

Marek Maciejewski<sup>1)</sup>, Tomasz Maciejewski<sup>2)</sup>

## NUMERYCZNA SYMULACJA JAZDY W CIENIU AERODYNAMICZNYM

**Streszczenie.** Praca dotyczy numerycznej symulacji interakcji aerodynamicznej pomiędzy dwoma samochodami osobowymi, z których jeden porusza się w cieniu aerodynamicznym drugiego. Symulacje były podstawą do określenia zależności współczynnika oporu aerodynamicznego obu pojazdów od profilu nadwozia (hatchback, notchback i squareback) i odstępów pomiędzy pojazdami.

**Słowa kluczowe:** aerodynamika samochodów, interakcja aerodynamiczna, numeryczna symulacja.

### WPROWADZENIE

Prognozowanie zachowania się samochodu na drodze i opisanie tego za pośrednictwem parametrów charakteryzujących własności dynamiczne i stateczność ruchu, jest jednym z najistotniejszych zadań przy projektowaniu samochodów. Głównym czynnikiem, który warunkuje prawidłowe określenie wymienionych parametrów jest poprawna i wiarygodna identyfikacja wszystkich pojazdowych oddziaływań dynamicznych, w tym również aerodynamicznych. Opływ powietrza wokół nadwozia przejawia się występowaniem chwilowych rozkładów prędkości i ciśnienia, które decydują o wielkości wynikowych sił aerodynamicznych. Siły te wyznaczają opory ruchu oraz docisk pojazdu do jezdni, a wraz z innymi oddziaływaniami dynamicznymi stanowią o zachowaniu się pojazdu na jezdni. W tej sytuacji uzyskanie wystarczająco dokładnych informacji o oddziaływaniach aerodynamicznych jest kluczowe dla poprawnego ustalenia parametrów ruchowych pojazdów.

W standardowych badaniach aerodynamicznych rozważa się pojedyncze (wyizolowane) samochody. Typowa rzeczywistość drogowa charakteryzuje się jednak dużymi i ciągle rosnącymi natężeniami i gęstościami ruchu. W takiej sytuacji trudno jest odnosić się do aerodynamiki pojedynczego samochodu, natomiast właściwe i konieczne jest uwzględnienie aerodynamicznej interakcji z innymi pojazdami znajdującymi się w bliskim sąsiedztwie rozważanego samochodu. Interakcja aerodynamiczna wynika z następujących form wzajemnego ruchu pojazdów:

---

<sup>1)</sup> Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, Politechnika Poznańska, e-mail: marek.maciejewski@put.poznan.pl

<sup>2)</sup> j.w., e-mail: tomasz.maciejewski@cs.put.poznan.pl

- pojazdy poruszają się po tym samym pasie ruchu,
- pojazdy poruszają się w tym samym kierunku po sąsiadujących pasach ruchu,
- pojazdy poruszają się w przeciwnych kierunkach po sąsiadujących pasach ruchu.

W każdej z wymienionych sytuacji mamy do czynienia z pewnymi swoistymi formami interakcji aerodynamicznych, które będą rzutować na postać zjawisk aerodynamicznych kształtujących się wokół rozważanych pojazdów. Wymienione powyżej formy wzajemnego ruchu pojazdów zostały uszeregowane według typowych czasów ich trwania, od najdłuższych do najkrótszych. W sytuacji, gdy zjawisko jazdy pojazdu za pojazdem staje się nagminne, uzasadnione staje się rozważenie konsekwencji aerodynamicznych takiego stanu rzeczy.

Niniejsza publikacja jest poświęcona rozważeniu wzajemnej interakcji pojazdów poruszających się po tym samym pasie ruchu (jeden w cieniu aerodynamicznym drugiego), ze szczególnym uwzględnieniem konsekwencji dla wielkości oporu aerodynamicznego obu samochodów. Sądząc po liczbie publikacji, rozważanie tego rodzaju zagadnień nie jest jeszcze zbyt popularne – badania skupiają się przede wszystkim na zjawiskach aerodynamicznych wiążących się z bardzo małymi odstępami pomiędzy pojazdami, co jest konsekwencją prac nad niefizycznym sprzężeniem poruszających się pojazdów w „konwoje drogowe” (*platooning*) [3, 4, 5], prowadzonych w kontekście minimalizacji zużycia energii i przy wykorzystaniu nowoczesnych rozwiązań z zakresu telematiki transportu. Natomiast prace dotyczące aerodynamiki układu pojazdów w typowym ruchu drogowym należą do rzadkości [1, 2].

