

POLITECHNIKA
LUBELSKA
WYDZIAŁ
MECHANICZNY

ROZPRAWA DOKTORSKA

Sterowanie przepływem powietrza w celu zmniejszenia oporów aerodynamicznych samochodu ciężarowego

Autor:

mgr inż. Mateusz Paszko

Promotor:

prof. dr hab. inż. Mirosław Wendeker

Katedra Termodynamiki, Mechaniki Płynów i Napędów Lotniczych
Wydział Mechaniczny
Politechnika Lubelska

Lublin, Polska 2024 r.

Pragnę złożyć serdeczne podziękowania
Panu prof. dr hab. inż. Mirosławowi Wendekerowi
za bezcenne wsparcie jako promotora i mentora.

Serdecznie dziękuję moim przyjaciołom:

dr inż. Grzegorzowi Barańskiemu,
mgr inż. Krystianowi Łygasowi,
mgr inż. Markowi Maksymiukowi,
mgr inż. Marcinowi Porzakowi,

za poświęcony czas, zaangażowanie oraz pomoc w przygotowaniu i realizacji badań
drogowych, których wyniki i zdobyta wiedza stały się podstawą budowy modeli
numerycznych wykorzystanych w niniejszej rozprawie.

Dziękuję mojej rodzinie za wsparcie i nieustającą wiarę we mnie.

Spis treści

Streszczenie.....	5
Abstract.....	7
Wykaz skrótów	9
Wykaz symboli.....	11
1. Wprowadzenie w tematykę rozprawy	15
1.1 Uzasadnienie podjęcia tematu pracy	16
1.2 Charakterystyka obszaru badawczego	17
1.3 Teza badawcza i cel rozprawy	18
1.4 Metody badawcze wykorzystane w celu udowodnienia tezy	18
2. Wybrane zagadnienia aerodynamiki pojazdów komercyjnych.....	21
2.1 Opór aerodynamiczny	22
2.2 Wpływ oporu aerodynamicznego na moc napędową	25
2.3 Opór strefy tylnej	28
2.3.1 Mechanika oderwania przepływu	29
2.3.2 Struktury wirowe w śladzie aerodynamicznym	32
2.4 Przegląd współczesnych metod ograniczania oporu strefy tylnej	37
2.4.1 Konstrukcje ogonowe	37
2.4.2 Deflektory.....	39
2.4.3 Profilowanie zabudów i tylnych krawędzi	40
2.4.4 Generatory wirów	42
3. Propozycja systemu aktywnej aerodynamiki.....	45
3.1 Ogólna koncepcja technologii.....	46
3.2 Mechanika sekcji spiętrzającej.....	49
3.3 Wyzwania badawcze i konstrukcyjne	51
3.3.1 Efektywność aerodynamiczna	52
3.3.2 Efektywność energetyczna	54
3.3.3 Źródło zasilania	55
3.3.4 Wyzwania konstrukcyjne.....	56
4. Metody numeryczne w badaniach aerodynamiki pojazdów	59
4.1 Wprowadzenie do komputerowej mechaniki płynów	60
4.2 Symulacje numeryczne w badaniach i certyfikacji pojazdów ciężarowych ...	60

4.3	Podstawowe równania komputerowej mechaniki płynów	63
4.3.1	Równania transportu	65
4.3.2	Równania Reynoldsa dla przepływów turbulentnych.....	68
4.4	Metody pośrednie i bezpośrednie modelowania turbulencji.....	72
4.5	Metody automatyzacji i optymalizacji obliczeń w symulacjach komputerowych.....	73
4.5.1	Projektowanie eksperymentów	74
4.5.2	Powierzchnia odpowiedzi.....	74
4.5.3	Metody optymalizacji.....	75
5.	Weryfikacja systemu aktywnej aerodynamiki za pomocą komputerowej mechaniki płynów.....	77
5.1	Strategia weryfikacji.....	78
5.2	Pojazd ciężarowy przyjęty na cele symulacji.....	80
5.3	Identyfikacja mocy oporów aerodynamicznych pojazdu referencyjnego	83
5.3.1	Domena i siatka obliczeniowa.....	83
5.3.2	Warunki brzegowe	87
5.3.3	Wyniki.....	87
5.4	Modele matematyczne różnych wariantów pojedynczej sekcji spiętrzającej..	90
5.4.1	Domena obliczeniowa i warunki brzegowe.....	90
5.4.2	Procedura obliczeń	93
5.4.3	Wyniki.....	94
5.5	Modele matematyczne opływu samochodu ciężarowego dla wybranych wariantów systemu aerodynamicznego	117
5.5.1	Warianty geometryczne przyjęte do weryfikacji.....	117
5.5.2	Domeny obliczeniowe i warunki brzegowe	117
5.5.3	Wyniki.....	120
5.6	Wstępna identyfikacja sposobu dostarczania powietrza zasilającego	138
6.	Podsumowanie wyników i wnioski do dalszych prac	143
	Literatura.....	147
	Załącznik A	163
	Załącznik B	167
	Załącznik C	171
	Załącznik D	175
	Załącznik E	181

Załącznik F	187
Załącznik G.....	193
Załącznik H.....	199

Streszczenie

Zmniejszenie oporu aerodynamicznego stanowi jeden z głównych obszarów umożliwiających obniżenie kosztów eksploatacji i ograniczenie wpływu pojazdów na środowisko, bez względu na rodzaj napędu. Niniejsza rozprawa koncentruje się na problematyce oporu aerodynamicznego pojazdów komercyjnych o prostopadłościennym kształcie nadwozia. Problem naukowy, który został rozwiązany w ramach tej pracy, polegał na znalezieniu skutecznego sposobu na zmniejszenie oporu aerodynamicznego oraz redukcję mocy napędowej wymaganej do utrzymania stałej prędkości pojazdu ciężarowego. Autor przedstawił opracowaną i opatentowaną przez siebie metodę aktywnego sterowania opływem, polegającą na wytwarzaniu dodatkowej bariery powietrznej, która oddziela tył pojazdu od powstających za nim turbulencji i stref obniżonego ciśnienia.

Podstawą działania zaproponowanego systemu aerodynamicznego jest zmiana paradygmatu dotyczącego wykorzystania strumieni powietrza jako źródła siły. Zamiast ich bezpośredniego wykorzystania do wytwarzania siły odrzutu dopędzającej pojazd, strumienie są używane do neutralizacji siły oporu działającej na strefę tylną pojazdu.

W pracy zaprezentowano proces weryfikacji zaproponowanego rozwiązania za pomocą komputerowej mechaniki płynów, który został przeprowadzony w trzech etapach. Pierwszy etap obejmował wykonanie modelu opływu lekkiego samochodu ciężarowego, który służył jako model referencyjny do analiz i wyznaczenia sił aerodynamicznych. Drugi etap polegał na eksploracji różnych wariantów geometrycznych i przepływowych głównych podzespołów systemu aerodynamicznego oraz wyznaczeniu optymalnych konfiguracji. W trzecim etapie wybrane konfiguracje zostały zastosowane w modelu opływu pojazdu ciężarowego, a następnie opór aerodynamiczny zmodyfikowanych pojazdów został porównany z modelem referencyjnym.

Uzyskane wyniki wskazują na skuteczność zaproponowanej metody na poziomie przewyższającym możliwości współczesnych rozwiązań pasywnych. W określonych warunkach siła generowana za pomocą spiętrzeń strumieni przewyższa teoretyczną siłę

ciągu tych strumieni. Efekt ten jest potęgowany na pojeździe, gdzie uzyskano blisko dwukrotnie większą sprawność poprzez ograniczanie oporu za pomocą bariery powietrznej względem teoretycznej siły ciągu strumieni powietrza wykorzystanych do jej wytworzenia.

Z perspektywy energetycznej, główne wyzwanie stanowi sposób doprowadzania powietrza do zasilania systemu aerodynamicznego. Pobieranie powietrza powinno odbywać się w taki sposób, aby zmniejszać opór aerodynamiczny w innych strefach pojazdu, w szczególności w strefie czołowej, gdzie następuje spiętrzenie powietrza. Przeprowadzone badania i obliczenia wykazały, że pobieranie powietrza z tej strefy jest teoretycznie możliwe i korzystne, jednak dokładny sposób realizacji tego procesu wymaga dalszych badań.

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na możliwość praktycznego zastosowania nowej technologii, otwierając nowe perspektywy w dziedzinie aerodynamiki pojazdów użytkowych. Kontynuacja badań może przyczynić się do znaczącej poprawy efektywności energetycznej pojazdów użytkowych, redukcji emisji CO₂ oraz obniżenia kosztów eksploatacji, co ma istotne znaczenie w kontekście obecnych globalnych dążeń do zrównoważonego rozwoju i ochrony środowiska.

Abstract

Reduction of aerodynamic drag is one of the primary areas enabling the reduction of operating costs and the environmental impact of vehicles, regardless of the type of propulsion system. This dissertation focuses on the issue of aerodynamic drag in commercial vehicles with a rectangular body shape. The scientific problem addressed in this work involved finding an effective way to reduce aerodynamic drag and the propulsion power required to maintain a constant speed of a truck. The author presented a method of active flow control developed and patented by themselves, which involves creating an additional air barrier that separates the rear of the vehicle from the turbulence and low-pressure zones formed behind it.

The proposed aerodynamic system is based on a paradigm shift regarding the use of air streams as a source of force. Instead of directly using them to generate thrust that propels the vehicle, the streams are used to neutralize the drag force acting on the rear zone of the vehicle.

The verification process of the proposed solution was conducted through computational fluid dynamics (CFD) in three stages. The first stage involved creating a flow model of a light truck, which served as a reference model for analysis and determination of aerodynamic forces. The second stage focused on exploring various geometric and flow variants of the main components of the aerodynamic system and determining optimal configurations. In the third stage, the selected configurations were applied to the flow model of the truck, and the aerodynamic drag of the modified vehicles was compared with the reference model.

The results indicate the effectiveness of the proposed method, surpassing the capabilities of contemporary passive solutions. Under certain conditions, the force generated by the air stream pileups exceeds the theoretical thrust of these streams. This effect is amplified in the vehicle, where nearly double the efficiency was achieved by reducing drag with an air barrier compared to the theoretical thrust force of the air streams used to create it.

From an energy perspective, the main challenge lies in the method of delivering air to power the aerodynamic system. Air intake should be conducted in such

a way as to reduce aerodynamic drag in other zones of the vehicle, particularly in the frontal zone, where air stream pileups occur. The conducted research and calculations demonstrated that air intake from this zone is theoretically possible and beneficial however, the exact implementation of this process requires further study.

The results of the conducted research indicate the practical applicability of the new technology, opening new perspectives in the field of commercial vehicle aerodynamics. Continued research may significantly improve the energy efficiency of commercial vehicles, reduce CO₂ emissions, and lower operating costs, which is of significant importance in the context of current global efforts towards sustainable development and environmental protection.

Wykaz skrótów

1D	Przestrzeń jednowymiarowa
2D	Przestrzeń dwuwymiarowa
3D	Przestrzeń trójwymiarowa
CO ₂	Dwutlenek węgla
MOS	Metoda objętości skończonych
NS	Równania Naviera-Stokesa
UE	Unia Europejska
ACEA	European Automobile Manufacturers' Association
BOI	Body of Influence
CCD	Central Composite Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
DES	Detached Eddy Simulation
DNS	Direct Numerical Simulation
DOE	Design of Experiments
EPA	Environmental Protection Agency
ICCT	International Council on Clean Transportation
LBM	Lattice Boltzmann Method
LES	Large Eddy Simulation
MOGA	Multi-Objective Genetic Algorithm
NSGA-II	Non-dominated Sorted Genetic Algorithm-II
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
SST	Shear Stress Transport
VECTO	Vehicle Energy Consumption calculation TOol

Wykaz symboli

A	powierzchnia pojazdu rzutowana w kierunku względnego kąta odchylenia
A_f	powierzchnia czołowa pojazdu
A_{PS}	powierzchnia spiętrzenia
A_{PS}^+	obszar nadciśnienia na powierzchni spiętrzenia
A_{PS}^-	obszar podciśnienia na powierzchni spiętrzenia
C_d	współczynnik oporu aerodynamicznego
D_z	wysokość domeny obliczeniowej
D_x	długość domeny obliczeniowej
e	energia wewnętrzna płynu na jednostkę masy
f	zewnętrzne siły działające na płyn
f'	częstotliwość odrywania wirów
F_{aero}	całkowita siła oporu aerodynamicznego pojazdu referencyjnego
F'_{aero}	siła oporu aerodynamicznego wymagana do zbilansowania kosztu energetycznego rozpędzania powietrza do prędkości pojazdu
F_{aero}^{SA}	siła oporu aerodynamicznego pojazdu referencyjnego z systemem aerodynamicznym
F_d	siła oporu aerodynamicznego
F_K	siła działająca na strefę nieaktywną pojedynczej kierownicy powietrza
F'_K	siła działająca na strefę nieaktywną wszystkich kierownic powietrza
F_{PS}	siła działająca na pojedynczą powierzchnię spiętrzenia
F'_{PS}	łączna siła działająca na wszystkie powierzchnie spiętrzenia systemu
F_{SP}	wypadkowa siła działająca na pojedynczą sekcję spiętrzającą, uwzględniająca siłę na powierzchni spiętrzenia oraz
F'_{SP}	wypadkowa siła działająca na wszystkie sekcje spiętrzające systemu aerodynamicznego
F_t	siła oporu strefy tylnej pojazdu referencyjnego
F_t^{SA}	siła oporu aerodynamicznego strefy tylnej pojazdu referencyjnego z systemem aerodynamicznym
g	wektor przyspieszenia grawitacyjnego
G	parametr wielkości domeny
h_{in}	wysokość kanału wlotowego do kierownic powietrza
h_K	wysokość kierownicy powietrza
h_{PS}	wysokość powierzchni spiętrzenia
h_{PS}^+	wysokość strefy nadciśnienia na powierzchni spiętrzenia
h_{PS}^-	wysokość strefy podciśnienia na powierzchni spiętrzenia
h_{SP}	wysokość pojedynczej sekcji spiętrzającej

H	wysokość pojazdu
H_z	wysokość zabudowy pojazdu
k	energia kinetyczna turbulencji
k'	współczynnik przewodzenia ciepła
l_s	długość strumienia spiętrzającego
L	długość pojazdu
m_s	masowe natężenie przepływu pojedynczego strumienia
m'_s	masowe natężenie przepływu pary strumieni spiętrzających
m''_s	masowe natężenie przepływu wszystkich strumieni spiętrzających w systemie aerodynamicznym
n_K	liczba kierownic powietrza w systemie aerodynamicznym
n_{PS}	liczba powierzchni spiętrzenia w systemie aerodynamicznym
n_{SP}	liczba sekcji spiętrzających w systemie aerodynamicznym
n_s	liczba strumieni spiętrzających w systemie aerodynamicznym
p	ciśnienie płynu
p_{PS}	średnie ciśnienie statyczne na pojedynczej powierzchni spiętrzenia
p'_{PS}	średnie ciśnienie statyczne na wszystkich powierzchni spiętrzenia
p_{out}	wylot ciśnieniowy
p_∞	ciśnienie otoczenia
P_{aero}	moc oporów aerodynamicznych pojazdu referencyjnego
P'_{aero}	moc oporów aerodynamicznych działających na pojazd referencyjny z systemem aerodynamicznym
P_{fan}	wymagana moc urządzeń wytwarzających strumienie spiętrzające
P'_s	teoretyczna moc niezbędna do przyspieszenia pary strumieni spiętrzających zasilających pojedynczą sekcję spiętrzającą w konfiguracji statycznej
P''_s	teoretyczna moc niezbędna do przyspieszenia powietrza zasilającego system aerodynamiczny zainstalowany na pojeździe
P_Q	moc strat wynikających z konieczności transportu systemu aerodynamicznego
P_t	moc oporów aerodynamicznych strefy tylnej
Q	ciepło doprowadzone lub odprowadzone na jednostkę objętości
Re	liczba Reynoldsa
St	liczba Strouhala
t	czas
T	temperatura
T_s	teoretyczna siła ciągu pojedynczego strumienia powietrza
T'_s	teoretyczna łączna siła ciągu pary strumieni spiętrzających
T''_s	teoretyczna łączna siła ciągu wszystkich strumieni spiętrzających
u, v, \bar{w}	uśrednione składowe lokalnej prędkości płynu w układzie kartezjańskim
u', v', w'	fluktuacje składowych prędkości płynu w układzie kartezjańskim
u_*	prędkość tarcia powierzchniowego

u_∞	prędkość strugi swobodnej
v_{inlet}	wlot prędkościowy
v_w	prędkość wiatru
v_p	prędkość pojazdu
v_r	względna prędkość pojazdu
v_s	prędkość powietrza na wylocie z dyszy lub kierownicy
v_{smax}	maksymalna prędkość powietrza na wylocie z pojedynczej dyszy lub kierownicy
v_{smin}	maksymalna prędkość powietrza na wylocie z pojedynczej dyszy lub kierownicy
V	wektor lokalnej prędkości płynu
V	wektor uśrednionej lokalnej prędkości płynu
w_{PS}	szerokość powierzchni spiętrzenia
w_s	szerokość strumienia spiętrzonego
W	szerokość pojazdu
W_z	szerokość zabudowy pojazdu
x, y, z	współrzędne układu kartezjańskiego
y^+	bezwymiarowy współczynnik odległości od opływanej powierzchni
u, v, w	składowe lokalnej prędkości płynu w układzie kartezjańskim
τ'_{ij}	tensor naprężeń Reynoldsa
Π_{ij}	tensor naprężeń
δ_{ij}	delta Kroneckera
τ_{ij}	tensor naprężeń lepkich
μ_t	współczynnik lepkości turbulენტnej
ε	szybkość rozpraszania
θ	kąt działania wiatru względem kierunku ruchu pojazdu
Ψ	względny kąt odchylenia
ω	specyficzna szybkość rozpraszania
μ	współczynnik lepkości dynamicznej
ν	lepkość kinematyczna
ρ	gęstość powietrza
ϕ	funkcja dyssypacji
∇	operator Nabla
∇^2	operator Laplace'a

Wprowadzenie w tematykę rozprawy

W niniejszym rozdziale przedstawiono wstępne informacje dotyczące tematyki i zakresu badawczego rozprawy. Przedstawiono postawioną przez autora tezę naukową, cel oraz zakres pracy, a także metody badawcze przyjęte w celu udowodnienia postawionej tezy. Uzasadniono również wybór i znaczenie podejmowanego tematu badawczego.

1.1 Uzasadnienie podjęcia tematu pracy

Transport drogowy stanowi nieodłączny element globalnych łańcuchów dostaw, pełniąc kluczową rolę w funkcjonowaniu europejskich i światowych gospodarek. Kwestie klimatyczne skutkujące nieustannym zaostrzaniem norm emisji spalin, a także globalne trendy wpływające na ceny ropy naftowej, zmuszają producentów do nieustannego zwiększania efektywności energetycznej oferowanych pojazdów. Zmniejszenie zapotrzebowania na moc niezbędną do napędu można osiągnąć przez rozwijanie technologii napędowych oraz ograniczanie oporów ruchu. W przypadku pojazdów komercyjnych, jednym z kluczowych obszarów pozwalających na optymalizację efektywności energetycznej jest rozwój ich aerodynamiki, ukierunkowany na ograniczanie oporu aerodynamicznego.

W wyniku prowadzonej przez Komisję Europejską polityki klimatycznej, argumentowanej kryzysem klimatycznym spowodowanym wzrostem poziomu emisji dwutlenku węgla, 20 czerwca 2019 r. Parlament Europejski przyjął pierwsze w historii rozporządzenie określające normy emisji CO₂ dla nowych samochodów ciężarowych (UE) 019/1242 [1]. Rozporządzenie przyjęto w celu ograniczenia emisji dwutlenku węgla przez ciężkie samochody ciężarowe o 15% do 2025 roku, a następnie o 30% do 2030 roku w porównaniu z poziomami z okresu referencyjnego obejmującego okres od 1 lipca 2019 r. do 30 czerwca 2020 r. Niespełnienie przez producentów przyjętych norm ma skutkować karami finansowymi. Europejskie Stowarzyszenie Producentów Pojazdów (ACEA) uznało przyjęte cele za wysoce wymagające [2]. Mimo to, w lutym 2023 roku Komisja Europejska wniosowała o dodatkowe zaostrzenie norm emisji, rozszerzając je na lekkie i średnie pojazdy ciężarowe, autobusy miejskie, autobusy dalekobieżne oraz naczepy [3]. Nowe cele obejmują obniżenie emisyjności wskazanych pojazdów względem okresu referencyjnego o 90% do roku 2040, z pośrednimi celami na lata 2030 i 2035 wynoszącymi odpowiednio 45% i 65%. W odpowiedzi ACEA wezwało do utworzenia rozporządzenia dotyczącego emisji CO₂ dla pojazdów ciężarowych i autobusów w oparciu o trialog, obejmujący jako jedną ze stron producentów pojazdów, jednoznacznie uznając procedowane propozycje za niewykonalne [4].

