oporu powietrza ma pochylenie pokrywy przedziału silnika. Zmiana kąta nachylenia tego czynnika z 5 do 9° powoduje obniżenie współczynnika c_x średnio o 0.05. Istotnie wpływa na aerodynamikę również geometria pokrywy bagażnika. Im bardziej jest ona ustawiona poziomo, tym większe są opory stawiane przez powietrze. Paradoksalnie, geometria kabiny pasażerskiej ma relatywnie niski udział w sterowaniu wielkością współczynnika oporu. W tym przypadku preferowany jest kształt o łagodnym przejściu krzywizny pomiędzy powierzchnią szyby przedniej, dachu i szyby tylnej.

Uzyskane wyniki oraz wyciągnięte wnioski dają potwierdzenie, że podczas opływu ciała pożądana jest geometria kropłowata. Zapewnia ona najlepsze własności aerodynamiczne. Niestety z przyczyn funkcjonalnych nie jest możliwe stosowanie takiej geometrii w projektowaniu samochodów osobowych. Projektanci muszą jednak próbować maksymalnie zbliżyć się do takiego kształtu, zachowując przy tym własności użytkowe auta.

Literatura

- [1] Chung T., *Computational fluid dynamics*, Cambridge University Press, 2003
- [2] Gryboś R., *Podstawy mechaniki płynów*, PWN, Warszawa, 1998
- [3] Kazimierski Z., *Podstawy mechaniki płynów i metod komputerowej symulacji przepływów*, Podręczniki Akademickie, Politechnika Łódzka, Łódź 2004
- [4] Piechna J., *Podstawy aerodynamiki pojazdów*, Wyd. Komunikacji i Łączności, 2000
- [5] CosmosFloWorks documentation

Computer analysis of the influence of car body changes on the aerodynamic drag coefficient

Abstract

The paper presents the complex research of a 3D aerodynamic car model. The computer simulations were made for different geometric body configuration. During the study the computational fluid dynamics (CFD) method was used. The influence of changes of various car body elements on the aerodynamic drag coefficient was calculated.

Keywords: computational fluid dynamics, aerodynamic analysis, computer simulation

Mateusz Sztangret
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej
al. A. Mickiewicza 30
30-059 Kraków

Marcin Kowalski
Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie
Instytut Techniki
ul. Podchorążych 2
30-084 Kraków