## O METODZIE OBLICZENIOWEJ

Numeryczna symulacja zjawisk przepływowych została przeprowadzona w oparciu o równania Naviera-Stokesa dla ośrodka nieściśliwego i metodę sztucznej ściśliwości polegającą na wprowadzeniu do równania ciągłości dodatkowego członu zawierającego pochodną ciśnienia po czasie, czyli wprowadzeniu sztucznej ściśliwości, co zapewnia wystarczające sprzężenie równania ciągłości z równaniami pędu. Cechą charakterystyczną zastosowanej wersji metody była rezygnacja z osiągnięcia limitów ściśliwości (w procedurze podwójnego całkowania względem czasu) charakterystycznych dla przepływu nieściśliwego, na rzecz wielkości typowych dla przyjętych warunków przepływu powietrza.

Rozwiązanie dla przyjętych form obszaru przepływu i warunków brzegowych zostało zrealizowane z zastosowaniem aproksymacji przestrzennej zdefiniowanej zgodnie z wymaganiami metody objętości skończonych. W metodzie tej poszukiwanie rozwiązania dla całego rozpatrywanego obszaru jest przeprowadzane oddzielnie w poszczególnych komórkach siatki obliczeniowej, przy czym w każdej z komórek wszystkie zmienne przyjmują stałe, uśrednione wartości, a ich zmiana wynika wy-

łącznie z warunków równowagi na ściankach komórek, tj. z równowagi strumieni wyznaczonej z wykorzystaniem rozwiązania problemu Riemanna dla zrekonstruowanych zmiennych prostych. Przy rozwiązywaniu powyższego problemu wykorzystano schemat numeryczny typu *upwind* nawiązujący do znaków lokalnych wartości własnych. Wyznaczenie strumieni (konwekcyjnych i lepkich) poprzez ścianki dyskretyzacji stworzyło podstawę do przeprowadzenia całkowania po czasie i obliczenia wartości zmiennych w poszczególnych komórkach. Przy całkowaniu korzystano z jawnej metody Rungego-Kutty czwartego rzędu, a długość kroku czasowego była dobierana automatycznie.

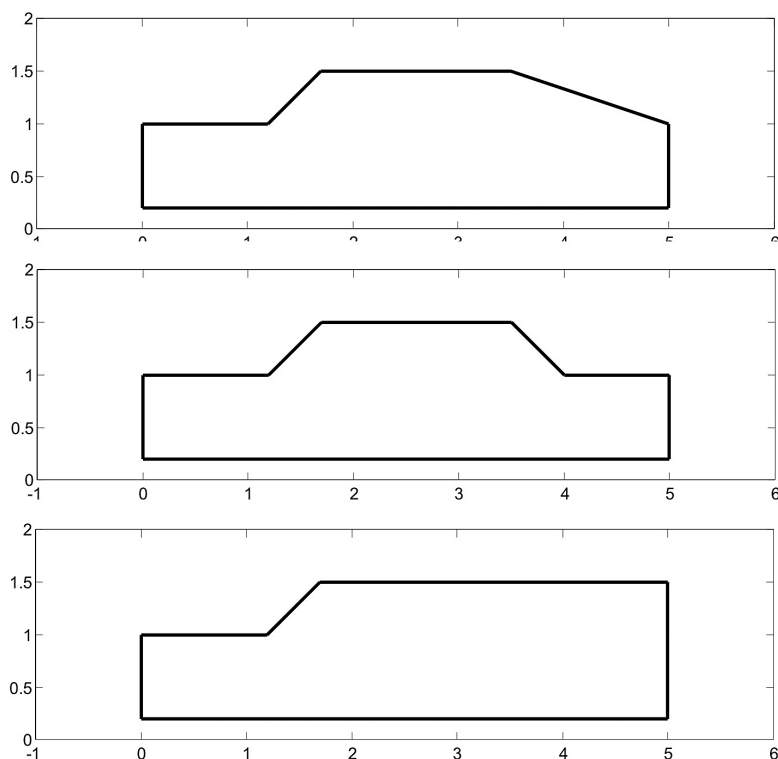
Z uwagi na istotny wpływ gęstości i formy siatki obliczeniowej na dokładność uzyskiwanych rezultatów, a zarazem niemożność przewidzenia z góry właściwej początkowej aranżacji siatki, dla zapewnienia odpowiedniej dokładności analiz symulacyjnych użyto programu obliczeniowego w wersji adaptacyjnej. Program w pierwszej kolejności przeprowadzał stosowne, standardowe obliczenia na siatce wyjściowej. Następnie wyznaczał podobszary siatki, gdzie rozwiązanie nie było wystarczająco dokładne, i stosownie zagęszczał dyskretyzację w tych miejscach. Program adaptacyjny zawierał, w odróżnieniu od standardowego, dwa nowe elementy: procedurę estymacji błędu rozwiązania w poszczególnych komórkach oraz procedurę uszlachetniania siatki obliczeniowej polegającą na zmianie gęstości siatki w wyniku sukcesywnej bisekcji najdłuższych krawędzi wybranych komórek dyskretyzacji.