Pomimo, że Unia Europejska znajduje się w awangardzie jeśli chodzi o normy emisji CO₂ dla pojazdów ciężarowych, podobne działania, aczkolwiek znacznie mniej rygorystyczne, podjęły już Stany Zjednoczone [5] i Kanada [6]. Inne kraje

jak m.in. Australia, Japonia i Korea Południowa rozważają wprowadzenie własnych norm, dlatego wysoce prawdopodobne wydaje się, że liczba obszarów, w których obok norm Euro stosowane będą również normy emisji CO₂ będzie w przyszłości rosnąć. Oznacza to, że przyszłość nie tylko europejskich ale w dłuższej perspektywie również i światowych producentów pojazdów ciężarowych zależeć będzie od postępu technologicznego, ukierunkowanego nie tylko na rozwój i optymalizację napędów ale również na rozwój technologii zmniejszających popyt energetyczny pojazdu, w tym technologii zmniejszających opór aerodynamiczny. Zmniejszenie oporu aerodynamicznego ma stać się nie tylko atrakcyjną opcją umożliwiającą ograniczenie kosztów w przedsiębiorstwach transportowych, ale może stać się wymaganą przepisami koniecznością. Według raportu [7] przyszły rozwój pojazdów komercyjnych obejmować będzie m.in. systemy aktywnej aerodynamiki.

Na rynku urządzeń i technik umożliwiających ograniczenie oporu aerodynamicznego pojazdów komercyjnych przeważają te, które poprawiają właściwości aerodynamiczne strefy czołowej i podwoziowej. Rynek rozwiązań ograniczających opór strefy tyłu jest ograniczony i w zasadzie sprowadza się jedynie do kilku typów rozwiązań pasywnych o niskiej skuteczności. Zaproponowane w niniejszej rozprawie nowe podejście do ograniczania oporu aerodynamicznego tylnej strefy pojazdu stanowi próbę odpowiedzi na nowe wymagania wobec transportu drogowego. Realizacja założonego celu może ułatwić dostosowanie się producentów pojazdów do rygorystycznych norm emisyjnych i może stać się kolejnym krokiem w kierunku zrównoważonej mobilności.

1.2 Charakterystyka obszaru badawczego

Jedną ze składowych całkowitego oporu aerodynamicznego jest opór strefy tylnej, który odgrywa szczególne znaczenie w pojazdach komercyjnych o prostopadłościennym kształcie nadwozia takich jak m.in. autobusy, pojazdy ciężarowe oraz przyczepy i naczepy z nadwoziami typu van, zabudowami kurtynowymi, kontenerowymi i chłodniczymi. Na tylnych krawędziach tego typu pojazdów dochodzi do zjawisk odrywania strug powietrza, które nie jest w stanie podążać za gwałtowną zmianą kształtu nadwozia. Oderwanie przepływu inicjuje powstawanie za pojazdami obszaru o niskim ciśnieniu, które w połączeniu z dużą powierzchnią ich powierzchni tylnych prowadzi do powstawania jednego z głównych składników całkowitego oporu aerodynamicznego.

Przedmiotem badań i analiz przedstawionych w niniejszej rozprawie jest, opracowana i opatentowana przez autora, metoda aktywnego sterowania aerodynamiką, dedykowana do pojazdów o prostopadłościennym kształcie nadwozia. Metoda ta polega na wytwarzaniu dodatkowej bariery powietrznej, która oddziela tył pojazdu od wpływu występujących za nim stref obniżonego ciśnienia i turbulencji. Kluczowy element bariery powietrznej stanowią sekcje spiętrzające, tworzone przez odpowiednio kierowane, zderzające się strumienie powietrza, które w wyniku wzajemnych zderzeń modyfikują rozkłady ciśnienia na tylnej powierzchni pojazdu. Prace badawcze przedstawione w niniejszej rozprawie koncentrują się na weryfikacji ogólnej koncepcji zaproponowanej metody na przykładzie jej adaptacji do zabudowy lekkiego samochodu ciężarowego. Kluczowy obszar badawczy stanowi eksploracja różnych konfiguracji geometrycznych sekcji spiętrzających, w celu maksymalizacji ich efektywności w ograniczaniu oporu aerodynamicznego, przy jednoczesnym minimalizowaniu nakładu energetycznego niezbędnego do wytwarzania dodatkowych strumieni powietrza.

1.3 Teza badawcza i cel rozprawy

W ramach niniejszej rozprawy postawiono następującą tezę:

Istnieje sposób aktywnego sterowania przepływem powietrza skutkujący zmniejszeniem oporu aerodynamicznego i istotnym zmniejszeniem mocy potrzebnej do jazdy z zadaną prędkością pojazdu ciężarowego.

Praktycznym celem rozprawy jest opracowanie takiego sposobu aktywnego sterowania przepływem i jego adaptacja na lekkim samochodzie ciężarowym.

Naukowym celem rozprawy jest opracowanie modeli matematycznych umożliwiających weryfikację koncepcji systemu aerodynamicznego opartej o ideę bariery powietrznej wytwarzanej za pomocą wzajemnie zderzających się strumieni.

1.4 Metody badawcze wykorzystane w celu udowodnienia tezy

Badania związane z realizacją rozprawy i weryfikacją postawionej tezy podzielono na trzy etapy. W każdym z etapów kluczowe narzędzie badawcze stanowiła komputerowa mechanika płynów (CFD), która jest atrakcyjną alternatywą dla klasycznych metod badawczych, takich jak badania drogowe czy testy w tunelach aerodynamicznych, ze względu na jej efektywność czasową i kosztową.

Symulacje komputerowe wykonano zgodnie z międzynarodowymi standardami i wytycznymi SAE International J2966 [8]. Standardy te stanowią podstawę procedur certyfikacji pojazdów ciężarowych w Stanach Zjednoczonych i Kanadzie, a także podstawę procedur przyjętych przez Komisję Europejską do certyfikacji urządzeń ograniczających opór aerodynamiczny pojazdów komercyjnych na terenie Unii Europejskiej.

W ramach pierwszego etapu wykonano model opływu lekkiego samochodu ciężarowego. Celem symulacji było wyznaczenie sił aerodynamicznych działających na model pojazdu referencyjnego. Uzyskane wartości stanowiły następnie poziom odniesienia do weryfikacji skuteczności różnych konfiguracji sekcji spiętrzających.

Drugi etap pracy obejmował wykonanie sparametryzowanego modelu matematycznego reprezentującego uproszczoną pojedynczą sekcję spiętrzającą. Za pomocą technik planowania eksperymentu i powierzchni odpowiedzi wyznaczono wpływ konfiguracji składowych elementów geometrycznych oraz parametrów przepływowych strumieni powietrza na efektywność wytwarzanej bariery powietrznej. Symulacje wykonano dla wariantów odpowiadających zastosowaniu w pojeździe różnej liczby sekcji spiętrzających w celu osiągnięcia jak największej siły generowanej na pojedynczej sekcji przy możliwie jak najmniejszej mocy strumieni spiętrzających. Spośród ogółu wariantów wybrano osiem dominujących do dalszej weryfikacji na zmodyfikowanym modelu pojazdu.

Ostatni etap pracy polegał na adaptacji wybranych trzech wariantów sekcji spiętrzających do modelu pojazdu referencyjnego a następnie wykonaniu symulacji i oceny wyników pod kątem efektywności ograniczania oporu aerodynamicznego oraz wpływu na moc napędową przyjętego do badań pojazdu ciężarowego.

Wybrane zagadnienia aerodynamiki pojazdów komercyjnych

W rozdziale przedstawiono wybrane zagadnienia związane z aerodynamiką pojazdów ciężarowych, obejmujące podstawy oporu aerodynamicznego oraz jego wpływ na zużycie paliwa. Omawiane są również mechanizmy powstawania oporu strefy tylnej pojazdu i jego udział w ogólnym oporze aerodynamicznym. Ponadto autor dokonał przeglądu współczesnych technologii ograniczających opór strefy tylnej w odniesieniu do pojazdów komercyjnych o prostopadłościennym kształcie nadwozia.

2.1 Opór aerodynamiczny

Na pojazdy drogowe, podobnie jak na każde inne obiekty poruszające się w atmosferze Ziemi, działają siły aerodynamiczne i wynikające z nich momenty sił. Siły te wynikają z oddziaływania powierzchni pojazdu na otaczające go powietrze. Opór aerodynamiczny jest składową całkowitej siły aerodynamicznej, działającej przeciwnie do kierunku ruchu pojazdu [9]. Wartość ta jest sumą oporów składowych działających na poszczególne elementy podwozia i nadwozia, które dzielą się na opór tarcia i opór ciśnieniowy [10]. Opór tarcia jest efektem działania lepkości molekularnej i powstaje w wyniku tarcia cząsteczek powietrza o powierzchnie pojazdu. Lepkość przenosi na powierzchnie pojazdu naprężenia styczne, których składowe w kierunku ruchu pojazdu generują opór ruchu [11]. W przypadku pojazdów komercyjnych opór tarcia odgrywa decydującą rolę w opływie m.in. ścian bocznych i górnych powierzchni kabin oraz zabudów. Opór ciśnieniowy wynika z różnic w rozkładach ciśnienia na powierzchniach pojazdu i niesymetrii tych rozkładów w kierunku ruchu pojazdu. Na czołowych powierzchniach powietrze spiętrza się powodując nadciśnienie, natomiast na powierzchniach tylnych, w wyniku odrywania przepływu powstaje strefa podciśnienia [12]. Opór ciśnieniowy odgrywa główną rolę w opływie powierzchni umieszczonych prostopadle do kierunku ruchu jak powierzchnie czołowe oraz tylne kabin i zabudów. W projektowaniu pojazdów komercyjnych priorytet stanowi maksymalizacja objętości transportowej względem dopuszczalnych przez prawo gabarytów, dlatego ich nadwozia charakteryzują się prostopadłościennym kształtem, z dużymi powierzchniami czołowymi i tylnymi. Dominującą rolę w opływie tego typu pojazdów odgrywa opór ciśnieniowy, który według [13] odpowiada za ponad 80% całkowitego oporu aerodynamicznego.

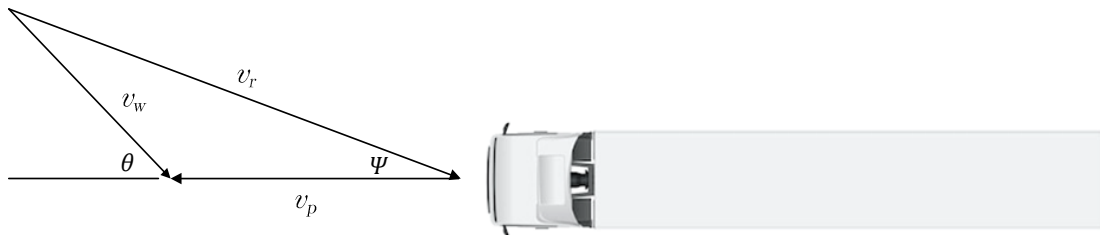
Całkowitą siłę oporu aerodynamicznego działającą na pojazd poruszający się w warunkach bez wiatru bocznego zgodnie z [14] wyraża równanie, które łączy cechy powietrza jako ciśnienie dynamiczne z cechami fizycznymi geometrii pojazdu:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v_p^2 C_d A \quad (2.1)$$

gdzie:

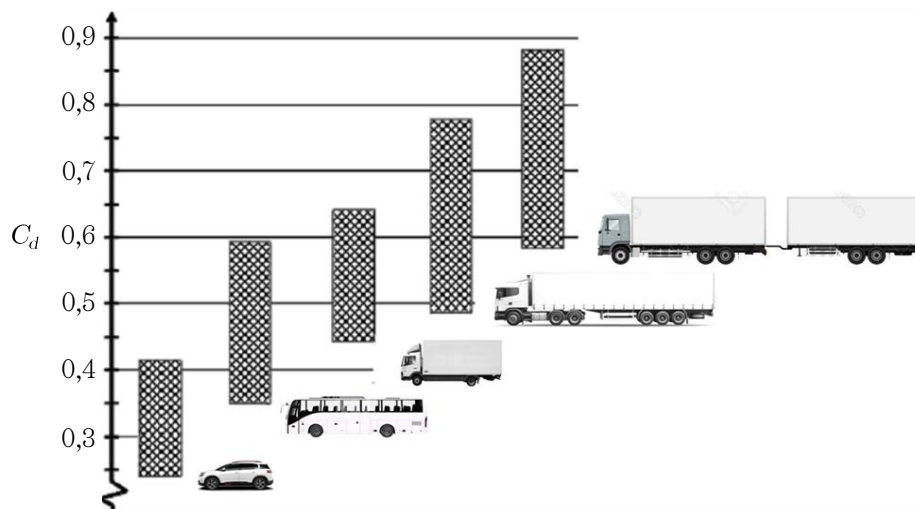
- A – powierzchnia czołowa pojazdu m^2 ,
- ρ – gęstość powietrza kg/m^3 ,
- v_p – prędkość pojazdu m/s ,
- C_d – współczynnik oporu aerodynamicznego.

W typowych warunkach użytkowania, pojazdy drogowe rzadko kiedy poruszają się w warunkach bezwietrznych lub w warunkach, gdy wiatr jest równoległy do toru jazdy [15,16]. W celu obliczenia siły oporu aerodynamicznego w warunkach rzeczywistych w równaniu (2.1) prędkość pojazdu v_p należy zastąpić prędkością względną v_r , która uwzględnia prędkość wiatru v_w działającą pod kątem θ do kierunku ruchu pojazdu. Ponadto, wartości współczynnika C_d oraz powierzchni czołowej A powinny zostać zastąpione przez wartości skorygowane, które odpowiadają względnemu kątowi odchylenia Ψ [17].



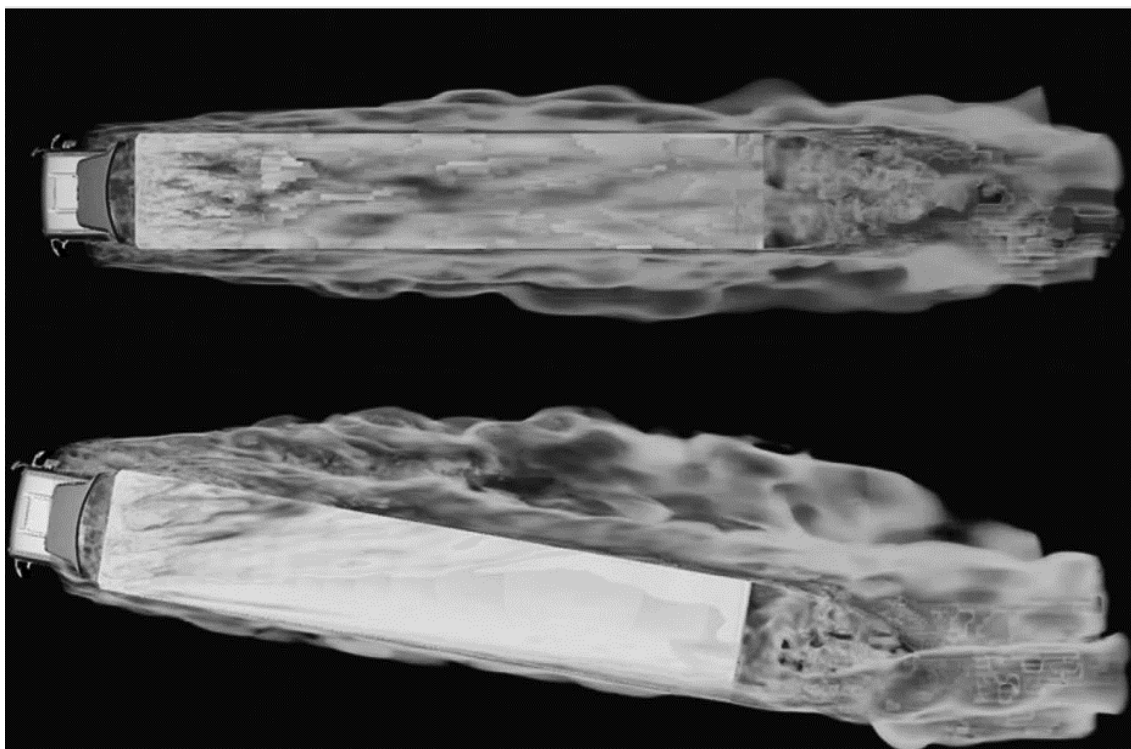
Rys. 2.1. Względna prędkość wiatru działająca na pojazd z uwzględnieniem prędkości i kierunku wiatru [18].

Działanie na pojazdy użytkowe znaczących sił aerodynamicznych nie jest wyłącznie następstwem ich dużej powierzchni czołowej. Decydującą rolę odgrywa niska doskonałość aerodynamiczna ich kształtu jako całości wyrażana za pomocą bezwymiarowego, wyznaczanego doświadczalnie współczynnika oporu aerodynamicznego. Wartości C_d dla współczesnych pojazdów komercyjnych wykazują znaczną rozpiętość, co jest efektem ich zróżnicowanej konstrukcji i przeznaczenia. W porównaniu do samochodów osobowych, autobusy osiągają dwukrotnie, a zespoły pojazdów ciężarowych nawet trzykrotnie większe wartości C_d .



Rys. 2.2. Zakresy współczynników oporu aerodynamicznego współczesnych pojazdów [15].

Pomimo, że producenci zazwyczaj podają wartość C_d pojazdów w odniesieniu do ich ruchu w warunkach bezwietrznych, parametr ten zmienia się w funkcji prędkości i kierunku wiatru bocznego [19]. Geometria współczesnych pojazdów komercyjnych, zdominowana przez prostopadłościenne kanciaste nadwozia, dodatkowo sprzyja tej zależności. Zmiana charakterystyki współczynnika oporu jest tym większa im dłuższy jest pojazd oraz im bardziej skomplikowana jest jego geometria [9]. Zwiększenie względnego kąta odchylenia powoduje zwiększenie powierzchni, na której dochodzi do zjawisk odrywania przepływu oraz powierzchni, na które te oderwania oddziałują. Powstają wówczas przepływy wirowe, które modyfikują rozkłady ciśnienia na większych obszarach. Zmiana ta prowadzi do powstawania oporu ciśnieniowego na powierzchniach, które w warunkach bezwietrznych podlegają głównie oporowi lepkościowemu. Zgodnie z pracą [9], przy zaledwie 10-stopniowym odchyleniu przepływu, skorygowany współczynnik oporu aerodynamicznego lekkich samochodów dostawczych jest większy o 15%, a zestawu ciągnik siodłowy–naczepa o 25%.



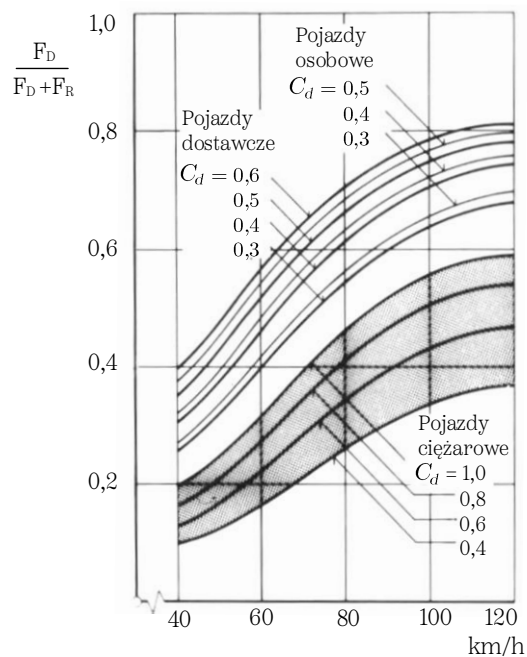
Rys. 2.3. Wizualizacja opływu zestawu ciągnik siodłowy–naczepa z opływem równoległym (góra) i odchylonym o 10° (dół) [9].

Instalacja na pojeździe urządzeń aerodynamicznych ma na celu pozytywną zmianę wartości współczynnika oporu aerodynamicznego. W przypadku pasywnych urządzeń ograniczających opór aerodynamiczny, zmiana wartości C_d stanowi bezpośredni wskaźnik ich efektywności. Wyposażenie pojazdu w system aktywnej

aerodynamiki powoduje natomiast, że wartość C_d staje się wielkością zmienną, uzależnioną od parametrów pracy systemu. To oznacza, że dla rzetelnej oceny wpływu takich systemów na moc napędową pojazdu, konieczne jest rozszerzenie analizy aerodynamicznej dodatkowo o bilans energetyczny, uwzględniający koszt ich zasilania.