## ZAKRES BADAŃ

Niniejsze badania symulacyjne dotyczą sytuacji gdy pojazdy poruszają się po tym samym pasie ruchu, jeden za drugim. W badaniach rozważano jedynie układy złożone z dwóch samochodów osobowych o różnej konfiguracji geometrycznej profili i różnych odstępach między nimi, typowych dla rzeczywistego ruchu pojazdów. Rozważono trzy konfiguracje profilu samochodów: *hatchback*, *notchback* i *squareback*, charakteryzujące się jednakową długością (5 metrów) i wysokością (1,5 metra) nadwozia, które przedstawiono na rysunku 1. Profile te zostały przyjęte w bardzo „surowej” formie, tj. bez jakichkolwiek zaokrągleń linii nadwozia. Dla samego przebiegu symulacji aerodynamicznych nie miało to żadnego znaczenia, a konsekwencją było większe zróżnicowanie wyników i generalnie wyższe wielkości oporu aerodynamicznego. W rozważaniach przyjęto, że odstęp między obu pojazdami (od tyłu pierwszego do przodu drugiego) kształtuje się w zakresie od 5 do 30 metrów, co 5 metrów.

Przy symulacjach starano się odwzorować warunki typowego ruchu drogowego, a nie warunki panujące w rzeczywistych tunelach aerodynamicznych. W tym celu przyjęto wystarczająco dużą „otwartą” przestrzeń obliczeniową otaczającą oba

pojazdy i odpowiednio dostosowane do tej sytuacji warunki brzegowe. Zewnętrzne wymiary tej przestrzeni, stanowiącej „wirtualny tunel aerodynamiczny”, były jednakowe bez względu na rozważaną konfigurację pojazdów. To, oraz przyjęcie warunków brzegowych w formie, która zapewniała uniknięcie najważniejszych źródeł błędów badań tunelowych (efekty skali, blokowania przepływu i warstw przy powierzchniowych), pozwoliło na zapewnienie symulacji warunków umożliwiających uzyskiwanie wiarygodnych rezultatów. Dla potrzeb symulacji przyjęto stałą prędkość jazdy (faktycznie, prędkość nawiewu) wynoszącą 20 m/s (72 km/h), co wobec nieistotności zależności współczynnika oporu aerodynamicznego od prędkości ruchu [6], nie miało zauważalnego wpływu na wyniki. Warunki fizyczne (gęstość i lepkość) ośrodka zostały określone zgodnie z typowymi wielkościami charakterystycznymi dla powietrza.