2.2 Wpływ oporu aerodynamicznego na moc napędową

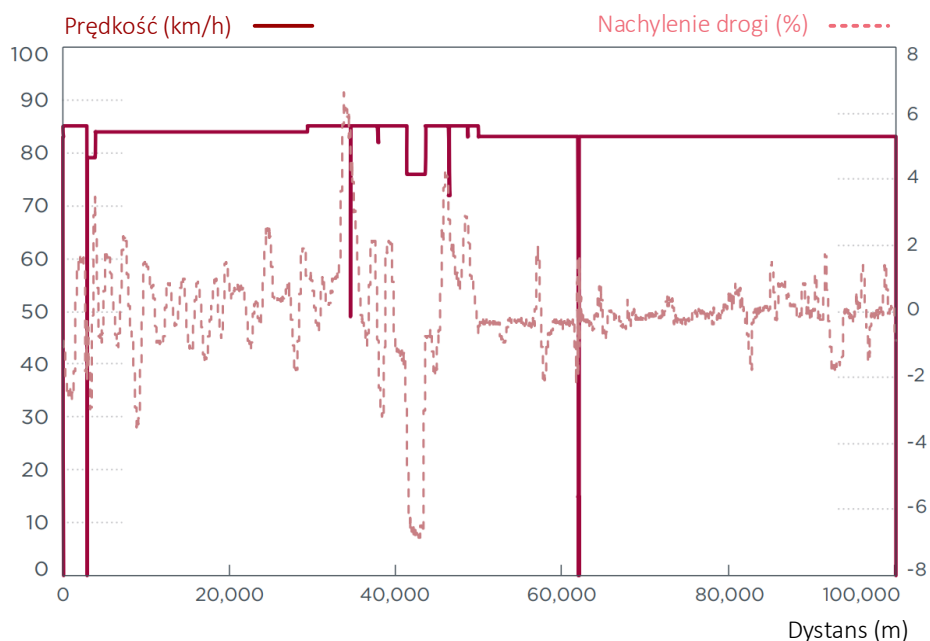
Podczas jazdy ze stałą prędkością po płaskiej nawierzchni i przy braku wiatru, główne składniki oporu ruchu to opór toczenia i opór aerodynamiczny [10]. Wzajemny udział tych oporów jest uzależniony m.in. od profilu prędkości jazdy, doskonałości aerodynamicznej pojazdu, rodzaju opon, stanu nawierzchni czy konstrukcji zawieszenia. Wartość oporu toczenia zazwyczaj pozostaje stosunkowo stała i rośnie nieznacznie wraz ze wzrostem prędkości [20]. Siła oporu aerodynamicznego rośnie natomiast proporcjonalnie do kwadratu prędkości pojazdu, co oznacza, że jej wpływ na zużycie energii napędowej staje się szczególnie znaczący przy maksymalnych prędkościach przejazdowych [21]. Na rys. 2.3 przedstawiono udział oporu aerodynamicznego w całkowitych oporach ruchu dla różnych typów pojazdów w funkcji prędkości ich ruchu. Przy stałej prędkości 90 km/h, opór aerodynamiczny może stanowić do 55% całkowitych oporów ruchu współczesnych zestawów pojazdów ciągnik siodłowy – naczepa, a w przypadku samochodów dostawczych nawet 75%.



Rys. 2.4. Udział oporu powietrza w całkowitym oporze ruchu pojazdów o różnej doskonałości aerodynamicznej [15].

W rzeczywistych warunkach eksploatacji, która różni się od wyidealizowanego przypadku jazdy ustalonej m.in. przez zmienną topografię trasy, przyspieszanie, hamowanie, konieczność zasilania urządzeń pokładowych, różnorodność ładunków oraz zmienne warunki atmosferyczne, udział oporu aerodynamicznego w całkowitym zużyciu energii ulega znaczącej zmianie. Nie jest to jednak wynik jego zmniejszonego znaczenia, a obecności czynników dodatkowo zwiększających całkowite zapotrzebowanie na moc niezbędną do napędu.

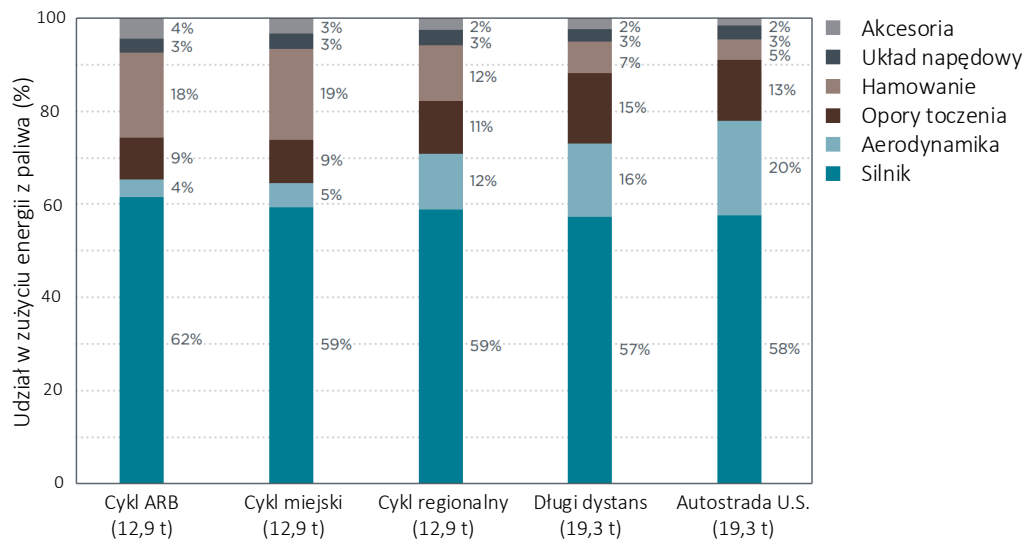
Audyty energetyczne przedstawione w raporcie [22] dla współczesnych pojazdów ciężarowych o napędzie spalinowym, zależnie od typu pojazdu i cyklu jazdy, wskazują na udział oporu aerodynamicznego w całkowitej mocy napędowej na poziomie od 4 do 24 %. Ponieważ dane dotyczące cyklu autostradowego przedstawiono w raporcie wyłącznie dla zestawu ciągnik siodłowy naczepa dla limitów prędkości Stanów Zjednoczonych, które są większe od europejskich i w niektórych stanach wynoszą 75 mph (≈ 120 km/h) [23], na cele dalszej analizy przyjęto cykl długiego dystansu, który reprezentuje jazdy na długich odcinkach z dominacją prędkości autostradowej w odniesieniu do warunków europejskich.



Rys. 2.5. Cykl długodystansowy VECTO [22].

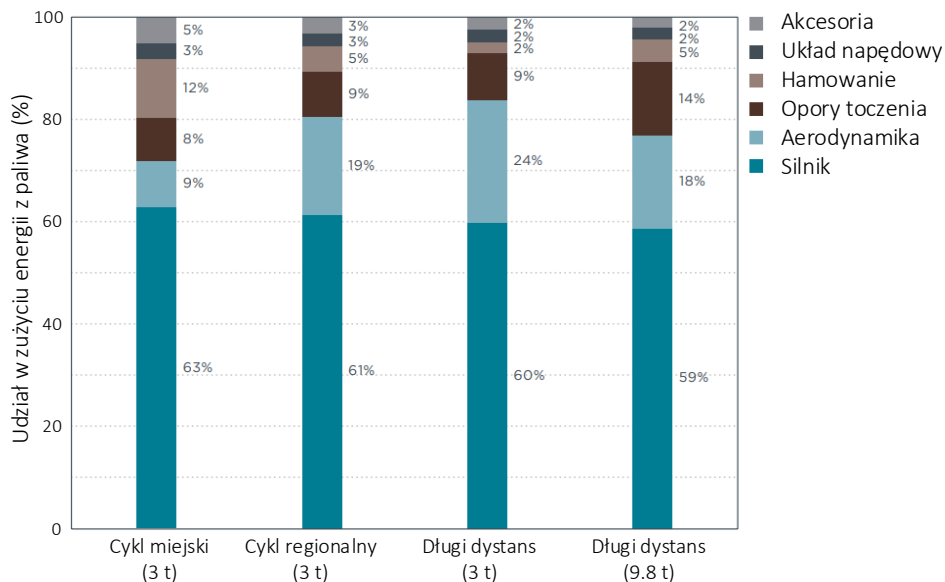
W przypadku zestawów ciągnik siodłowy–naczepa, obciążonych ładunkiem 19,3 t i poruszających się w cyklu długiego dystansu, spalanie oleju napędowego zgodnie z VECTO wynosi 33,56 litrów na każde 100 km [22]. Przy 16% udziale opór aerodynamiczny odpowiada stracie 5,37 l/100 km. Uwzględniając energię chemiczną

oleju napędowego wynoszącą zgodnie z [24] 36 MJ/l, aby pokonać wyłącznie opory aerodynamiczne układ napędowy pojazdu musi generować moc na poziomie 45,7 kW.



Rys. 2.6 Audyt energetyczny zestawu ciągnik siodłowy–naczepa dla różnych cykli jazdy [22].

W przypadku średniej wielkości pojazdów ciężarowych o sztywnej konstrukcji, dopuszczalnej masie całkowitej 12 t i przy pełnym obciążeniu wynoszącym 9,8 t, średnie spalanie zgodnie z [22] w cyklu długodystansowym wynosi 24,9 l/100 km. Opór aerodynamiczny jest odpowiedzialny za 4,48 l/100 km, co jest równoważne z traconą mocą na poziomie 38,1 kW.



Rys. 2.7 Audyt energetyczny średniej wielkości pojazdu ciężarowego o sztywnej konstrukcji w różnych cyklach jazdy [22].

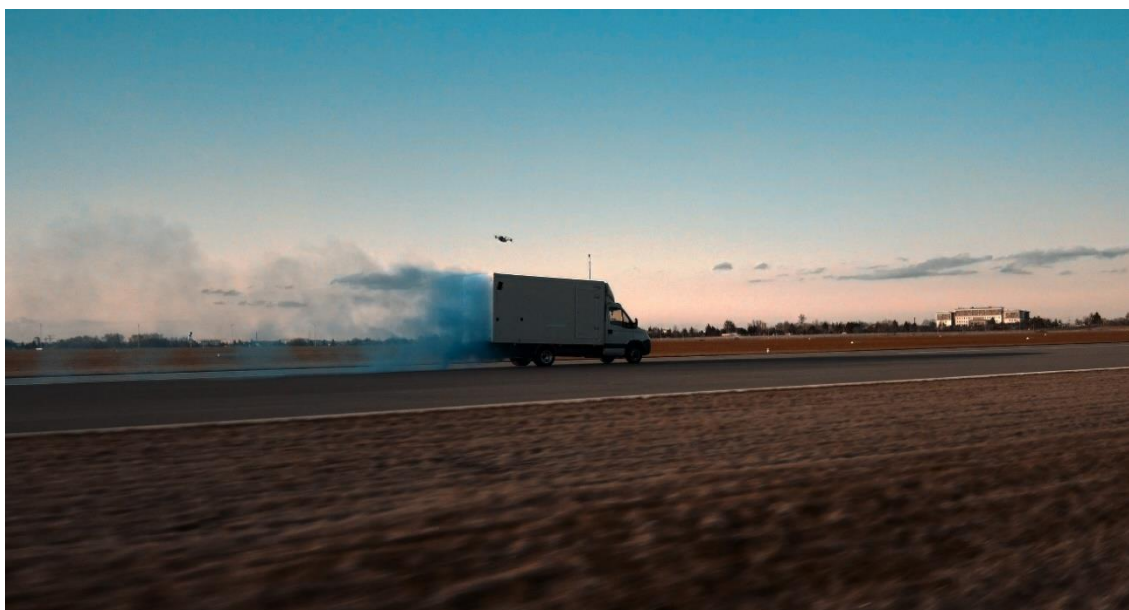
W przypadku lekkich pojazdów ciężarowych obciążonych ładunkiem 3 ton i przy założeniu ich średniego spalania zgodnie z [25] na poziomie 13,84 l/100 km,

opór aerodynamiczny odpowiada za stratę 3,32 l/100 km. Jest to równoważne z obciążeniem układu napędowego na poziomie 28,2 kW.

2.3 Opór strefy tylnej

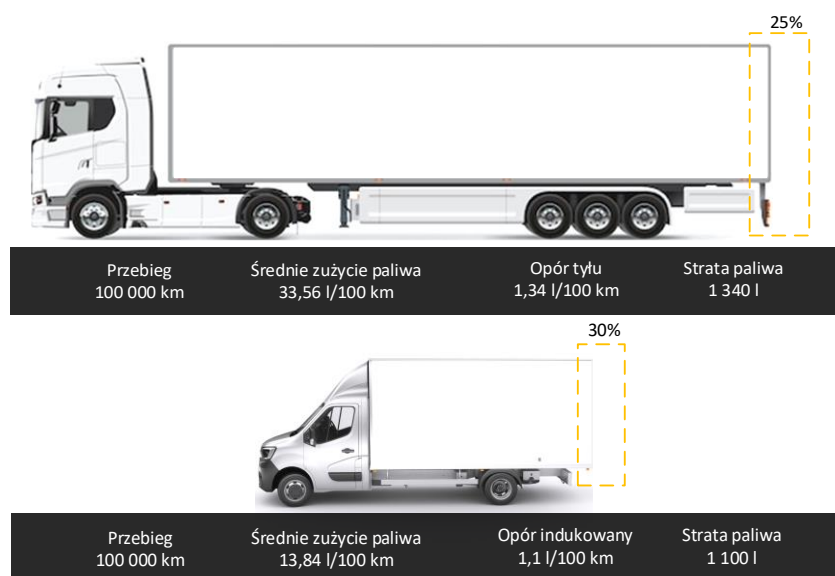
Podczas ruchu pojazdu prędkość powietrza w jego poszczególnych strefach nadwozia i podwozia ulega nieustannym zmianom [26]. Powietrze nie zawsze podąża za kształtem opływanej powierzchni, co skutkuje odrywaniem przepływu i powstawania obszarów turbulentnych, charakteryzujących się chaotycznymi, nieregularnymi zmianami prędkości, ciśnienia, gęstości i temperatury w przestrzeni i czasie [27]. Zjawisko to jest szczególnie istotne w kontekście aerodynamiki pojazdów o prostopadłościennym kształcie nadwozia, które ze względu na dominującą rolę oporu ciśnieniowego klasyfikowane są jako „Bluff Body” [28]. Ze względu na złożony kształt aerodynamiczny ich opływ stanowi nieustanną mieszaninę przepływów przylegających i odrywanych [29].

Z perspektywy całkowitego oporu aerodynamicznego, kluczową rolę odgrywa odrywanie przepływu na tylnej części pojazdu, gdzie ze względu na występowanie ostrych krawędzi i narożników przepływ traci stabilizację i nie podąża lekkościowo za gwałtowną zmianą kształtu. Ponieważ powietrze nie jest w stanie bezstratnie wypełnić strefy za pojazdem, oderwanie przepływu inicjuje powstawanie za pojazdem strefy zastoju, charakteryzującej się obniżonym ciśnieniem i złożonymi, trójwymiarowymi strukturami wirowymi [30].



Rys. 2.8. Wizualizacja strefy zastoju za lekkim pojazdem ciężarowym, badania własne autora.

Ze względu na duże, płaskie powierzchnie strefy tylnej typowych pojazdów komercyjnych, obniżone ciśnienie powoduje powstawanie znaczącej siły aerodynamicznej. W przypadku zestawów ciągnik siodłowy–naczepa, udział tej siły w całkowitym oporze aerodynamicznym stanowi 25% [31]. Przy uwzględnieniu danych z sekcji 2.2 niniejszego rozdziału, dotyczących wpływu oporu aerodynamicznego na zużycie paliwa, opór strefy tylnej odpowiada zużyciu paliwa na poziomie 1,34 l/100 km. W przypadku współczesnych samochodów dostawczych z zabudową skrzyniową, ze względu na inne proporcje geometryczne i mniejszy udział oporu ścian bocznych, dachu i podwozia, opór tyłu odpowiada za 33% całkowitego oporu aerodynamicznego (badania własne), co odpowiada zużyciu paliwa na poziomie 1,1 l/100 km.



Rys. 2.9. Szacunkowy wpływ oporu tyłu na zużycie paliwa dla różnych typów pojazdów ciężarowych w cyklu długodystansowym.

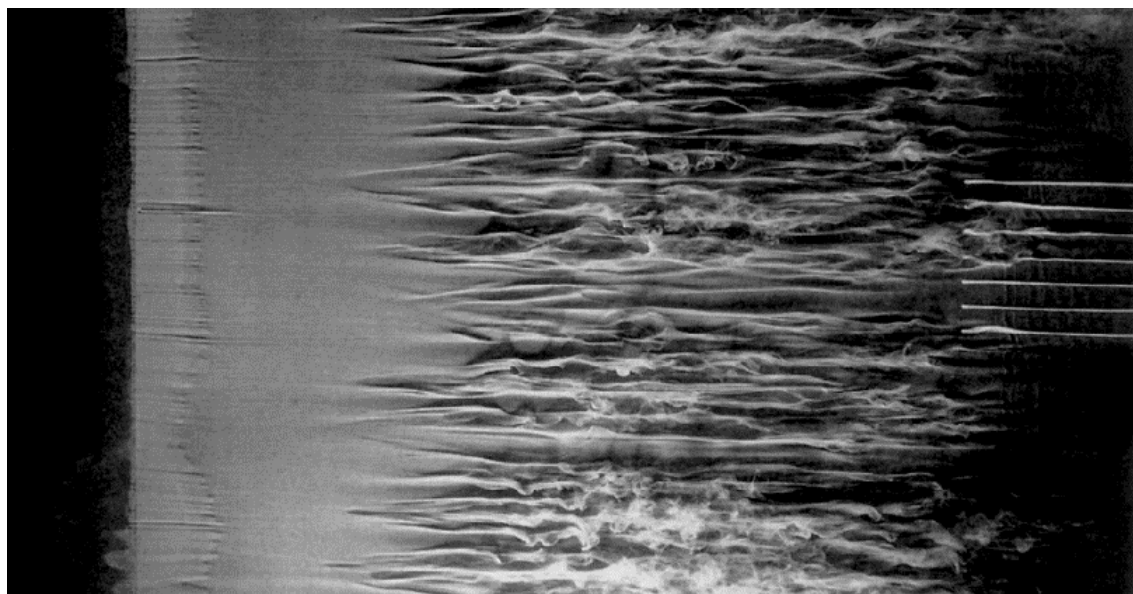
2.3.1 Mechanika oderwania przepływu

Mechanizm powstawania oporu aerodynamicznego, w tym również oporu tyłu, jest w skomplikowany sposób związany z lepkością powietrza [32]. Hipotetycznie, gdyby pojazd poruszał się w płynie nielepkim, nie działałyby na niego żadne siły aerodynamiczne (paradoks d'Alemberta) [33]. Wszystkie znane płyny są jednak płynami lepкими, dlatego w obszarze kontaktu powietrza z powierzchnią pojazdu lepkość inicjuje powstawanie obszaru przejściowego, nazywanego warstwą przyścienną. Ze względu na brak poślizgu, część cząsteczek powietrza przylega do powierzchni pojazdu i jest przez ten pojazd porywana generując intensywne gradienty prędkości od zera na powierzchniach pojazdu do wartości równej prędkości płynu poza nią.

To z kolei prowadzi do powstawania naprężeń ścinających pomiędzy kolejnymi warstwami płynu i przenoszenia tych naprężeń na pojazd.

Charakter warstwy przyściennej zmienia się wraz z charakterem przepływu, który określa liczba Reynoldsa. Wyraża ona fizyczny związek pomiędzy bezwładnością płynu, odzwierciedlającą jego naturalny opór do przyspieszania, a występującymi w nim siłami lepkości wynikającymi z wewnętrznego tarcia [34]. W przepływach o niskiej liczbie Reynoldsa siły bezwładności są pomijalnie małe względem dominujących sił lepkości. Zwykle skutkuje to powolnym, lepkim i laminarnym charakterem przepływu, w którym siły lepkości są wystarczająco duże, aby wytłumić nieregularne zaburzenia przepływu. Wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa następuje przejście z przepływu laminarnego do turbulentnego, w którym to siły bezwładności stają się dominujące i prowadzą do nieregularności, losowości oraz chaotycznego zachowania przepływu. Im większa wartość liczby Reynoldsa, tym większa intensywność turbulencji w przepływie [35].