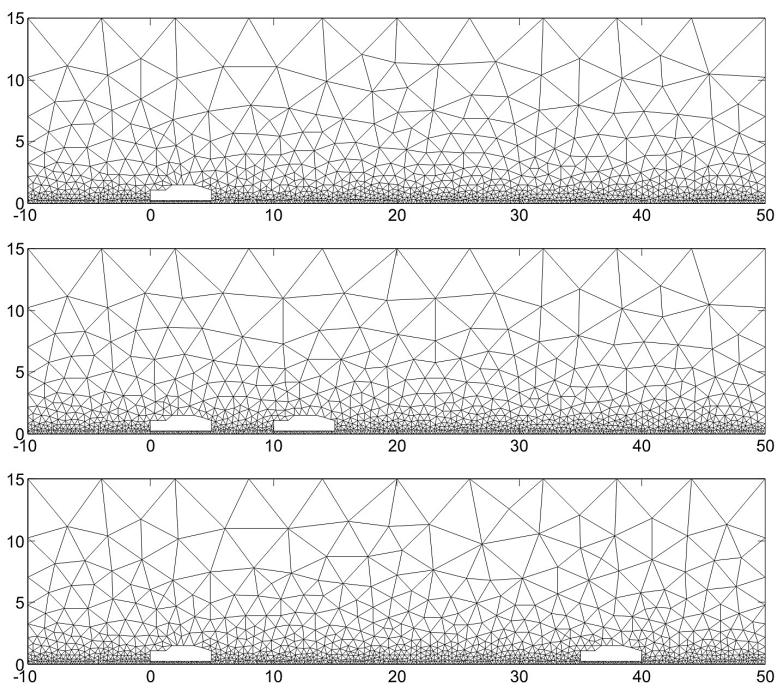


**Rys. 1.** Profile pojazdów: *hatchback*, *notchback* i *squareback* (wymiały w metrach)

Odtworzeniowe symulacje przepływów wokół obiektów fizycznych wymagają prowadzenia analizy w przestrzeni trójwymiarowej. W niniejszych badaniach postąpiono jednak inaczej, tj. ograniczono się wyłącznie do symulacji dwuwymiarowych. Uzasadnienie tego ma dwojaki charakter. Przede wszystkim w badaniach chodziło o

zdefiniowanie względnych relacji w kształtowaniu się profilowych oporów ruchu w rozważanych konfiguracjach, a nie o precyzyjne określenie ich poziomu. Po prostu, błąd popełniany z tego tytułu w przypadku rozważanych jednolitych konfiguracji obliczeniowych charakteryzuje się bardzo zbliżoną wielkością. Ma to swoją analogię w badaniach tunelowych, gdzie wprowadzie poziom wyników uzyskiwanych w różnych tunelach może się istotnie różnić, niemniej odpowiedzi aerodynamiczne na zmiany geometrii pojazdów mają zbliżony charakter. Ponadto, samochód jest w zasadzie obiektem charakteryzującym się prawie stałym przekrojem w płaszczyznach równoległych do kierunku ruchu i prostopadłych do jezdni, a uzyskiwane wielkości oporu wyraźnie nawiązują do profilu pojazdu. Pozytywnym efektem symulacji profilowych (dwuwymiarowych) była też mniejsza pracochłonność tworzenia modeli i generacji siatek obliczeniowych, krótszy czas obliczeń, a także większa jednoznaczność wyników.

Kreacja wyidealizowanych modeli samochodów i umieszczenie ich w geometrycznie zdefiniowanych zewnętrznych granicach rozważanego obszaru przepływu, określiło konfiguracje obszarów obliczeniowych symulacji. Zewnętrzne wymiary tych obszarów były jednakowe, i wynosiły: wysokość 15 metrów, a całkowita długość 60 metrów. Umieszczenie pierwszego pojazdu w obszarach obliczeniowych było zawsze takie same.



Rys. 2. Przykładowe początkowe siatki obliczeniowe (wymiary w metrach)

Na bazie charakterystycznych punktów opisujących geometrię układów, zostały uruchomione procedury automatycznej dyskretyzacji obszarów obliczeniowych, w wyniku czego wygenerowane zostały siatki obliczeniowe, których przykładowe egzemplarze zamieszczono na rys. 2. Warunki brzegowe dla każdego zdyskretyzowanego obszaru obliczeniowego zostały zdefiniowane zgodnie z poniższym opisem:

- na profilach pojazdów: warunki typu „ściana”,
- na brzegu lewym i prawym: odpowiednio warunki typu „wlot” i „wylot”,
- na górnym brzegu: warunki typu „symetria”,
- na dolnym brzegu: warunki typu „ruchoma ściana”.

Dla opisu wszystkich rozważanych konfiguracji obliczeniowych wprowadzono jednolitą notację zgodną z poniższym szablonem:

A00BC-

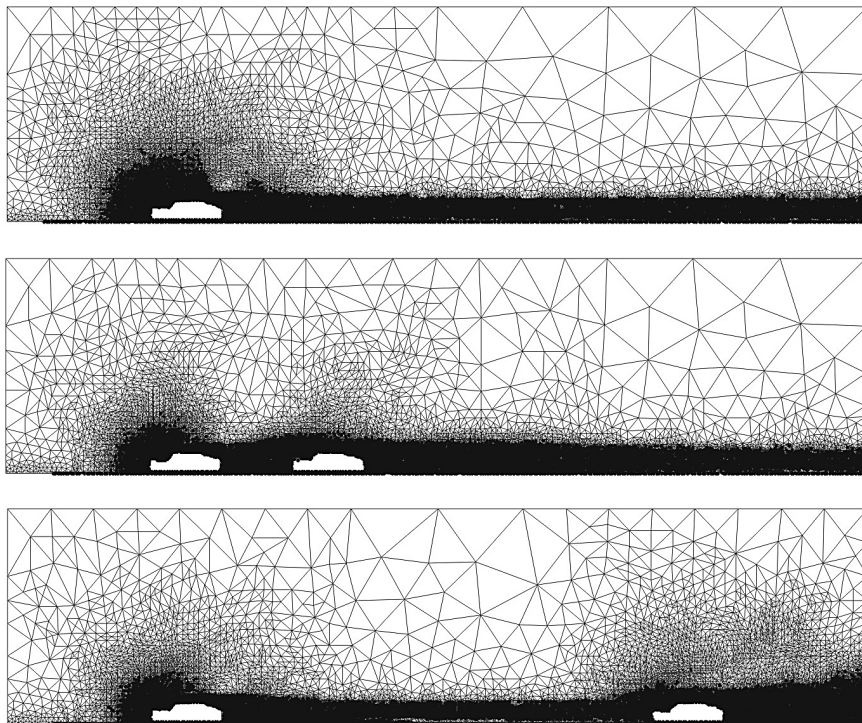
przy czym zastępcze symbole (A, B i C) oznaczają kolejno:

- A symbol profilu nadwozia pierwszego pojazdu (h – *hatchback*, n – *notchback*, s – *squareback*),
- B symbol profilu nadwozia drugiego pojazdu (h – *hatchback*, n – *notchback*, s – *squareback*),
- C odstęp (w metrach) pomiędzy pierwszym i drugim pojazdem (mierzony przód do przodu, lub tył do tyłu).

Tym samym w trakcie badań rozważono 57 konfiguracji obszarów obliczeniowych, w tym 3 obszary składające się z pojedynczych pojazdów o różnych profilach nadwozia. Parametry sterujące obliczeniami były dla każdej symulacji przyjmowane w identycznym zestawie.

## WYNIKI SYMULACJI AERODYNAMICZNYCH

Wyniki symulacji aerodynamicznych można klasyfikować jako bezpośrednie lub pośrednie. Te pierwsze wiążą się z prezentacją rozkładów zmiennych prostych (ciśnienia oraz składowe prędkości) na dowolnym kroku czasowym symulacji. Zalicza się do nich również zmiany formy siatek obliczeniowych wskutek ich automatycznej adaptacji w trakcie symulacji, co odzwierciedla kształtowanie się gradientów zmiennych prostych. Ponieważ prezentacja bezpośrednich rezultatów symulacji nie ma większego znaczenia dla określenia ogólnych reguł kształtowania się oporów podczas interakcji aerodynamicznej, rozkładów zmiennych prostych nie zamieszczono, a ograniczono się jedynie do przedstawienia przykładowych, końcowych form siatek obliczeniowych (rys. 3), odpowiadających zamieszczonym wcześniej (rys. 2) początkowym postaciom siatek.