Ze względu na małą lepkość powietrza, typowe przepływy spotykane w aerodynamice pojazdów drogowych charakteryzują się dużymi globalnymi wartościami liczby Reynoldsa (sięgającymi rzędu kilkudziesięciu milionów), które zdominowane są przez siły bezwładności. Pomimo dużych wartości R_e warstwy przyścienne powstające na powierzchniach pojazdów drogowych jak i ich komponentów zazwyczaj zaczynają się jako laminarne, po czym wraz z oddalaniem się od punktu stagnacji przechodzą w turbulentne [29].



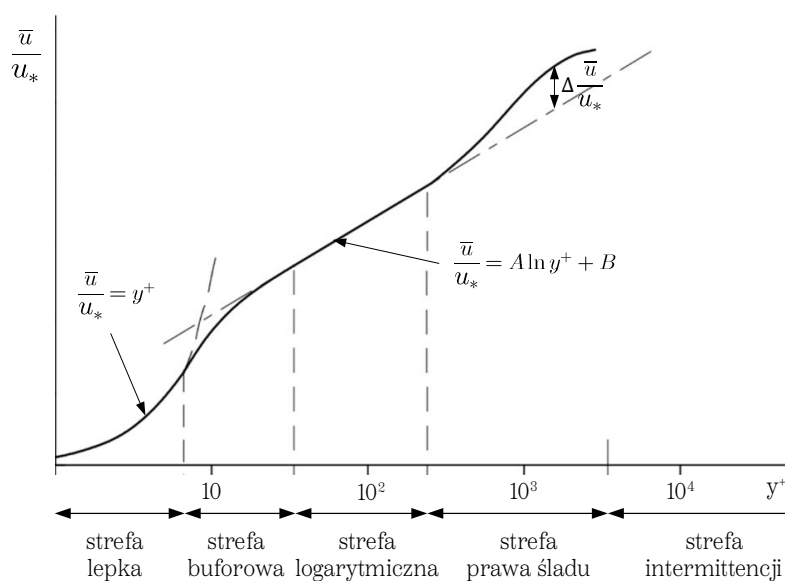
Rys. 2.10. Przykład przejścia laminarnej warstwy przyściennej w turbulentną przy opływie płaskiej powierzchni i z widocznymi falami Tollmienna – Schlichtinga [36].

W przypadku opływu większości powierzchni pojazdu takie przejście jest niemalże natychmiastowe. W skali całego pojazdu warstwy laminarne stanowią marginalny udział względem dominujących warstw turbulentnych [37], przy czym nawet w pełni turbulentnej warstwie przyściennej, bezpośredni obszar kontaktu z opływającą powierzchnią stanowi subwarstwa o charakterze laminarnym, w której to lepkość dominuje nad bezwładnością [27, 38].

Turbulentne warstwy przyścienne posiadają złożony charakter i składają się z odrębnych stref, które zgodnie z [27, 39] można wyodrębnić za pomocą parametru y^+ :

$$y^+ = \frac{u_* y}{\nu} \quad (2.1)$$

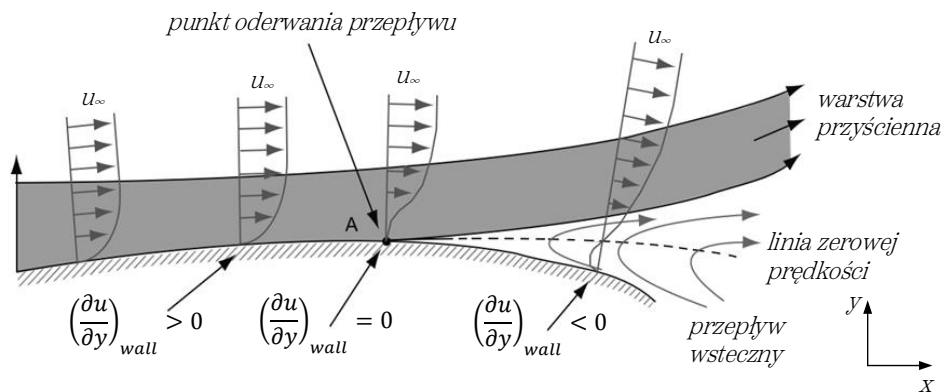
Parametr ten reprezentuje w sposób bezwymiarowy odległość od opływanej powierzchni poprzez związanie fizycznej odległości do najbliższej powierzchni y z prędkością tarcia powierzchniowego v_* i lepkością kinematyczną ν .



Rys. 2.11. Struktura turbulentnej warstwy przyściennej [27,38].

W subwarstwie lepkiej, która znajduje się najbliższej powierzchni pojazdu przepływ zachowuje charakter laminarny z dominującą rolą sił lepkości i profilem prędkości średniej zmieniającym się proporcjonalnie do fizycznej odległości od powierzchni. Ponieważ średnie prędkości przepływu w tej strefie są małe, przepływ jest szczególnie wrażliwy na zmiany ciśnienia. W sytuacji gdy ciśnienie wzrasta w kierunku przepływu, niekorzystny gradient ciśnienia spowalnia przepływ i może doprowadzić do powstania przepływu zwrotnego [39]. Oderwanie przepływu następuje gdy warstwa graniczna przemieszcza się na tyle daleko w stosunku

do niekorzystnego gradientu ciśnienia tak, że jej prędkość względem obiektu zmniejsza się prawie do zera. Przepływ płynu zostaje odwrócony a następnie oderwany od powierzchni obiektu [30].



Rys. 2.12. Oderwanie przepływu w wyniku przepływu wstecznego [40].

Ze względu na ruch wirowy turbulenty warstwy przyścienne charakteryzują się szybkimi fluktuacjami prędkości i ciśnienia, skutkującymi mieszaniem się kolejnych warstw. Prowadzi to do wymiany masy, pędu i energii na znacznie większą skalę w porównaniu z warstwą laminarną. Istnieje jednak konkurencja między przenoszeniem pędu ze swobodnego strumienia, który przeciwstawia się odwróceniu przepływu, a niekorzystnym gradientem ciśnienia, który sprzyja odwróceniu. Turbulencja w warstwie przyściennej zwiększa szybkość przenoszenia pędu między powierzchnią pojazdu a swobodnym strumieniem, co działa na zasadzie analogicznej do wzrostu lepkości. Z jednej strony prowadzi to do zwiększania sił tarcia, ale z drugiej strony, dzięki mieszaniu się warstw turbulencja w warstwie przyściennej odgrywa kluczową rolę w opóźnianiu procesu oderwania przepływu od powierzchni ciała, o ile geometria jego powierzchni na to pozwala [29].

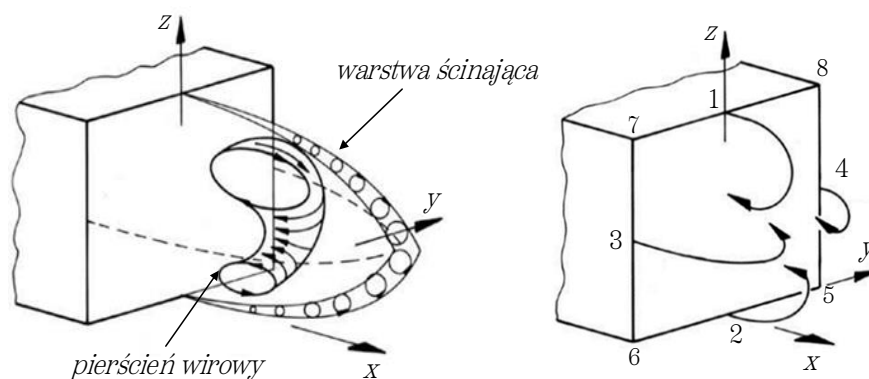
W opływie tylnej strefy pojazdów komercyjnych miejsce oderwania przepływu zależy od geometrii tylnych narożników ich nadwozia. W pojazdach posiadających narożniki w postaci ostrych krawędzi, niezależnie od liczby Reynoldsa, oderwanie następuje zawsze na krawędziach. Jeśli natomiast tył pojazdu posiada narożniki zakrzywione to w każdym miejscu narożnika panuje zróżnicowane ciśnienie [39], a punkt oderwania zależy zarówno od liczby Reynoldsa jak i geometrii krzywizny [41,42].

2.3.2 Struktury wirowe w śladzie aerodynamicznym

Oderwanie przepływu skutkuje powstaniem swobodnej warstwy ścinającej, w której pomiędzy kolejnymi warstwami płynu istnieją gradienty prędkości.

W prostych dwuwymiarowych przypadkach przepływowych jak np. opływ odwróconego stopnia, w wyniku tych gradientów mogą powstawać fale nazywane niestabilnością Kelvina – Helmholtza. Fale te absorbując powietrze z przepływu zewnętrznego przekształcają się w wiry tworząc strefy recyrkulacji, w których indukują się obniżone ciśnienie [43, 44].

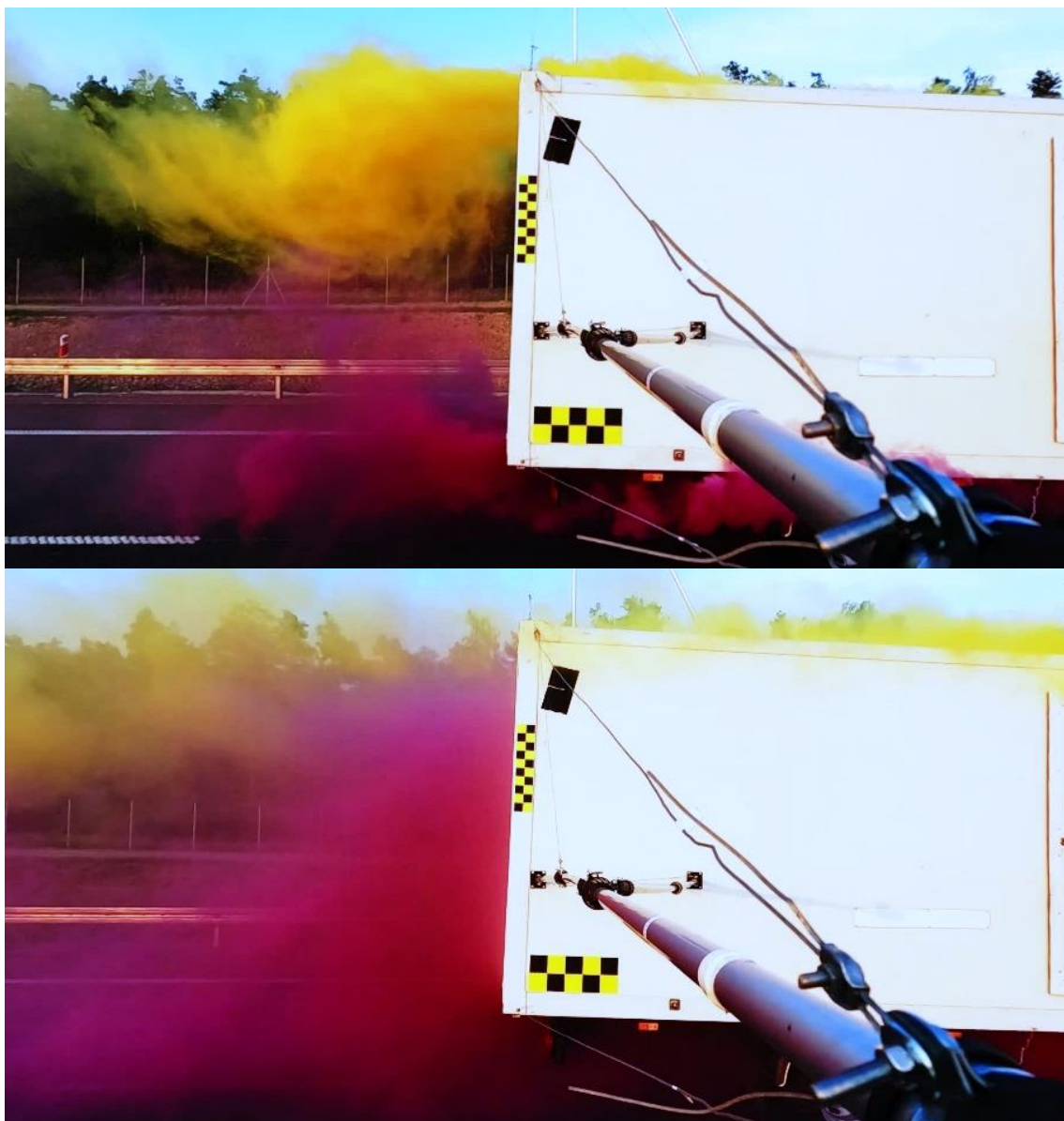
Opływ prostopadłościennych brył jest znacznie bardziej skomplikowany od wyidealizowanego przypadku dwuwymiarowego ze względu na trójwymiarową geometrię, której towarzyszy obecność pionowych i poziomych krawędzi generujących pary oddziałujących na siebie przeciwniebieżnych wirów 1-2 i 3-4 (rys. 2.11). Wiry te mogą być dodatkowo zaburzane przez wiry wzdłużne, generowane na krawędziach 5-8, jeśli te znajdują się w pozycji poprzecznej do kierunku przepływu [45], a także zawirowania przenoszone z przedniej części pojazdu.



Rys. 2.13. Schemat oderwania przepływu za ciałem prostopadłościennym [9].

W rzeczywistych warunkach jazdy tył pojazdu nieustannie „ucieka”, wymuszając na otaczającym powietrzu uzupełnienie przestrzeni za nim. Powstające na tyle pojazdu warstwy ścinające nie są w stanie podążać za gwałtowną zmianą geometrii w celu wypełnienia obszaru, co prowadzi do formowania się za pojazdem obszaru recyrkulacji. Skala wirów niesionych w warstwach ścinających w silnym stopniu zależy od liczby Reynoldsa. Przy mniejszych liczbach Reynoldsa, warstwy ścinające mają tendencję do tworzenia większych, ale mniej dynamicznych wirów, podczas gdy przy większych wartościach liczby Reynoldsa dominują wiry mniejsze, ale szybsze i bardziej dynamiczne. Pomimo, że turbulencja w warstwach ścinających powoduje odporność na zmianę kierunku przepływu, w pewnej odległości od krawędzi oderwania ciśnienie staje się decydującym czynnikiem wymuszającym zmianę kierunku przepływu w kierunku tyłu pojazdu. O strukturach przepływowych, które kształtują się za pojazdem decydują pola przepływu, które panują z każdej z jego stron.

Pola te są niesymetryczne co prowadzi do niestabilności i powstawania złożonych, trójwymiarowych wzorców przepływu [45, 46].



Rys. 2.14. Quasi-symetryczne zawirowania w chwili ruszania (góra) oraz w pełni rozwinięta dominacja powietrza ze strefy podwoziowej przy 90 km/h (dół), badania własne autora.

Ze względu na swoją złożoność i silną zależność od takich czynników jak m.in. turbulencja w strumieniu swobodnym, geometria pojazdu, prędkość ruchu, siła i kierunek wiatru boczny opływ pojazdów nie jest w pełni zbadany [9,29]. Obserwacje przedstawione w pracach [47-53] pozwalają jednak wyróżnić pewne stałe wzorce przepływu. Dominującą rolę w kształtowaniu opływu bezpośrednio za pojazdem odgrywa asymetria pomiędzy opływem góry i dołu pojazdu. Przepływ odrywany na górnej krawędzi tyłu 1 (rysunek 2.13) wchodzi w główną

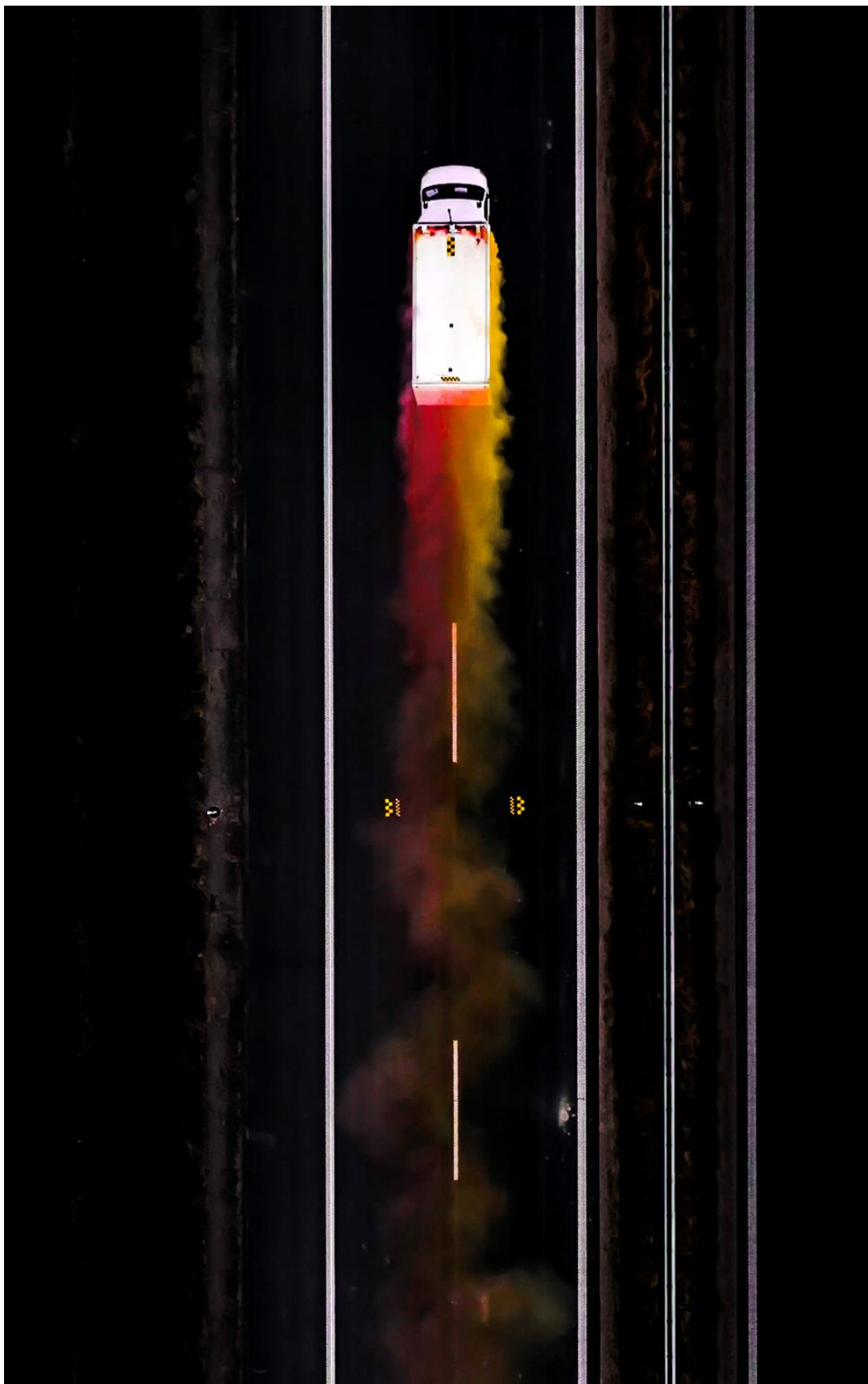
interakcję z dominującym przepływem odrywającym na dolnej krawędzi nr 2. Hipotetycznie gdyby pojazd posiadał symetryczny opływ góry i dołu, powstające wiry również byłyby symetryczne [9], tak jak ma to miejsce przez krótką chwilę w trakcie ruszania.

Ze względu na skomplikowany kształt strefy podwoziowej oraz występowanie licznych elementów stawiających opór i działających jak zawirywacze, powietrze w tej strefie jest porywane przez pojazd i przyspieszane do jego prędkości na znacznie większą skalę niż podczas opływu dachu i ścian bocznych. Dodatkowo w wyniku opływu skomplikowanej geometrii podwozia powstaje wiele oddziałujących na siebie warstw ścinających. Generowane wówczas wiry nie mogą być usunięte, lecz jedynie mogą łączyć się z innymi wirami lub rozpraszać zgodnie z kaskadą energii aż do chwili lepkiej integracji z otoczeniem. To sprawia, że strumień powietrza ze strefy podwoziowej jest bardziej podatny na działanie obniżonego ciśnienia i łatwiej, niż w przypadku opływu górnej części pojazdu, może zostać skierowany w kierunku tylnej części tworząc wielkoskalową strukturę dominującego wiru [28]. Po zderzeniu z tylną powierzchnią pojazdu wirujące powietrze rozdziela się na boki tworząc trójwymiarowy pierścień wirowy, który następnie wchodzi w nieustanną interakcję z otaczającymi warstwami ścinającymi [46, 54].

Warstwy ścinające, powstające na pionowych krawędziach bocznych oddziałują na siebie wywołując naprzemiennie pulsacje. Ponieważ pomiędzy warstwami ścinającymi znajduje się wcześniej opisany główny wir, część powietrza jest przez niego przejmowana do strefy recyrkulacji, a reszta wywołuje okresowe przesuwanie się jego rdzenia. To prowadzi do lokalnych zmian ciśnienia w strefie recyrkulacji i okresowego wyrzucania wirów, które w śladzie aerodynamicznego pojazdu tworzą ścieżkę wirową von Kármána [55-58]. Częstotliwość odrywania wirów f' jest funkcją prędkości pojazdu v_p , bezwymiarowej liczby Strouhala St i odległości między warstwami ścinającymi, co odpowiada szerokości strefy tylnej pojazdu W_z [29]:

$$f' = \frac{Stv_p}{W_z} \quad (2.2)$$

Ponieważ wiry są zrzucone naprzemiennie a następnie skręcane i płątane, struktura śladu aerodynamicznego tworzona za pojazdem przyjmuje wzór spiralnego skręcenia. Efekt ten może być dodatkowo wzmacniany przez trójwymiarowe wiry wzdłużne, które powstają na pochylonych względem kierunku ruchu krawędziach nadwozia.



Rys. 2.15. Wizualizacja ścieżki wirowej von Kármána powstającej za lekkim pojazdem ciężarowym, badania własne autora.

Warstwy ścinające płynące naprzeciw siebie z dwóch kierunków odrywają się i zwijają, formując złożone struktury indukujące niskie ciśnienie. Ilość cyrkulacji w tych wirach zależy przede wszystkim od nachylenia krawędzi [59] co powoduje, że charakter przepływu za pojazdem może zmieniać się pod wpływem zmiany obciążenia.

Zgodnie z [60, 61] w celu ograniczenia oporu tylnej strefy konieczne jest albo zmniejszenie powierzchni, na które działa obniżone ciśnienie, albo zwiększenie ciśnienia na tej powierzchni. Przy czym według [62,63] każda metoda zwiększająca ciśnienie w strefie tylnej powinna zatrzymać lub osłabić generowanie ścieżki wirowej lub chociażby opóźnić jej tworzenie.

2.4 Przegląd współczesnych metod ograniczania oporu strefy tylnej

Na liście Agencji Ochrony Środowiska Stanów Zjednoczonych (EPA), która weryfikuje skuteczność systemów aerodynamicznych w oparciu o znormalizowaną procedurę, znajduje się 109 pozycji przetestowanych systemów aerodynamicznych,

z czego 19 dotyczy urządzeń ograniczających opór tylnej strefy [64]. Pomimo rozwoju aerodynamiki pojazdów komercyjnych potwierdzonego licznymi pracami naukowymi, projektami badawczymi i patentami, dostępne na rynku technologie dotyczące ograniczania oporu tylnej strefy sprowadzają się jedynie do różnego typu urządzeń pasywnych lub profilowania kształtu nadwozia w celu ograniczenia wpływu przepływu oderwanego na kształtowanie ciśnienia za pojazdem [65,66].

2.4.1 Konstrukcje ogonowe

Profilowanie tylnej strefy pojazdu w zwężającą się formę jest techniką powszechnie stosowaną w pojazdach osobowych i sportowych a od niedawna znajduje coraz szersze zastosowanie w pojazdach ciężarowych. W przypadku pojazdów ciężarowych, ogon aerodynamiczny stanowią zazwyczaj zestawy paneli tworzących na tyle pojazdu zwężającą się formę. Zasada działania ogonów aerodynamicznych polega na wykorzystaniu zdolności powietrza do przylegania do ich zewnętrznych powierzchni i podążaniu powietrza za ich konturami. Wystające poza tylną strefę pojazdu elementy powodują, że moment oderwania przepływu zostaje oddalony od tylnej powierzchni pojazdu. Dodatkowo konstrukcja wewnętrzna ogonów aerodynamicznych tworzy fizyczną barierę, która oddziela pierścień wirowy od napływającego powietrza

i wpływu warstw ścinających ograniczając tym samym intensywność turbulencji za pojazdem. Rzeczywista wydajność ogonów aerodynamicznych jest uzależniona od ich geometrii [67], a także warunków atmosferycznych w jakich porusza się pojazd, szczególnie prędkości i kierunku wiatru [68,69]. Pomimo różnych gwarancji przedstawianych przez producentów rzeczywista skuteczność tych systemów według EPA zawiera się w zakresie 1-5% oszczędności w zużyciu paliwa [64].



Rys. 2.16. System OptiFlow [70].

Pomimo, że oszczędności osiągnane przez systemy ogonów aerodynamicznych nie przekraczają 5%, rozwiązania te zgodnie z [67] stanowią obecnie najbardziej popularną technologię ograniczania oporu strefy tylnej pojazdów ciężarowych. Trend ten jest widoczny również w wizjach pojazdów przyszłości prezentowanych na przestrzeni ostatnich lat przez takich producentów jak Mercedes [71], Renault [72]

czy Volvo [73], u których ogony aerodynamiczne stanowią kluczowy element konstrukcji. Pomimo, że koncepcje tych pojazdów nie zostały wdrożone do seryjnej produkcji, długofalowy potencjał ogonów aerodynamicznych i ich trwały wkład w ewolucję transportu drogowego wciąż potwierdzają projekty pojazdów rozwijane w ramach programu SuperTruck. Jest to inicjatywa, która została uruchomiona przez Departament Energii Stanów Zjednoczonych i ma na celu zwiększenie efektywności paliwowej oraz redukcję emisji szkodliwych substancji przez pojazdy ciężarowe, wykorzystywane w transporcie dalekobieżnym.



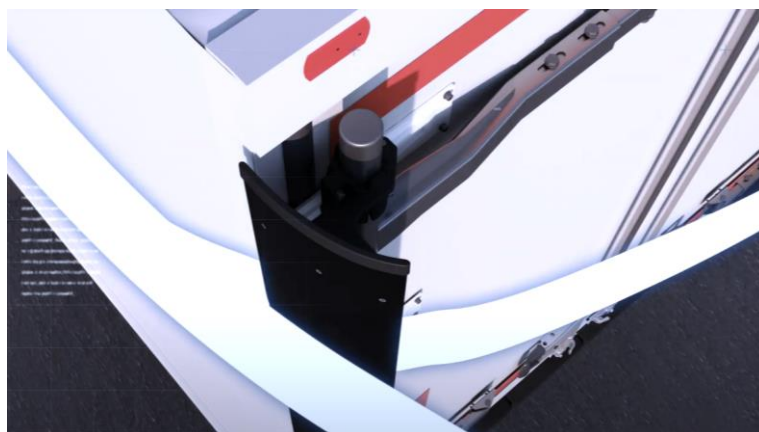
Rys. 2.17. Prototyp Volvo opracowany w ramach programu SuperTruck 2 [74].

2.4.2 Deflektory

Deflektory powietrza to urządzenia aerodynamiczne służące do zmiany kierunku przepływu powietrza, dzielące się na dwie kategorie ze względu na swoją konstrukcję oraz miejsce montażu.

Pierwsza kategoria to konstrukcje zbliżone do ogonów aerodynamicznych, instalowane na tylnych krawędziach nadwozia. Istotną różnicę względem standardowych ogonów stanowi obecność szczeliny między tylnymi krawędziami pojazdu a wewnętrzną stroną deflektorów. Takie urządzenia rozdzielają napływający strumień powietrza kierując jego jedną część bezpośrednio do strefy niskiego ciśnienia za pojazdem a drugą – w sposób podobny do działania klasycznych ogonów – oddalają od tyłu pojazdu opóźniając moment oderwania przepływu. Mimo dodatkowego oporu aerodynamicznego indukowanego na deflektorach efekt wypełnienia obszaru podciśnienia za pojazdem przyczynia się do zmniejszenia całkowitego oporu

aerodynamicznego. Zastosowanie takiego rozwiązania potencjalnie umożliwi skrócenie długości paneli względem klasycznych ogonów aerodynamicznych przy równoczesnym zachowaniu porównywalnej efektywności. Przykładami implementacji takich systemów są AIRWIN oferowany przez firmę Pommier z deklarowaną przez producenta oszczędnością paliwa na poziomie do 2,5% oraz AeroFin firmy Wabash, który według certyfikacji EPA umożliwia zmniejszenie zużycia paliwa o 1%.



Rys. 2.18. Wizualizacja zestawu deflektorów AIRWIN oferowanych przez firmę POMMIER [75].

Druga kategoria deflektorów obejmuje spoilery wykorzystujące efekt Coandy, instalowane na tylnych krawędziach bocznych ścian oraz dachu pojazdu tuż przed punktem naturalnego oderwania przepływu. Ich rolą jest manipulacja kierunkiem przepływu powietrza w stronę środka tylnej strefy pojazdu jeszcze przed jego oderwaniem. Jednym z przykładów jest system EDGE ELITE AERO™ ADVANTAGE oferowany przez firmę Transtex, którego skuteczność według EPA wynosi do 5% oszczędności.



Rys. 2.19. Wizualizacja systemu EDGE ELITE AERO™ ADVANTAGE [76].

2.4.3 Profilowanie zabudów i tylnych krawędzi

W niektórych typach pojazdów jak w przypadku autobusów oraz pojazdów ciężarowych typu van możliwe jest zastępowanie ostrych tylnych krawędzi narożnikami

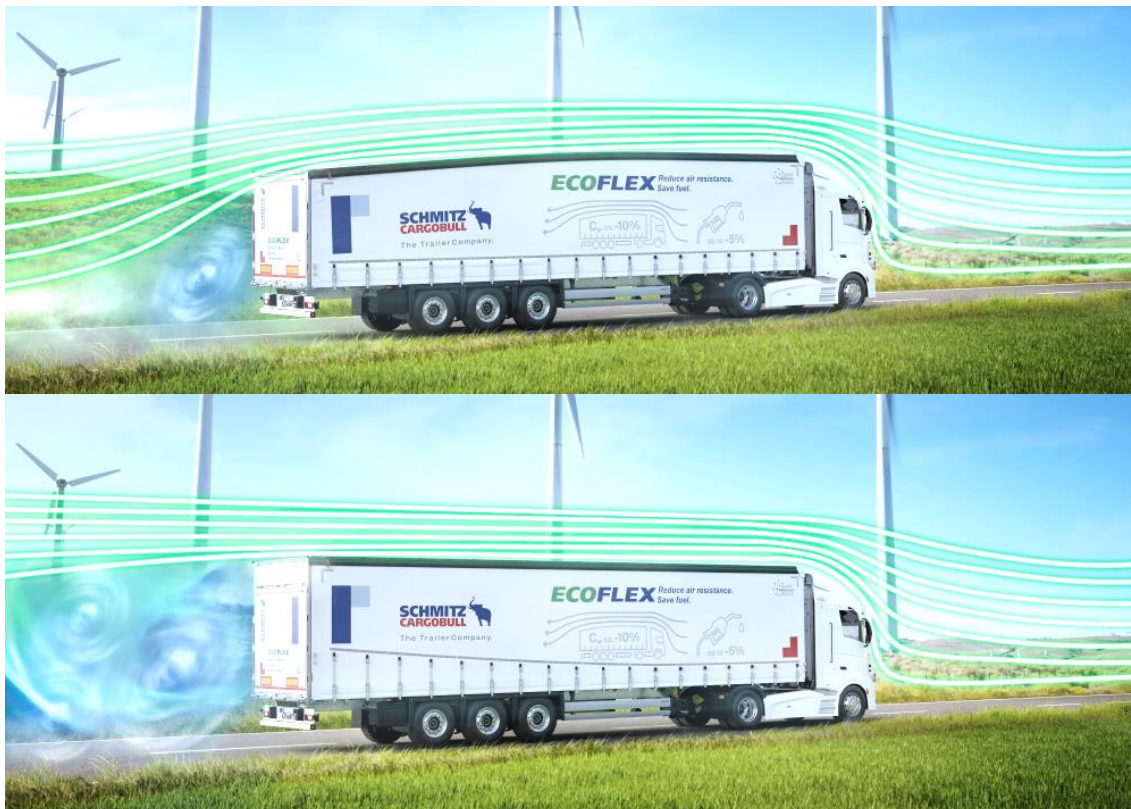
profilowanymi. Umożliwiają one oddalenie momentu oderwania przepływu, a tym samym częściowe skierowanie powietrza w kierunku tyłu, jeszcze przed oderwaniem. W przypadku pojazdów ciężarowych, ze względu na konieczność zapewnienia możliwie szerokiego dostępu do przestrzeni ładunkowej, bardziej efektywną technikę stanowi profilowanie dachu zabudowy. Technika ta polega na zakrzywianiu kształtu dachu oraz stopniowym obniżaniu jego wysokości w kierunku tyłu pojazdu. Taki zabieg pozwala na częściowe przekierowanie strumienia powietrza w dół bezpośrednio przed jego oderwaniem oraz zmniejszenie powierzchni tylnej strefy, na którą działa obniżone ciśnienie. Prowadzi to do znaczącego ograniczenia oporu bez konieczności stosowania dodatkowych, zewnętrznych urządzeń. Przykładem komercyjnie dostępnych naczep o stałej profilowanej geometrii jest model Teardrop oferowany przez firmę DON-BUR. Według producenta konstrukcja naczepy pozwala na średnią oszczędność paliwa na poziomie 11% [77].



Rys. 2.20. Aerodynamiczna naczepa oferowana przez firmę DON-BUR [77].

Główną wadą profilowanych naczep o stałej geometrii jest jednak ich ograniczona funkcjonalność, szczególnie podczas transportu ładunków o dużych gabarytach. Firma Schmitz Cargobull wprowadziła rozwiązanie dla naczep kurtynowych w postaci aerodynamicznego nadwozia EcoGeneration o zmiennej geometrii, które łączy aerodynamikę z funkcjonalnością. W trakcie jazdy bez ładunku lub z ładunkiem niewymagającym pełnej przestrzeni załadunkowej tył naczepy jest obniżany. Wysokość załadunkowa jest regulowana w przedziale od 220 do 265 centymetrów

za pomocą siłowników hydraulicznych. Według producenta pozwala to na zmniejszenie zużycia paliwa nawet o 5%. Rzeczywista oszczędność jest uzależniona od czasu jazdy z obniżonym tyłem.



Rys. 2.21. Przepływ powietrza wokół naczepy EcoFLEX z dachem w ustawieniu standardowym (górze) oraz po obniżeniu dachu (dół) [78].

2.4.4 Generatory wirów

Generatory wirów stanowią niewielkie elementy konstrukcyjne umieszczone przed krawędzią, na której dochodzi do zjawiska oderwania [79]. W przypadku pojazdów ciężarowych generatory wirów instalowane są na końcach owiewek kabin oraz przed tylnymi krawędziami nadwozia, zwiększając turbulencje w warstwie przyściennej przed jej oderwaniem. Generatory wirów wprowadzają niewielki opór, który wynika z rozkładu ciśnienia na ich powierzchni. W założeniu przyczyniają się do ograniczenia całkowitego oporu pojazdu, głównie przez tłumienie powstawania pulsacji w śladzie aerodynamicznym pojazdu [80].

Producenci zawirowywaczy deklarują potencjalne oszczędności paliwowe w przedziale od 3 do 5% a nawet do 11%. Z kolei recenzowane źródła naukowe dostarczają ograniczone dowody na znaczący wpływ tych rozwiązań na oszczędności paliwowe w sektorze pojazdów ciężarowych. W niektórych publikacjach podaje się maksymalne

możliwości oszczędności paliwa na poziomie do 1% [16] podczas gdy w innych wskazuje się wręcz na ich brak [81]. Pomimo, że generatory wirów są ekonomiczne w produkcji i proste w instalacji, ich rzeczywista efektywność w redukcji zużycia paliwa zależy od wielu czynników [82]. Wynika to z różnorodności konstrukcji generatorów, ich liczby i miejsca montażu w pojeździe, jak i typu samego pojazdu. Aby metoda działała efektywnie, proces implementacji zawirowywaczy wymusza konieczność dogłębnego zrozumienia charakterystyki opływu konkretnego typu pojazdu.



Rys. 2.22. Wizualizacja pojedynczego generatora wirów Airtab (strona prawa) oraz wizualizacja ich adaptacji na tyle naczepy (strona lewa) [83].

Propozycja systemu aktywnej aerodynamiki

W niniejszym rozdziale przedstawiono ogólną koncepcję budowy i działania, opracowanego i opatentowanego przez autora systemu aktywnej aerodynamiki. Przedstawiono również mechanizm wytwarzania bariery powietrznej oraz wyzwania badawcze związane z jej adaptacją w rzeczywistych pojazdach drogowych.

3.1 Ogólna koncepcja technologii

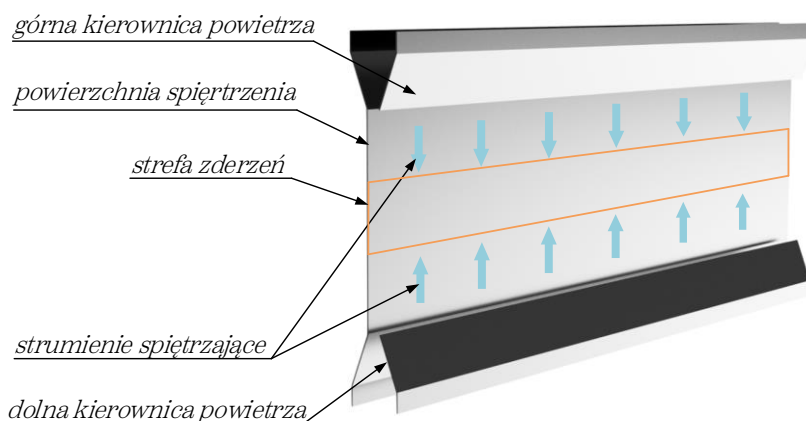
Według pomysłu autora system aerodynamiczny składa się z urządzeń i przestrzeni przepływowych montowanych w części podwoziowej oraz tylnej pojazdu. aerodynamiczny składa się z urządzeń i przestrzeni przepływowych montowanych w części podwoziowej i tylnej pojazdu. System dedykowany jest lekkim i ciężkim pojazdom komercyjnym o prostopadłościennym kształcie zabudowy lub nadwozia



Rys. 3.1 Wizualizacja głównych przestrzeni przepływowych systemu aerodynamicznego.

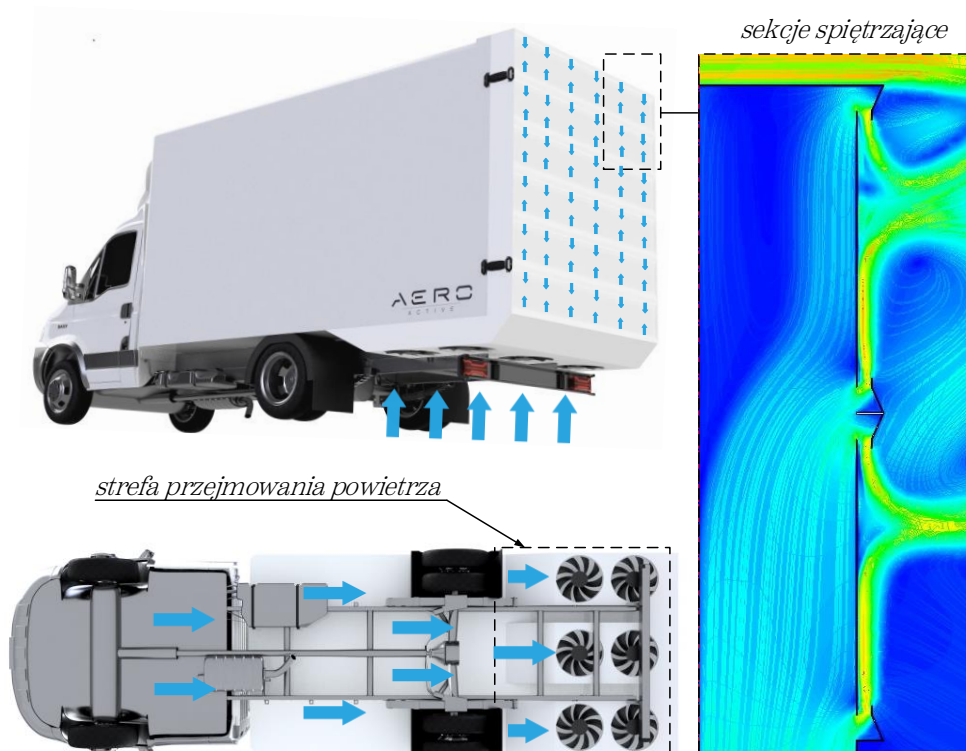
Sterowanie opływem pojazdu polega na wytwarzaniu sztucznej bariery powietrznej w tylnej strefie, oddzielającej pojazd od stref obniżonego ciśnienia. Bariera ta jest wytwarzana za pomocą odpowiednio kierowanych, wzajemnie zderzających się strumieni powietrza, których energia kinetyczna jest częściowo przekształcana na zmianę rozkładów ciśnienia statycznego za pojazdem. Podczas ruchu pojazdu urządzenia tłoczące pobierają powietrze ze strefy podwoziowej, a następnie poprzez kanały przepływowe systemu aerodynamicznego kierują na tył pojazdu. Powietrze wtłoczone do przestrzeni przepływowych systemu aerodynamicznego jest rozdzielane i stabilizowane na podłużnych kierownicach powietrza rozpiętych na całej szerokości strefy tylnej pojazdu. Kierownice stanowią konstrukcję zbliżoną do tzw. noży powietrznych, czyli dysz o prostokątnym kanale wylotowym. Kierownice powietrza są ustawione w parach, wylotami równoległe do tyłu pojazdu i przeciwnie względem siebie w taki sposób, że strumienie powietrza z górnych kierownic są skierowane do dołu, natomiast z dolnych – do góry. Pomiędzy każdą z par

kierownic znajduje się powierzchnia spiętrzenia. Każda z par kierownic wraz z powierzchnią spiętrzenia stanowi pojedynczą sekcję spiętrzającą, przy czym ich geometria i liczba na pojeździe jest uzależniona od gabarytów pojazdu i wyników prac badawczo-rozwojowych.