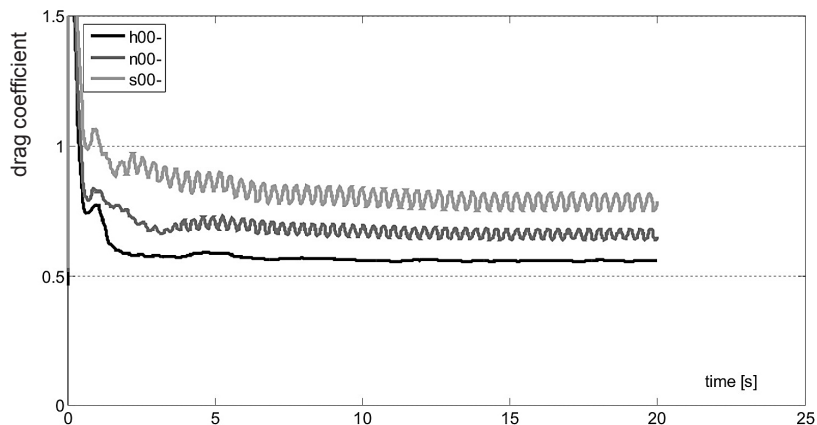


Rys. 3. Przykładowe końcowe siatki obliczeniowe

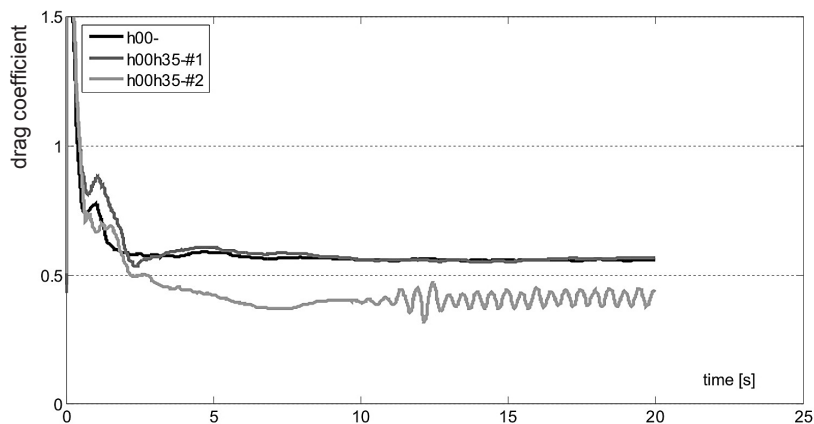
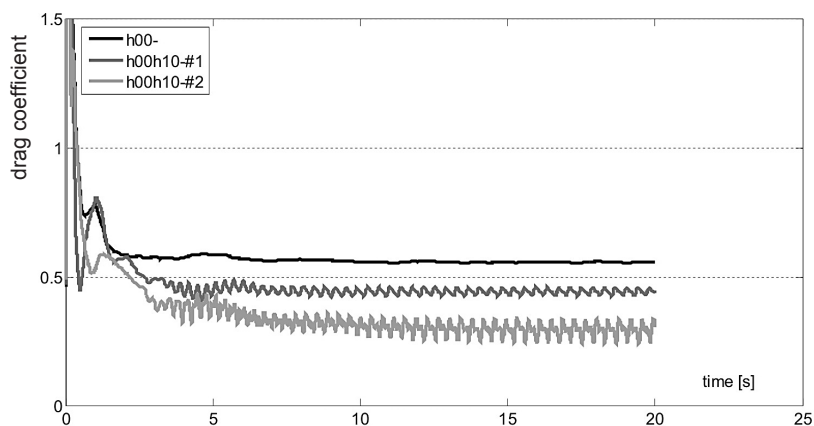
Z kolei pośrednie wyniki symulacji aerodynamicznych charakteryzują całościowo własności aerodynamiczne pojazdów poprzez sumaryczne siły oporu lub docisku, albo częściej, za pośrednictwem współczynników oporu lub docisku. Wielkości te prezentowane są zwykle dynamicznie (w funkcji czasu), często jednocześnie dla wielu wariantów układów obliczeniowych. Wzajemne relacje pomiędzy wielkością współczynników oporu aerodynamicznego a parametrami charakteryzującymi układy obliczeniowe zostały tu przedstawione:

- w zależności od odstępów, przy ustalonych ukształtowaniach profili nadwozia,
- w zależności od linii profilu obu pojazdów, przy stałej odległości pomiędzy nimi,
- przy jednoczesnych zmianach linii nadwozia i odstępów pomiędzy pojazdami.

Ponieważ praktycznie niemożliwe jest zamieszczenie tutaj wszystkich kombinacji przebiegu współczynników oporu aerodynamicznego w czasie, w zależności od parametrów charakteryzujących poszczególne układy obliczeniowe, do prezentacji wybrano tylko kilka poglądowych form wzajemnych zależności współczynników oporu (rys. 4 i 5).