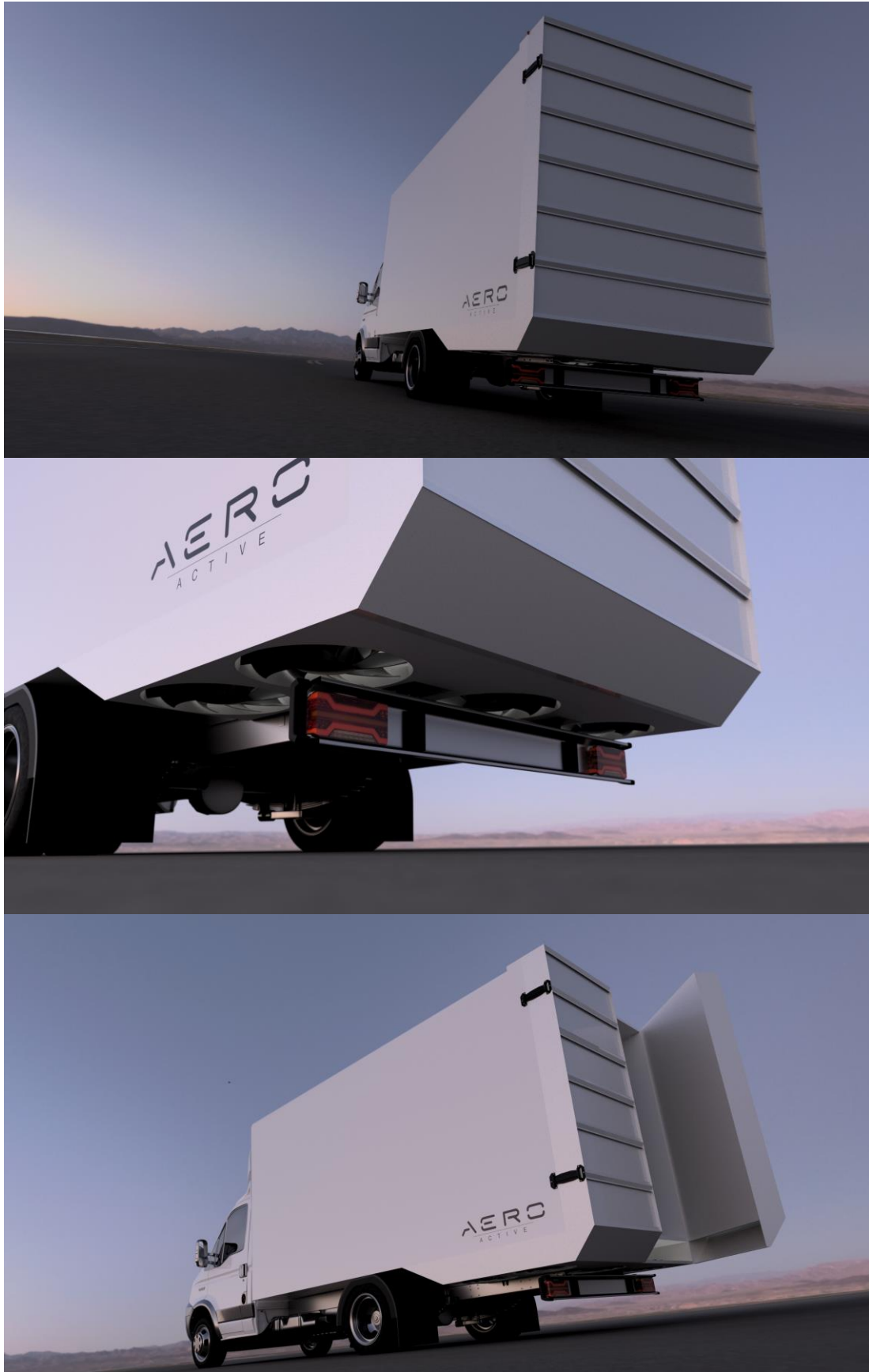


Rys. 3.2. Pojedyncza sekcja spiętrzająca.

W wyniku nieustannego wzajemnego zderzania się strumieni następuje ich częściowe wyhamowanie, skutkujące zmianą ciśnienia na powierzchniach spiętrzenia. W ten sposób pole ciśnienia na tyle pojazdu ulega znacznemu zróżnicowaniu, jednocześnie zapobiegając powstawaniu pojedynczego obszaru wysokiego podciśnienia.



Rys. 3.3. Wizualizacja ogólnej koncepcji systemu aerodynamicznego.



Rys. 3.4. Wstępna wizualizacja systemu zainstalowanego na lekkim samochodzie dostawczym.

W pierwszej wersji systemu jako generatory przepływu wykorzystane zostaną wydajne wentylatory elektryczne, które w miarę postępu technologicznego będą mogły zostać zastąpione bardziej efektywnymi rozwiązaniami. Za sterowanie pracą wentylatorów odpowiedzialny będzie dedykowany, autonomiczny sterownik. Moc wentylatorów, a tym samym siła generowana na powierzchni spiętrzenia, będzie dostosowywana w sposób aktywny do prędkości pojazdu, warunków atmosferycznych i wykonywanych manewrów.

Przedstawione rozwiązanie zostało zgłoszone do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej jako wynalazek pt.: „*Urządzenie i sposób ograniczania oporu aerodynamicznego, zwłaszcza pojazdów*”, uzyskując prawo ochronne o numerze PL241707B1.

3.2 Mechanika sekcji spiętrzającej

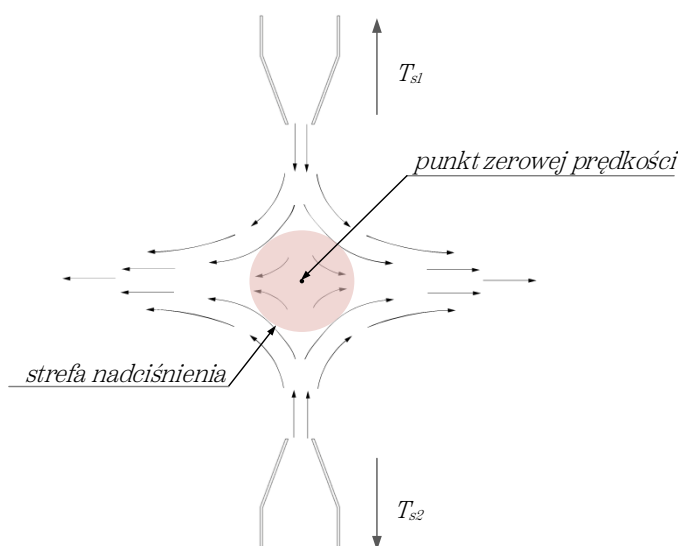
Podstawą działania proponowanego systemu aerodynamicznego jest zmiana paradygmatu dotyczącego wykorzystania strumieni powietrza jako źródła siły. Zamiast bezpośredniego wykorzystania strumieni powietrza do wytwarzania siły odrzutu, strumienie te są wykorzystywane do neutralizacji siły oporu aerodynamicznego działającej na tylną strefę pojazdu. Poprzez zderzenie ortogonalnych strumieni powietrza, zwiększa się lokalne ciśnienie za pojazdem, co redukuje opór aerodynamiczny i zmniejsza zapotrzebowanie na moc potrzebną do utrzymania stałej prędkości. W założeniach z energetycznego punktu widzenia bardziej opłacalne jest eliminowanie siły oporu niż bezpośrednio napędzanie pojazdu za pomocą odrzutu.

Przy klasycznym wykorzystaniu powietrza do celów napędowych, tak jak ma to miejsce np. w silnikach rakietowych, siła odrzutu wynika bezpośrednio z drugiej zasady Newtona i jest funkcją wiążącą masowy strumień powietrza m_s z jego prędkością v_s . Siłę ciągu generowaną przez strumień gazu wypływający z dyszy wyraża równanie:

$$T_s = m_s v_s \quad (3.1)$$

W chwili wylotu z dyszy strumień odrzutowy wchodzi w interakcję z otaczającym go powietrzem wytracając swoją energię kinetyczną. Wraz ze zwiększeniem odległości od dyszy prędkość strumienia stopniowo maleje, co ostatecznie prowadzi do jego całkowitej dyssypacji i integracji z otaczającym powietrzem.

Jeśli dwa identyczne strumienie powietrza, generowane przez podłużne dysze wykonane na wzór noży powietrznych, zostaną skierowane przeciwnie do siebie, w połowie odległości pomiędzy nimi nastąpi ich zderzenie. Zakładając idealizację przepływu, w którym dwa strumienie mają dokładnie takie same prędkości i cechy oraz zderzają się w dokładnie przeciwnych kierunkach, prędkość powietrza w miejscu zderzenia zmniejszy się do zera zaś strumienie "anulują" się nawzajem. Zgodnie z równaniem Bernoullego wyhamowanie strumieni spowoduje wzrost ciśnienia statycznego. Powstanie w ten sposób względem otaczającego powietrza lokalna strefa nadciśnienia. Pod wpływem ciągłego dopływu masy z obu dysz część płynu będzie redystrybuowana, po czym będzie kierowana w kierunkach prostopadłych względem początkowego kierunku przepływu, tworząc pewnego rodzaju "wachlarz" lub "rozbryzg".

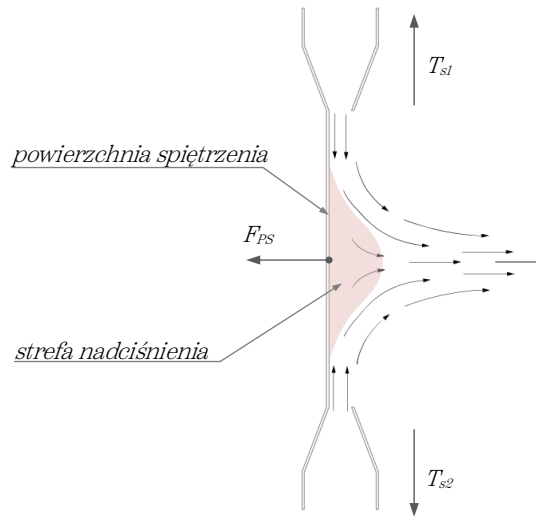


Rys. 3.5. Schematyczne zderzenie dwóch identycznych strumieni.

W warunkach rzeczywistych gdy dwa strumienie powietrzem zderzają się, jedynie część powietrza osiąga lokalną prędkość bliską zeru tworząc region wysokiego ciśnienia statycznego. W centralnym punkcie zderzenia ciśnienie statyczne jest największe jednak wraz z oddalaniem się od tego miejsca, ze względu na rosnącą prędkość płynu, ciśnienie statyczne będzie maleć. Ponadto zderzenie strumieni wywołuje lub intensyfikuje turbulencje, które wpływają na dystrybucję prędkości i ciśnienia, a w rezultacie na ogólną charakterystykę przepływu.

Jeżeli natomiast pomiędzy dwoma zderzającymi się strumieniami zostanie umieszczona przestrzeń blokująca, odpływ powietrza po zderzeniu zostanie ograniczony

wyłącznie do jednego kierunku. Powstałe w wyniku zderzeń ciśnienie statyczne oddziaływać będzie na powierzchnię spiętrzenia generując siłę ciśnieniową.



Rys. 3.6. Idea pojedynczej sekcji spiętrzającej.

Ciśnienie p_{PS} na powierzchni spiętrzenia A_{PS} będzie charakteryzować nieregularna dystrybucja. Całkowita siła F_{PS} wynikająca z działania tego ciśnienia będzie wynikiem zintegrowania jego lokalnych wartości na całej powierzchni spiętrzenia:

$$F_{PS} = \iint p_{PS} dA_{PS} \quad (3.2)$$

Ostateczna wartość tej siły będzie uzależniona od:

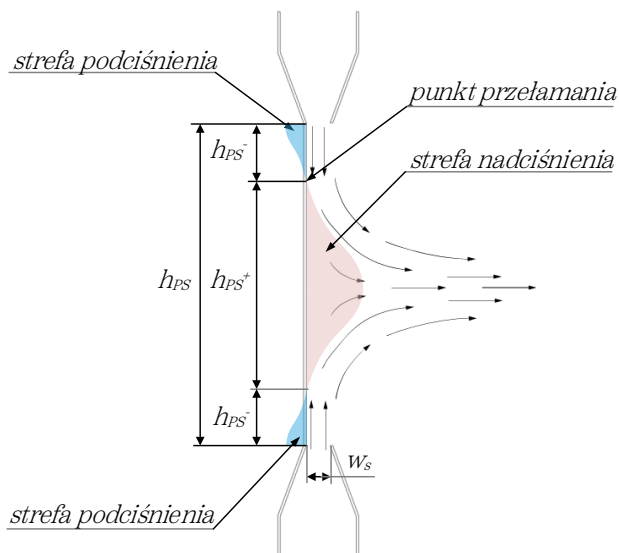
- wysokości powierzchni spiętrzenia h_{PS} i jej szerokości w_{PS} ,
- długości l_s i szerokości w_s strumieni
- prędkości strumieni v_s ,
- masowego natężenia przepływu pary strumieni spiętrzających m'_s ,
- geometrii i właściwości fizycznych powierzchni spiętrzenia.

3.3 Wyzwania badawcze i konstrukcyjne

Rozwój zaproponowanej koncepcji technologii do produktu będzie wiązać się z koniecznością rozwiązania wielu problemów, zarówno natury badawczej jak i inżynierskiej. Wyzwania te dotyczyć będą zarówno konstrukcji sekcji spiętrzających, kanałów przepływowych, systemu filtracji powietrza jak i doboru lub zaprojektowania urządzeń tłoczących, ich sterowania, a także zapewnienia źródła zasilania.

3.3.1 Efektywność aerodynamiczna

Główne wyzwanie badawcze, jednocześnie podejmowane w ramach niniejszej rozprawy, dotyczy opracowania konstrukcji kierownic powietrza w taki sposób, aby uzyskać możliwie największą siłę F_{PS} , przy jednocześnie możliwie najmniejszym zapotrzebowaniu na moc niezbędną do zasilania urządzeń tłoczących powietrze. Profile ciśnienia na powierzchniach spiętrzenia powinny być kontrolowane w taki sposób aby minimalizować wpływ zawirowań za pojazdem. Kluczem jest nie tylko stworzenie na powierzchni spiętrzenia lokalnego obszaru o większym ciśnieniu ale także zapewnienie aby ten obszar był jak największy zaś ciśnienie w nim panujące jak największe.



Rys. 3.7. Idea pojedynczej sekcji spiętrzającej.

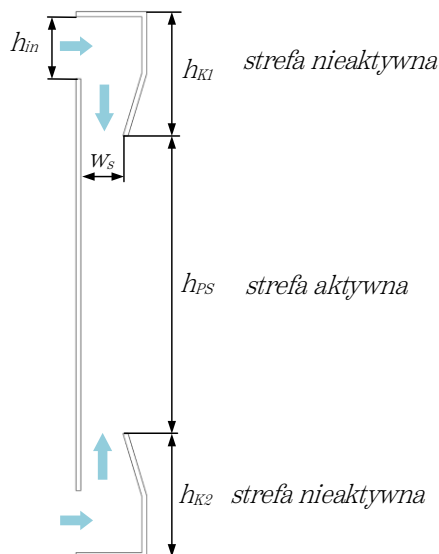
Przepływ powietrza równoległe do powierzchni spiętrzenia, zwłaszcza w bliskiej odległości od wylotu z dysz, będzie powodować lokalny spadek ciśnienia statycznego. Wraz z oddalaniem się od dysz, ciśnienie statyczne na powierzchni spiętrzenia będzie wzrastać aż do osiągnięcia wartości maksymalnej nadciśnienia w punkcie zerowej prędkości. Aby siła F_{PS} była możliwie jak największa powinny być spełnione dwa warunki. Pole powierzchni A_{PS}^+ , na które działa nadciśnienie, powinno być możliwie jak największe względem całkowitej powierzchni spiętrzenia A_{PS} :

$$\frac{A_s^+}{A_s} = \frac{h_s^+}{h_s} \rightarrow 1 \quad (3.2)$$

Jednocześnie różnica pomiędzy średnim ciśnieniem p_{PS} na powierzchni spiętrzenia a ciśnieniem otoczenia p_∞ powinna być możliwie jak największa:

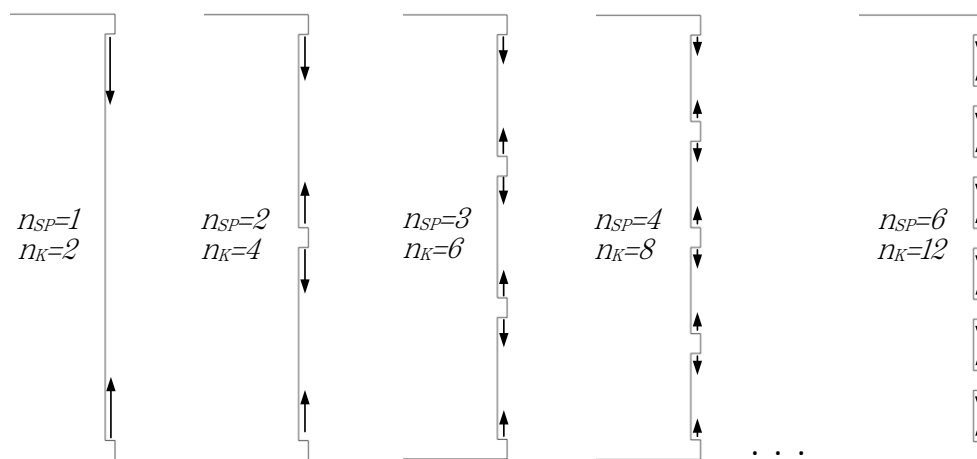
$$\frac{p_{PS}}{p_{\infty}} \rightarrow max \quad (3.3)$$

Na każdą powierzchnię spiętrzenia przypadają dwie kierownice, których zewnętrzne powierzchnie tworzą strefy „nieaktywne” aerodynamicznie. Strefy te pozostają poza wpływem nadciśnienia ze strefy spiętrzenia i najprawdopodobniej charakteryzować je będzie podciśnienie, co prowadzi do powstawania na nich siły oporu.

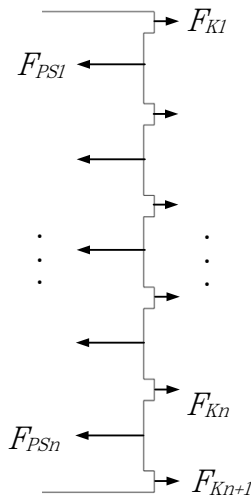


Rys. 3.8. Oznaczenia wymiarów charakterystycznych na pojedynczej sekcji spiętrzającej.

W kontekście zastosowania systemu na tylnej części pojazdu, wysokość kierownic będzie ściśle powiązana z szerokością kanałów wylotowych tworzonych przez te kierownice. Wysokość ta powinna być dostatecznie duża aby umożliwić zmianę kierunku przepływu powietrza pobieranego z głównych kanałów zasilających oraz jego stabilizację przed wypływem.



Rys. 3.9 Wizualizacja idei podziału tylnej strefy pojazdu na kolejne sekcje spiętrzające.



Rys. 3.10. Schemat rozkładu sił aerodynamicznych działających na poszczególne sekcje systemu aerodynamicznego.

Im więcej sekcji spiętrzających znajdować będzie się na tyle pojazdu oraz im szerszy będzie kanał wylotowy tworzony przez kierownice, tym większa powierzchnię stanowić będzie strefa nieaktywna. Całkowita siła F'_{SP} generowana przez wszystkie sekcje spiętrzające jest wypadkową sił działających na poszczególne powierzchnie spiętrzenia i powierzchnie zewnętrzne kierownic powietrza.

$$F'_{SP} = \sum_{i=1}^n F_{PSi} - F_{Ki} - F_{K_{n+1}} \quad (3.4)$$

Wyzwaniem konstrukcyjnym jest zaprojektowanie sekcji spiętrzających w taki sposób aby powierzchnia nieaktywna była możliwie jak najmniejsza względem możliwie jak największej powierzchni aktywnej. Jest to do osiągnięcia poprzez ograniczenie na pojeździe globalnej liczby sekcji spiętrzających, jednocześnie minimalizując szerokość strumieni w_s co skutkować będzie ograniczeniem wysokości kierownic powietrza h_K .

3.3.2 Efektywność energetyczna

W związku z koniecznością wykorzystania urządzeń przepływowych, które są niezbędne do zasilania układu tłoczącego powietrze konieczne jest uwzględnienie w całkowitym bilansie energetycznym energii niezbędnej do ich napędu. Aby ograniczenie oporu aerodynamicznego miało wymiar praktyczny i znacząco wpływało na oszczędność mocy niezbędnej do napędu pojazdu, całkowity koszt energetyczny wytworzenia bariery aerodynamicznej musi być znacznie

mniejszy niż moc zużywana do napędu urządzeń tłoczących. Oznacza to, że całkowita moc oporów aerodynamicznych pojazdu wyposażonego w system aerodynamiczny P'_{aero} , z uwzględnieniem mocy niezbędnej do zasilania urządzeń tłoczących P_{fan} oraz strat P_Q wynikających z konieczności transportu dodatkowej masy elementów systemu, powinna być znacząco mniejsza od mocy oporów aerodynamicznych pojazdu bez systemu:

$$P'_{aero} + P_{fan} + P_Q \ll P_{aero} \quad (3.5)$$

Powiększanie tej różnicy prowadzi do zwiększania oszczędności energii napędowej.

3.3.3 Źródło zasilania

Kluczowym wyzwaniem w implementacji proponowanego systemu aerodynamicznego jest dostępność mocy do zasilania jego składników. Źródło tej mocy może być zróżnicowane – od rozwiązań elektrycznych i mechanicznych czerpiących energię bezpośrednio z napędu pojazdu, przez opcje hybrydowe, aż po niezależne źródła takie jak pakiety akumulatorów czy dedykowane generatory. Biorąc pod uwagę specyfikę systemu, rozwiązaniem optymalnym wydaje się uzależnienie systemu aerodynamicznego od układu napędowego pojazdu. Taka integracja nie tylko pozwala zredukować masę systemu, ale także eliminuje pewne ograniczenia jak m.in. potrzeba montowania oddzielnego, dedykowanego źródła zasilania i systemu jego ładowania. W przypadku napędów hybrydowych czy całkowicie elektrycznych, ze względu na zakładany dodatni bilans energetyczny, wykorzystanie tej samej energii do napędu systemu aerodynamicznego wydłuży zasięg pojazdu. W samochodach z napędem spalinowym taka konfiguracja pozwoli na nieprzerwane działanie systemu niezależnie od pokonywanego dystansu. W przypadku tej grupy pojazdów istotne jest jednak na wstępie zdefiniowanie potencjalnego źródła zasilania oraz ocena dostępnej mocy elektrycznej.

Standardowo montowane alternatory w pojazdach spalinowych dostarczają moc na poziomie niezbędnym do pokrycia zapotrzebowania systemów pokładowych oraz nieznaczny zapas przeznaczony do ładowania akumulatorów. Konsultacje przeprowadzone przez autora z przedstawicielami czołowych producentów pojazdów ciężarowych jak Solaris, Renault, MAN, Iveco oraz Mercedes-Benz

potwierdziły możliwość integracji dodatkowych alternatorów zarówno w pojazdach lekkich jak i ciężkich, dysponujących mocami przekraczającymi 2 kW. Pojazdy ciężkie oferują znacznie szerszy zakres dostępnej mocy w porównaniu z lekkimi pojazdami dostawczymi, głównie ze względu na możliwość integracji z silnikiem spalinowym dedykowanych generatorów elektrycznych dużej mocy, standardowo wykorzystywanych jako źródło zasilania specjalistycznych zabudów, jak m.in. chłodnie. Nowoczesne generatory tego typu oferują moce przekraczające 30 kW.

3.3.4 Wyzwania konstrukcyjne

Konstrukcja kierownic powietrza i przestrzeni przepływowych powinna być zaprojektowana tak, aby nie komplikować eksploatacji pojazdu, zwłaszcza podczas prac załadunkowych i rozładunkowych. Poszczególne elementy systemu powinny cechować się odpowiednią wytrzymałością i trwałością, przystosowaną do wymagających warunków operacyjnych, oraz możliwie jak najmniejszą masą. Aspekt ten jest szczególnie istotny w kontekście lekkich pojazdów ciężarowych o dopuszczalnej masie całkowitej do 3,5 tony. Ponadto system aerodynamiczny, który ma być uniwersalny dla różnych rodzajów pojazdów, wymaga podejścia modułowego. Oznacza to, że główne komponenty systemu powinny być zaprojektowane w taki sposób, aby mogły być łatwo dostosowywane do różnych konstrukcji pojazdów, zarówno nowych, jak i używanych.

Kolejnym wyzwaniem będzie dobranie, a niewykluczone że zaprojektowanie urządzeń przepływowych tak, aby gwarantować odpowiedni przepływ i spiętrzenie strumienia powietrza, jednocześnie zapewniając wysoką efektywność procesu przy niskiej energochłonności. Urządzenia zasilające system aerodynamiczny będą miały kluczowe znaczenie dla ogólnej efektywności energetycznej. Konstrukcja urządzeń przepływowych i kanałów transportujących powietrze powinna minimalizować opory przepływu. Ponadto, ważne jest, aby była wyposażona w system filtracji powietrza, ponieważ strumienie powietrzne w sekcji podwozia często niosą ze sobą zanieczyszczenia takie jak błoto, piasek czy woda.

W kontekście technologii mających na celu oszczędność zużycia paliwa w sektorze motoryzacyjnym, niezbędne jest uwzględnienie nie tylko bezpośrednich korzyści płynących z redukcji oporu aerodynamicznego, ale również kosztów związanych z zakupem, montażem i konserwacją takiego systemu. Kluczowym parametrem przy ocenie opłacalności takiej inwestycji w branży

motoryzacyjnej jest czas zwrotu z inwestycji. Istotne jest, aby początkowe nakłady finansowe były kompensowane przez oszczędności w perspektywie długoterminowej, a okres zwrotu z inwestycji był akceptowalny z ekonomicznego punktu widzenia.

Metody numeryczne w badaniach aerodynamiki pojazdów

W niniejszym rozdziale przedstawiono podstawowe informacje dotyczące komputerowej mechaniki płynów w kontekście symulacji opływu pojazdów komercyjnych oraz ich certyfikacji. Przedstawiono również fundamentalne równania rządzące mechaniką płynów oraz metody symulowania turbulencji, a także metody automatyzacji i optymalizacji obliczeń w odniesieniu do jednego z najbardziej popularnych na rynku pakietów oprogramowania komercyjnego.

4.1 Wprowadzenie do komputerowej mechaniki płynów

Sukcesywny rozwój technologii i wzrost mocy obliczeniowej komputerów prowadzi do zastępowania klasycznych metod obliczeniowych przez metody numeryczne. Współczesne obliczenia przepływów przeprowadza się przeważnie z wykorzystaniem Komputerowej Mechaniki Płynów (CFD). Metody komputerowe skracają czas wstępnej weryfikacji zagadnień i optymalizacji konstrukcji ale przede wszystkim obniżają koszty badań eksperymentalnych. Komputerowa mechanika płynów stanowi potężne narzędzie, będące naturalną ewolucją klasycznej mechaniki płynów. CFD wykorzystuje techniki numeryczne i algorytmy komputerowe do rozwiązywania równań opisujących przepływy, transfer ciepła oraz reakcje chemiczne w płynie. W praktyce CFD polega na wykonaniu wirtualnego modelu płynu, który reprezentuje badane zagadnienie a następnie podzieleniu (dyskretyzacji) tego modelu na miliony, setki milionów, a nawet miliardy małych elementów nazywanych komórkami, węzłami lub elementami siatki. Równania klasycznej mechaniki płynów są następnie rozwiązane numerycznie dla każdego z tych elementów, co pozwala na przewidywanie prędkości, ciśnienia i innych istotnych parametrów przepływu w całym badanym obszarze. Dzięki zdolności do szybkiego modelowania złożonych przepływów i interakcji w różnych skalach, CFD stała się kluczowym narzędziem badawczym w wielu dziedzinach inżynierii, w tym również aerodynamiki pojazdów drogowych, umożliwiając lepsze zrozumienie zjawisk przepływowych i projektowanie oraz optymalizację technologii ograniczających opór aerodynamiczny.

4.2 Symulacje numeryczne w badaniach i certyfikacji pojazdów ciężarowych

Tradycyjne metody badania aerodynamiki pojazdów opierają się głównie na testach drogowych i eksperymentach w tunelach aerodynamicznych. Badania drogowe są kosztowne, czasochłonne i uzależnione od warunków pogodowych co sprawia, że trudno je standaryzować i powtarzać. Badania w tunelach aerodynamicznych, pomimo że zapewniają kontrolowanie i powtarzalne warunki, zazwyczaj przeprowadzane są na uproszczonych i skalowanych modelach. To z kolei może prowadzić do błędów związanych ze stosowaniem kryteriów podobieństwa, które jest konieczne do ekstrapolacji wyników w celu ich odniesienia do rzeczywistych pojazdów. Infrastruktura do przeprowadzania badań tunelowych

jest ponadto kosztowna a przygotowywanie modeli pojazdów jest zarówno kosztowne jak i czasochłonne.

Atrakcyjną alternatywę to tradycyjnych metod stanowi komputerowa mechanika płynów, która umożliwia przeprowadzanie coraz dokładniejszych symulacji, w coraz krótszym czasie i bez konieczności prowadzenia badań na rzeczywistym pojeździe. To natomiast oznacza, że weryfikacja nowych technologii np. mających na celu redukcję oporu aerodynamicznego pojazdów nie wymaga konstruowania ich fizycznych prototypów. Dzięki kontrolowanemu wirtualnemu środowisku możliwe jest powtarzalne badanie wirtualnego modelu pojazdu w dowolnych warunkach atmosferycznych a także przeprowadzenie symulacji dla różnych scenariuszy, które mogą być trudne lub niemożliwe do odtworzenia w rzeczywistych testach jak na przykład ekstremalne warunki pogodowe lub sytuacje awaryjne.

Głównym ograniczeniem CFD w kontekście symulacji aerodynamiki pojazdów jest wciąż dostępna moc obliczeniowa współczesnych systemów komputerowych, która ma bezpośredni wpływ na metodykę a tym samym dokładność modelowania przepływów. Mechanika płynów dostarcza równania, które w teorii umożliwiają pełny opis nawet najbardziej skomplikowanych przepływów. Pełny opis turbulencji, poprzez bezpośrednie modelowanie wszystkich jej skal dla problemów typowo przemysłowych, wciąż jednak pozostaje poza możliwościami obliczeniowymi nawet najbardziej zaawansowanych systemów komputerowych. Z uwagi na te ograniczenia, przez lata opracowywano i nadal opracowuje się różne metody upraszczające modelowanie rzeczywistych przepływów. Te uproszczenia, mimo że prowadzą do pewnych kompromisów w zakresie dokładności wyników, pozwalają na prowadzenie analiz w ramach współczesnych zasobów obliczeniowych.

Pomimo wciąż ograniczonej dokładności, znaczenie symulacji komputerowych w przemyśle motoryzacyjnym nieustannie rośnie. Narzędzia CFD są powszechnie wykorzystywane przez większość producentów pojazdów ciężarowych, począwszy od wstępnych szkiców koncepcyjnych aż do finalnych projektów gotowych do produkcji [84]. Przykładami takich prac są publikacje DAF Trucks [85], DAIMLER Trucks North America [86, 87], FORD OTOSAN [88, 89], MAN Trucks [90], SCANIA [91-93] czy VOLVO Trucks [94]. Należy w tym miejscu jednak podkreślić, że zdecydowana większość prac nie jest publikowana w celu zachowania konkurencyjności. Coraz częściej również i autorzy rozpraw doktorskich dotyczących aerodynamiki

pojazdów opierają swoje analizy głównie lub wyłącznie na wynikach symulacji czego przykładami są prace [94-109].

O rosnącej popularności i roli CFD świadczy jednak najlepiej fakt uwzględnienia tej metody w ramach oficjalnych procedur dotyczących sposobu wyznaczania oporu aerodynamicznego pojazdów ciężarowych na cele certyfikacji ich emisyjności. W kontekście certyfikacji CO₂ cechy aerodynamiczne pojazdu są reprezentowane przez wartość parametru nazywanego powierzchnią oporu aerodynamicznego (C_{dA}), stanowiącego iloczyn współczynnika oporu aerodynamicznego i powierzchni pojazdu rzutowanej w kierunku względnego kąta odchylenia [110]. Zależnie od kraju i regionu obowiązują inne regulacje dotyczące sposobu certyfikacji zużycia paliwa i emisji CO₂, co powoduje że akceptowane metody określania C_{dA} również się różnią. Pomimo, że preferowaną metodą w Stanach Zjednoczonych jest metoda wybiegu, zgodnie z przyjętymi regulacji [111] i ich późniejszych zmianami [112, 113], metoda wybiegu, symulacje CFD i testy w tunelach aerodynamicznych zostały uznane za narzędzia równoważne. Warunkiem uznania wyników jest przeprowadzenie symulacji zgodnie z prawem 40 CFR §1037.532 [114], które opiera się na wytycznych SAE International J2966 [1]. Dokument ten zawiera ogólne wymagania dotyczące użycia metod CFD w symulacjach aerodynamiki pojazdów komercyjnych średniej i ciężkiej kategorii, takie jak minimalne wymiary obszaru obliczeniowego, minimalna liczba komórek, rozdzielczość warstwy przyściennej, intensywność turbulencji przepływu powietrza napływającego czy kryteria zbieżności.

Regulacje obowiązujące w Kanadzie zostały przyjęte na wzór, przyjętych w Stanach Zjednoczonych. Pomimo, że preferowaną metodą również jest metoda wybiegu, regulacje pozwalają na określenie powierzchni oporu za pomocą alternatywnej metody testowej zgodnie z przepisami amerykańskimi [115].

Inaczej wygląda proces certyfikacji w obszarze Unii Europejskiej, gdzie jedyną akceptowaną metodą wyznaczania C_{dA} są badania drogowe pojazdu przy stałej prędkości. Sposób badań i wymagania dotyczące toru oraz aparatury badawczej na pojeździe przedstawia rozporządzenie UE 2017/2400 UE [116]. Producent nie musi jednak certyfikować każdego typu pojazdu osobno. Może podzielić je na grupy, z których wyznaczy po jednym reprezentancie, nazwanym pojazdem macierzystym [117]. Wszystkie pojazdy w danej grupie muszą mieć taką samą lub mniejszą wartość C_{dA} względem odpowiadającego grupie pojazdu macierzystego przy czym wnioskodawca musi udowodnić ten fakt przedstawiając np. wyniki symulacji CFD [116].

Aktualnie trwają dyskusje na temat uwzględnienia symulacji CFD w szerszym zakresie jako metod m.in. do generowania certyfikowanych wyników C_{DA} dla pojazdów ciężarowych, co zostało zaproponowane przez ACEA [118]. Pomimo, że certyfikacja pojazdów ciężarowych w oparciu o wyniki symulacji CFD nie jest jeszcze akceptowana, UE dopuszcza certyfikację urządzeń aerodynamicznych do tych pojazdów wyłącznie w oparciu o symulacje CFD [119]. Wymogiem jest przeprowadzenie badań w oparciu o model referencyjny, który udostępnia UE. Model ten został opracowany w oparciu o te same wytyczne co w przypadku rynku amerykańskiego, czyli SAE J2966 [120].

Wśród różnych metod numerycznych wytyczne SAE J1966 dopuszczają wyniki symulacji wykonane w oparciu o jedną z dwóch równoważnych metod: metodę siatkową Boltzmanna (LBM) lub metodę opartą na równaniach Naviera-Stokesa (NS). Pierwsza z nich opiera się na teorii kinetycznej i opisuje fizykę bazując na dyskretnym modelowaniu cząsteczek płynu i ich wzajemnych oddziaływań. Punktem wyjścia jest równanie Boltzmanna, które opisuje zachowanie statystyczne cząstek w płynie. Wielkości fizyczne płynu są przybliżane za pomocą symulacji procesów przepływu i zderzeń cząstek na strukturyzowanej siatce [121]. Natomiast w metodzie NS mikrostrukturę i naturę cząsteczkową pomija się, co pozwala traktować płyn jako ośrodek ciągły (tzw. kontinuum) [122]. Równania opisujące płyn rozwiązywane dla kolejnych, połączonych ze sobą za pomocą węzłów objętości płynu, łącznie tworzących domenę obliczeniową.

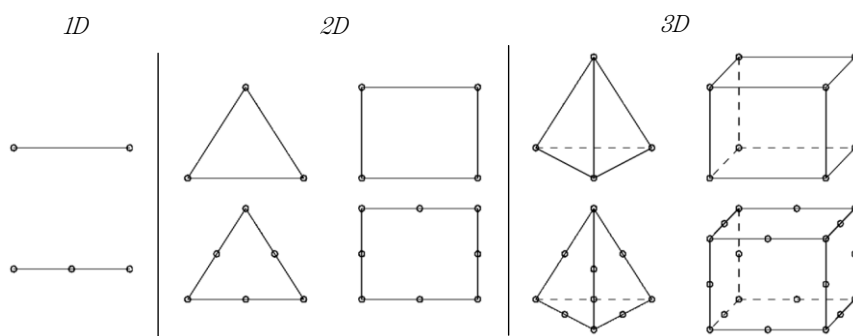
Pomimo że LBM jest techniką bardziej zaawansowaną i szczegółową w porównaniu do tradycyjnych metod opartych na NS, jednym z głównych atutów metod NS jest możliwość przeprowadzania symulacji w trybie stacjonarnym. Jest to szczególnie korzystne w kontekście szybkiej weryfikacji prototypów lub w procesie ich projektowania. W wielu przypadkach inżynierskich końcowy stan przepływu jest bardziej istotny niż jego ewolucja w czasie a symulacje stacjonarne umożliwiają szybsze uzyskanie tych informacji. Ponieważ autor wykorzystuje do weryfikacji koncepcji technologii pakiet komercyjnego oprogramowania opartego na równaniach NS, dalszy opis będzie odnosił się do tej metody.

4.3 Podstawowe równania komputerowej mechaniki płynów

Hipoteza ciągłości ośrodka płynnego jest wyjątkowo korzystna z matematycznego punktu widzenia, ponieważ pozwala traktować podstawowe

wielkości fizyczne i kinematyczne płynu jako ciągłe funkcje współrzędnych przestrzennych x, y, z oraz czasu t [123]. Ciągłość funkcji umożliwia użycie narzędzi analizy matematycznej takich jak różniczkowanie i całkowanie. Dzięki temu numerycznie łatwiejsze staje się formułowanie i rozwiązywanie równań opisujących ruch płynu.

Rozwiązanie zagadnienia brzegowego polega na znalezieniu funkcji, która spełnia cząstkowe równania różniczkowe wewnątrz badanego obszaru oraz określone warunki brzegowe na jego granicy. Warunki brzegowe mogą obejmować wartości prędkości, ciśnienia, temperatury czy też wartości innych wielkości fizycznych [124]. Bez zdefiniowanych warunków brzegowych równania cząstkowe mogą mieć nieskończenie wiele rozwiązań co sprawia, że są one niepraktyczne w zastosowaniach inżynierskich [125]. Aby uzyskać ich przybliżone rozwiązanie w praktyce inżynierskiej stosuje się metody numeryczne [126]. W kontekście symulacji aerodynamiki pojazdów do rozwiązywania zagadnień brzegowych i modelowania zachowania płynu w interakcji z powierzchnią pojazdu stosuje się metodę objętości skończonych. MOS dyskretyzuje obszar na skończoną liczbę objętości kontrolnych przekształcając ciągłe równania różniczkowe w zestaw dyskretnych równań algebraicznych, które mogą być rozwiązane numerycznie. Metoda ta stała się jednym z podstawowych narzędzi w dziedzinie CFD, głównie ze względu na wysoką elastyczność w stosowaniu do złożonych geometrii oraz wydajność w modelowaniu zjawisk fizycznych. Ponieważ analizowany obszar jest podzielony na komórki (dyskretyzowany), rozwiązanie jest przybliżeniem "prawdziwego" rozwiązania ciągłego, a to z kolei prowadzi do pewnego błędu numerycznego [127]. Kluczem do uzyskania dokładnych i fizycznie wiarygodnych wyników a jednocześnie obliczonych w rozsądnym czasie, jest zapewnienie odpowiedniej jakości siatki, co oznacza odpowiednie zagęszczenie objętości kontrolnych w obszarach o dużych gradientach i złożonych geometriach.