Rys. 4. Współczynniki oporu aerodynamicznego pojedynczych pojazdów

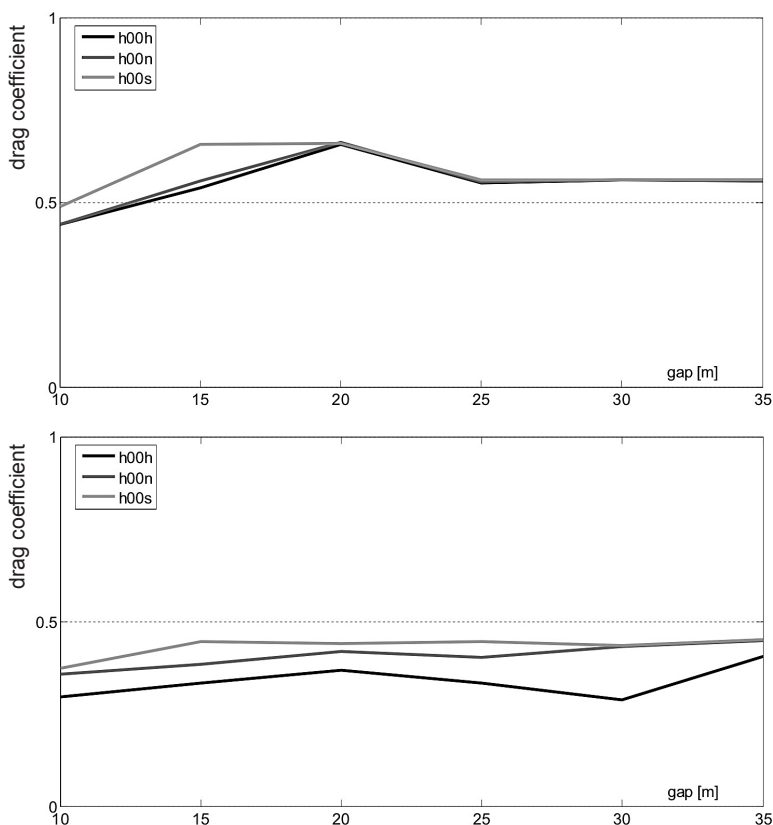


Rys. 5. Przykładowe przebiegi współczynników oporu dla wybranych układów dwóch pojazdów, wraz z odniesieniem dla pojedynczego pojazdu



## ANALIZA PORÓWNAWCZA

Wprawdzie siły (i współczynniki) oporu aerodynamicznego samochodów zmieniają się w czasie, to jednak zmiany te nie są odczuwane przez podróżujących, czy nawet rejestrowane w trakcie badań tunelowych. Po prostu wysoka częstotliwość zmian (efekt „odrywania” się wirów), duża bezwładność pojazdu, oraz własności tłumienia drgań przez nadwozie i układ pomiarowy (wagowy) powodują łącznie, że faktycznie rejestrowane są tylko pewne uśrednione poziomy sił aerodynamicznych. Odpowiednio do tego, powszechnie podaje się uśrednione (stałe) wartości współczynników oporu aerodynamicznego pojazdów.



**Rys. 6.** Zależność współczynnika oporu pojazdu pierwszego (górny wykres) i drugiego (dolny wykres) dla wybranych konfiguracji obliczeniowych od odstępu pomiędzy nimi

Z powyższych względów, do analiz porównawczych przyjęto wartości współczynników oporu aerodynamicznego poszczególnych nadwozi wyliczone jako średnie z drugiej połowy kroków czasowych (pierwsza połowa charakteryzuje się zakłóceniami wynikającymi z braku poprawnych informacji o warunkach początkowych

w obszarze przepływu), co pozwoliło na opracowanie bardziej uniwersalnych i jednoznacznych porównań własności aerodynamicznych pojazdów tworzących układy obliczeniowe.

Wzajemne zależności współczynników oporu aerodynamicznego zostały przedstawione w funkcji odstępu pomiędzy pojazdami (na osi odciętych) oraz różnych form nadwozi pojazdów (pierwszego lub drugiego). Przykładowe współczynniki oporu dla układów, w których pierwszy pojazd ma nadwozie *hatchback*, a drugi odpowiednio nadwozia: *hatchback*, *notchback* i *squareback*, zostały zamieszczone na rys.6, gdzie pierwszy z wykresów dotyczy pierwszego pojazdu, a drugi wykres – drugiego pojazdu.

## PODSUMOWANIE

Analizy porównawcze kształtowania się współczynnika oporu aerodynamicznego układu dwóch poruszających się pojazdów (jeden w cieniu aerodynamicznym drugiego) w zależności od odstępu pomiędzy pojazdami oraz kształtu ich nadwozi, zostały symbolicznie przedstawione na rys.6. Pełne, wieloaspektowe porównania pozwoliły sformułować wiele spostrzeżeń i wyprowadzić wnioski odnośnie aerodynamicznych aspektów ruchu rozważanych pojazdów. Intuicyjnie może się wydawać, że:

- im mniejszy odstęp pomiędzy pojazdami, tym mniejszy jest opór aerodynamiczny pojazdu drugiego,
- opory aerodynamiczne pojazdów zależą od profili nadwozi w ten sposób, że najniższe są dla nadwozi *hatchback*, pośrednie – dla *notchback*, a najwyższe – dla *squareback*.

Niestety, tak ogólne reguły okazują się niewystarczające, mało precyzyjne, zwodnicze lub wręcz nieprawdziwe w stosunku do analizowanych układów aerodynamicznych.

Poniżej sformułowano zestaw wniosków z przeprowadzonych symulacji, precyzyjnie i wiernie oddający wpływ różnych czynników i parametrów charakterystycznych układów obliczeniowych na opory aerodynamiczne poszczególnych pojazdów:

1. Jazda za innym pojazdem zawsze (w rozważanym zakresie odstępów) wpływa na obniżenie poziomu oporu aerodynamicznego w stosunku do oporu pojazdu samotnego, bez względu na profil nadwozia pojazdów oraz odległość pomiędzy nimi.
2. Opór aerodynamiczny pojazdu jadącego przed innym pojazdem w ogólności maleje w porównaniu z oporem pojazdu poruszającego się samotnie. To, w jakim stopniu, zależy głównie od wielkości odstępu pomiędzy pojazdami. Przy odstępie 10 metrów jest to zjawisko wyraźne i powszechne, jednak przy większych odstępach jest już mniej widoczne i w pewnej mierze zależy od kształtu profilu nadwozia.

3. Chociaż opory pojazdu drugiego w ogólności maleją, to otwartą kwestią pozostaje wielkość tego spadku. Szczególnie niskie opory pojazdu drugiego obserwuje się przy odstępie do pojazdu poprzedzającego wynoszącym 10 metrów. W niektórych sytuacjach obserwuje się spadek oporu pojazdu drugiego przy odstępie równym 30 metrów, lub też niewspółmierny wzrost tego oporu z uwagi na profil pojazdu pierwszego.
4. Jeśli pojazdem pierwszym jest *hatchback*, jego opory spadają najbardziej, gdy pojazd drugi znajduje się w odstępnie 10 metrów, natomiast przy odstępnie 20 metrów wzrastają, przekraczając wyraźnie poziom oporu charakterystyczny dla pojazdu samotnego. Zauważyć można również wzrost oporu tego pojazdu jeśli drugim pojazdem jest *squareback*, lecz tylko przy odstępach 10 i 15 metrów.
5. Jeśli pojazdem pierwszym jest *notchback*, to nie obserwuje się wpływu odstepu na jego opory.
6. Jeśli pojazdem pierwszym jest *squareback*, najniższe jego opory występują przy odstepie równym 10 metrów, natomiast przy większych odstępach zmiany wielkości jego oporu stopniowo i powoli wzrastają.
7. Jeśli pojazdem drugim jest *hatchback*, to jego najniższe opory występują przy odstepie 10 metrów, przy czym w pewnym stopniu zależą od profilu pojazdu poprzedzającego (najniższe przy profilu *notchback*, a relatywnie najwyższe przy *hatchback*).
8. Jeśli pojazdem drugim jest *notchback*, to również opory najniższe objawiają się przy odstepie 10 metrów i zależą w pewnym stopniu od profilu pojazdu poprzedzającego (najniższe przy profilu *notchback*).
9. Jeśli pojazdem drugim jest *squareback*, to najniższe opory są przy odstepie 10 metrów, i zależą jednocześnie od formy profili pojazdu poprzedzającego w ten sposób, że najniższe są przy profilu *notchback*, a najwyższe przy *hatchback*.

Warto zauważyć, że postać powyższych wniosków wynika z wielkości odrywających się za pojazdem wirów, co decyduje o formie interakcji aerodynamicznej. Można zatem przypuszczać, że zaokrąglenie „kanciastych” profili pojazdów będzie skutkowało pewnymi zmianami we wzajemnej interakcji aerodynamicznej pojazdów.

## LITERATURA

1. Maciejewski M., Osmólski W., Interferencja aerodynamiczna pojazdów poruszających się w kolumnie, Teka Komisji Naukowo-problemowej Motoryzacji (PAN o/Kraków) 26-27, 2003, 463-468.
2. Maciejewski M., Osmólski W., Numerical simulation of the aerodynamic interference in traffic flow, Proceedings of 1-st. International Industrial Simulation Conference ISC'2003, Valencia (Spain) 9-12.06.2003, EUROESIS, Ghent, 437-441.
3. Maciejewski M., Osmólski W., Symulacja interferencji aerodynamicznej pojazdów sterowanych automatycznie, Czasopismo Techniczne – Mechanika, z.7, 2004, 387-394.

4. Tsuei L., Savas O., Transient aerodynamics of vehicle platoons during in-line oscillations, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 89, 2001, 1085-1111.
5. Watkins S., Vino G., The effect of vehicle spacing on the aerodynamics of a representative car shape, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96, 2008, 1232-1239.
6. Maciejewski M., O zależności współczynnika oporu aerodynamicznego od prędkości jazdy, *Czasopismo techniczne (w druku)*.

## **NUMERICAL SIMULATION OF THE DRIVING IN AERODYNAMIC SHADOW**

### **Abstract**

The paper concerns a numerical simulation of aerodynamic interaction between two passenger cars, from which one moves in aerodynamic shadow of other. Simulations were the basis for determination of dependence the aerodynamic drag coefficient of both vehicles on the vehicle shapes (hatchback, notchback and squareback) and the gap between vehicles.

**Key words:** car aerodynamics, aerodynamic interaction, numerical simulation.