Rys. 4.1. Popularne typy elementów kontrolnych w jednym, dwóch i trzech wymiarach dla dyskretyzacji pierwszego rzędu (górną) i drugiego rzędu (dolną) [128].

4.3.1 Równania transportu

W mechanice płynów fundamentalne znaczenie odgrywają prawa zachowania masy, pędu i energii. Równania zachowania, inaczej nazywane równaniami transportu, które wynikają z praw zachowania dostarczają pełnego obrazu mechanizmów rządzących parametrami rzeczywistego płynu w różnorodnych warunkach.

Prawo zachowania masy

Zgodnie z jej prawem zachowania, masa znajdująca się w izolowanym systemie nie może zostać samoistnie stworzona ani zniszczona. W kontekście mechaniki płynów oznacza to, że jeśli określona ilość płynu wpłynie do pewnego obszaru, to taka sama ilość musi z niego wypłynąć. W mechanice płynów prawo zachowania masy jest przedstawiane jako równanie transportu masy, inaczej nazywane równaniem ciągłości [126]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho V = 0 \quad (4.1)$$

gdzie prędkość lokalna płynu jest wyrażona jako wielkość wektorowa $V = [u, v, w]$.

W płynach ściśliwych zmiany gęstości mogą wynikać z fluktuacji ciśnienia, temperatury oraz innych czynników. Równanie ciągłości bierze pod uwagę te zmienne opisując dynamikę gęstości i prędkości płynu w funkcji czasu i przestrzeni. Pomimo, że powietrze jest płynem ściśliwym, przy prędkościach znacznie mniejszych od prędkości dźwięku, takich jak typowe prędkości z jakimi poruszają się samochody ciężarowe, efekty ściśliwości powietrza są pomijalnie małe [129]. W związku z tym, w analizach aerodynamiki samochodów ciężarowych powietrze jest z reguły traktowane jako nieściśliwe, co pozwala na traktowanie go jako płynu o stałej gęstości. Przy założeniu stałej gęstości równanie (4.1) zostaje uproszczone do postaci [130]:

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (4.2)$$

które w kartezjańskim układzie współrzędnych przyjmuje postać [130]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.3)$$

W tej formie główna funkcja równania sprowadza się do możliwości analizy zmian prędkości płynu względem przestrzeni, przez którą ten płyn przepływa.

Prawo zachowania pędu

Prawo zachowania pędu, wynikające z drugiej zasady dynamiki Newtona wyraża założenie, że jeżeli na układ nie działają żadne siły zewnętrzne suma pędów wszystkich obiektów składających się na ten układ pozostaje niezmienną. Oznacza to, że aby spowodować zmianę pędu układu konieczne jest działanie siły zewnętrznej [131]. Pęd jest wielkością wektorową definiowaną jako iloczyn masy obiektu i jego prędkości, zaś siła działająca na ciało jest proporcjonalna do zmiany pędu w jednostce czasu. W aspekcie aerodynamiki pojazdów ciężarowych każde oddziaływanie pojazdu na powietrze prowadzące do modyfikacji jego pędu skutkuje pojawieniem się sił aerodynamicznych oddziałujących na pojazd. Matematycznym wyrażeniem tego prawa w mechanice płynów jest równanie zachowania pędu, inaczej nazywane równaniem transportu pędu. Równanie to opisuje zmianę pędu pod wpływem zewnętrznych sił takich jak gradienty ciśnienia, siły lepkościowe oraz grawitacja. Bilansując te siły możliwe jest przewidywanie zmian prędkości płynu w zależności od czasu i położenia w przestrzeni. W odniesieniu do płynu przechodzącego przez nieruchomą objętość kontrolną równanie zachowania pędu można zgodnie z [132] wyrazić jako:

$$\rho \frac{dV}{dt} = \rho f + \nabla \cdot \Pi_{ij}, \quad (4.4)$$

Pierwszy termin po prawej stronie równania (3.4) reprezentuje siłę działającą na całą masę płynu, wyrażoną na jednostkę objętości elementu płynu. Najczęściej jest to siła grawitacyjna. Drugi składnik reprezentuje siły powierzchniowe na jednostkę objętości elementu płynu. Gdy płyn jest lepki, pod wpływem sił reaguje jak ciało sprężyste, które opiera się deformacjom [132]. Dla każdego gazu, który można modelować jako ośrodek ciągły oraz dla większości cieczy naprężenia w danym punkcie są proporcjonalne do szybkości odkształcenia (deformacji) płynu [134]. Płyny, które wykazują takie zachowanie klasyfikuje się jako płyny newtonowskie [42]. Założenie płynu newtonowskiego może być przyjęte w przypadku prawie wszystkich praktycznych problemów aerodynamicznych i umożliwia wyprowadzenie ogólnego prawa deformacji, które łączy tensor naprężenia z ciśnieniem i składowymi prędkościami [135]. Naprężenia całkowite w płynie składają się z naprężeń normalnych oraz ścinających i są reprezentowane przez składowe tensora naprężeń, [133]:

$$\Pi_{ij} = -p\delta_{ij} + \tau_{ij} \quad (4.5)$$

Dla płynu nieściśliwego tensor naprężeń lepkich τ_{ij} przyjmuje postać [136]:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.6)$$

Podstawienie równania (4.6) do (4.5) prowadzi do wyprowadzenia równania NS dla nieściśliwego płynu newtonowskiego, które zgodnie z [133] można zapisać w uproszczonej formie:

$$\rho \frac{dV}{dt} = \rho g - \nabla p + \mu \nabla^2 V \quad (4.7)$$

lub w formie skalarnych równań w kartezjańskim układzie współrzędnych [137]:

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (4.8)$$

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (4.9)$$

$$\rho \frac{dw}{dt} = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4.10)$$

Powyższe równania stanowią rozszerzenie równań Eulera poprzez uwzględnienie efektów lepkościowych w przepływie [138]. W połączeniu z równaniem ciągłości umożliwiają opis przepływu nieściśliwego płynu lepkiego, co ma bezpośrednie zastosowanie do analiz aerodynamiki pojazdów.

Prawo zachowania energii

W trakcie analiz dynamiki płynu konieczne może być uwzględnienie nie tylko zachowania jego masy oraz sił oddziałujących na płyn ale również przepływu energii w obrębie tego płynu [139]. Zgodnie z prawem zachowania energii, energia w zamkniętym systemie jest stała. Oznacza to, że energia nie może być tworzona ani niszczone ale może być przekształcana z jednej formy w inną. Matematycznym wyrażeniem prawa zachowania energii w kontekście przepływu płynów jest równanie energii, które opisuje jak energia płynu zmienia się w czasie i przestrzeni, uwzględniając przewodnictwo cieplne, konwekcję oraz źródła lub straty ciepła w wyniku reakcji chemicznych lub promieniowania [140]. Dla nieściśliwego przepływu, w którym współczynnik przewodzenia ciepła jest przyjęty jako stały, równanie energii zgodnie z [133] można przedstawić w postaci:

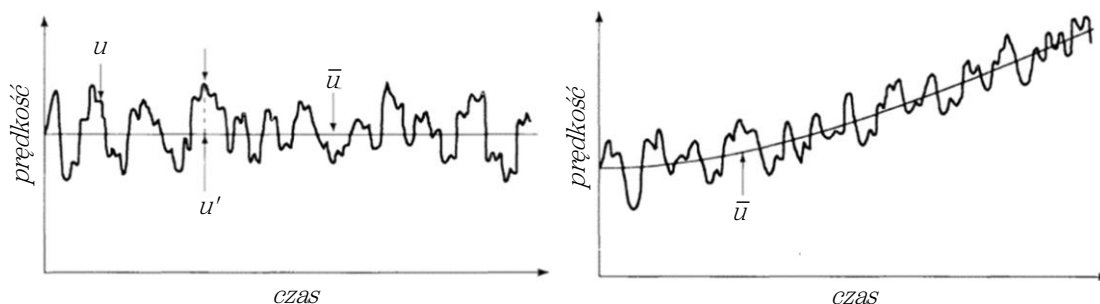
$$\rho \frac{de}{dt} = \frac{\partial Q}{dt} + k' \nabla^2 T + \phi \quad (4.11)$$

Składniki po lewej stronie równania reprezentują akumulację oraz stratę energii w obrębie danego elementu płynu wynikającą z procesów adwekcyjnych, przewodzenia i dyfuzji cieplnej oraz odzwierciedlają zmiany w energii wewnętrznej płynu w czasie. Prawa strona równania opisuje różne składniki wpływające na bilans energii. Przedstawia jak ciepło jest dostarczane lub odbierane z systemu, opisuje przewodzenie ciepła przez płyn oraz tempo zużywania energii mechanicznej w procesie deformacji płynu spowodowanej lepkością [133].

W kontekście badań oporu aerodynamicznego samochodów ciężarowych główny nacisk kładziony jest zazwyczaj na równanie ciągłości i równania NS, które opisują przepływ powietrza wokół pojazdu. Jeśli analiza skupia się wyłącznie na zewnętrznym przepływie powietrza wokół pojazdu oraz na analizie sił aerodynamicznych zaś potencjalne zmiany temperatury na przykład wynikające z tarcia powietrza są zaniebywane, równanie energii może nie być konieczne do uwzględnienia w obliczeniach. Uwzględnienie tego równania zależy jednak od specyfiki analizy i badanego problemu. W pewnych przypadkach dotyczących analizy pojazdów równanie energii może być konieczne. Przykładami takich analiz mogą być badania układów hamulcowych, systemów wentylacji czy chłodzenia układu napędowego lub porównanie oporu aerodynamicznego w różnych warunkach atmosferycznych.

4.3.2 Równania Reynoldsa dla przepływów turbulentnych

Ze względu na chaotyczne, trójwymiarowe i czasowo zmienne charakterystyki przepływu, turbulentne przepływy są trudne do obliczenia bezpośrednio z równań NS [139]. Jedną z metod uproszczenia problemu numerycznego, związanego z modelowaniem przepływów turbulentnych, stanowią równania Reynoldsa znane również jako Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS.) Zgodnie z hipotezą Reynoldsa chwilowe wartości wszystkich charakteryzujących przepływ wielkości fizycznych w danym punkcie obszaru przepływu są sumą wielkości uśrednionych w czasie i składowej fluktuacji (turbulencji), która jest losową funkcją czasu i przestrzeni. Rozkład ten nosi nazwę dekompozycji Reynoldsa [141].



Rys. 4.2. Przykład uśrednionych prędkości zgodnie z dekompozycją Reynoldsa, a – przepływ ustalony w czasie, b – przepływ nieustalony [142].

Prędkość płynu w przepływach turbulentnych może być rozdzielona na składnik uśredniony w czasie i składnik fluktuacyjny [142]:

$$u = \bar{u} + u' \quad v = \bar{v} + v' \quad w = \bar{w} + w' \quad (4.12)$$

Zastosowanie tej koncepcji do równań NS przekształca je do postaci znanej jako równanie Reynoldsa, które dla płynu nieściśliwego może być zgodnie [143] zapisane w postaci:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \bar{u}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \rho g - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}') \quad (4.13)$$

gdzie tensor naprężeń lepkich dla prędkości uśrednionej przyjmuje postać:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.14)$$

zaś równanie ciągłości części średniej [143]:

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (4.15)$$

co jest równoważne z zapisem:

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (4.16)$$

Ponieważ równania NS są nieliniowe każdy proces ich uśredniania prowadzi do pojawienia się dodatkowej niewiadomej określanej jako tensor naprężeń Reynoldsa, który reprezentuje wpływ fluktuacji prędkości na przepływ i dla przepływu nieściśliwego może być zapisany jako [133]:

$$\tau_{ij}' = -\rho \overline{u_i' u_j'} \quad (4.17)$$

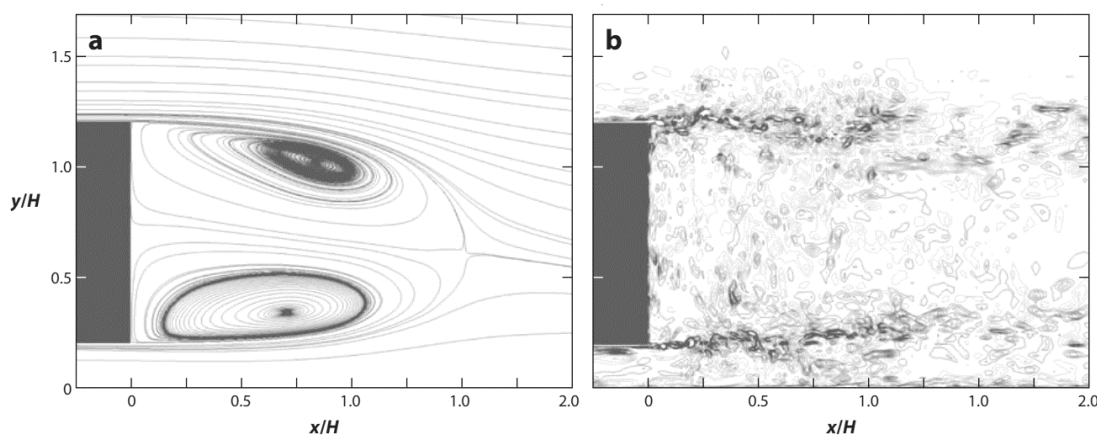
Ze względu na złożoną ilość niewiadomych występujących w powyższych równaniach nie można ich rozwiązać nawet po uwzględnieniu warunków brzegowych. Ta nierównowaga jest znana jako problem domknięcia [144]. Do zamknięcia układu wymagane są dodatkowe związki funkcyjne, które określa się modelami turbulencji [27]. Obecnie w celu “domknięcia” układu równań zgodnie z [139] stosuje się powszechnie dwie metody:

1. Modele lepkości turbulentnej – modele lepkości polegające na wykorzystaniu hipotezy Boussinesqa, zgodnie z którą naprężenia turbulentne są proporcjonalne do prędkości deformacji i wyrażone są za pomocą dynamicznego współczynnika lepkości turbulencji μ_t .
2. Modele naprężeń Reynoldsa – modele polegające na bezpośrednim modelowaniu równań opisujących składowe tensora naprężeń bez wykorzystania koncepcji lepkości turbulentnej. To podejście może dawać bardziej dokładne wyniki ponieważ nie opiera się na uproszczeniach związanych z koncepcją lepkości turbulentnej ale jest bardziej złożone obliczeniowo. Naprężenia Reynoldsa są obliczane bezpośrednio z własnych równań transportu, które uwzględniają procesy generacji, dyfuzji, konwekcji i dyssypacji turbulencji.

Zarówno modele lepkościowe, jak i modele naprężeń Reynoldsa stanowią podstawę solverów w większości komercyjnych pakietów numerycznych CFD. Jednymi z najczęściej używanych modeli turbulencji w zastosowaniach przemysłowych, w tym do analiz aerodynamiki pojazdów, są modele $k-\epsilon$ *Realizable* oraz $k-\omega$ *SST*. Model $k-\epsilon$ *Realizable* jest udoskonaloną wersją standardowego modelu $k-\epsilon$, z nową formułą lepkości turbulentnej oraz nowym równaniem dla szybkości dyssypacji ϵ . W porównaniu do standardowego modelu $k-\epsilon$, model *Realizable* lepiej przewiduje przepływy z rotacją, warstwy przyścienne pod silnymi gradientami ciśnienia, separację i recyrkulację. Główną zaletą tego modelu to możliwość stosowania funkcji ściany, co eliminuje konieczność pełnego modelowania warstw przyściennych, zastępując je odpowiednimi równaniami matematycznymi. To prowadzi do obniżenia czasu obliczeń, co ma szczególne znaczenie w symulacjach dużych obiektów. Model $k-\omega$ *SST* to również model dwurównaniowy, który do obliczenia lepkości turbulentnej wykorzystuje kinetyczną energię turbulencji k oraz specyficzną szybkość

jej rozpraszania ω . Zapewnia płynne przejście od modelu $k-\omega$, stosowanego w warstwie przyściennej, do modelu $k-\varepsilon$ w miarę oddalania się od powierzchni pojazdu. Model ten jest szczególnie skuteczny w przypadkach, gdzie występują efekty ściennie oraz duże gradienty ciśnienia. Ponieważ wymaga rozwiązania pełnej warstwy przyściennej, a tym samym znacznie większej liczby elementów siatki, symulacje oparte o ten model dostarczają bardziej dokładne wyniki, lecz kosztem znacznie dłuższego czasu obliczeń niż w przypadku modelu $k-\varepsilon$ *Realizable* [145-147].

Wszystkie modele z rodziny RANS mogą być rozwiązane w sposób stacjonarny lub niestacjonarny. W podejściu stacjonarnym zakłada się, że przepływ osiągnął stan równowagi i nie zmienia się w czasie zaś wszystkie zmienne przepływu (np. prędkość, ciśnienie) zmieniają się jedynie w przestrzeni. Pozwala to na uproszczenie obliczeń i oszczędność czasu obliczeniowego. W wielu rzeczywistych przypadkach przepływ może jednak wykazywać fluktuacje w czasie, które mogą mieć znaczący wpływ na dokładność wyników.



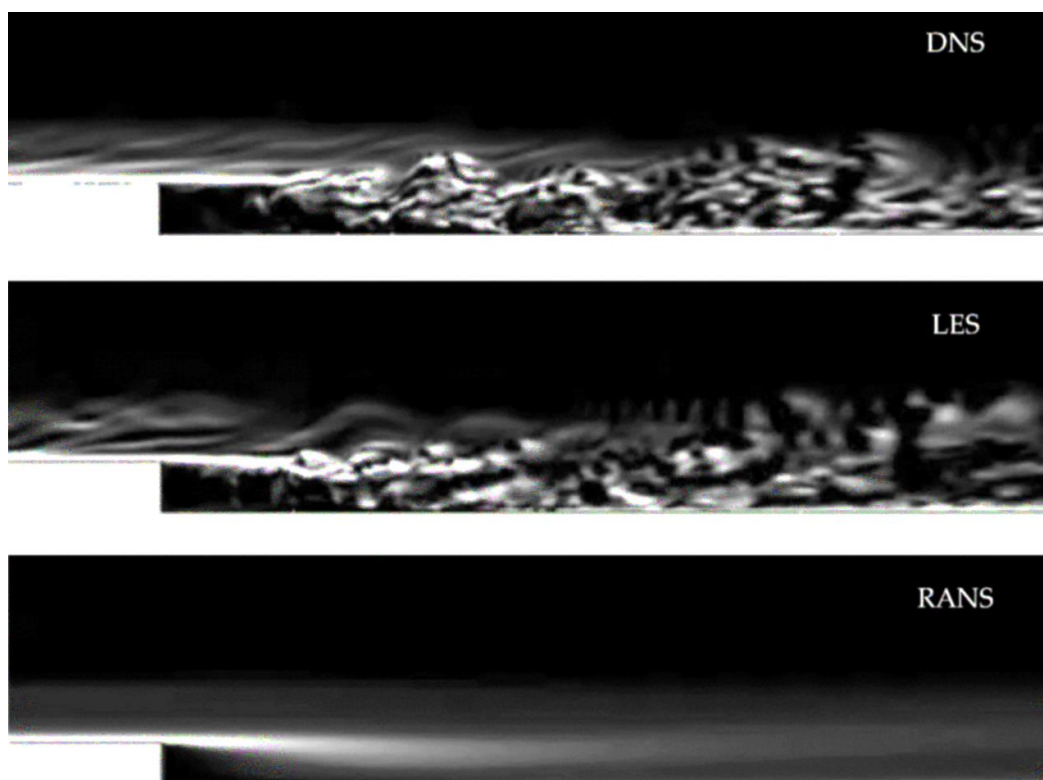
Rys. 4.3. Struktura przepływu w obszarze bezpośrednio za ciałem o prostokątnym kształcie, a – linie strumienia uśrednione w czasie, b – kontury chwilowej wirowości [148].

W kontekście badań aerodynamiki pojazdów, ze względu na szybkość obliczeń i małe zapotrzebowanie na moc obliczeniową, podejście stacjonarne jest powszechnie używane do ogólnych obliczeń oporu aerodynamicznego oraz wstępnej weryfikacji systemów aerodynamicznych. Symulacje niestacjonarne są natomiast bardziej dokładne, ponieważ uwzględniają zmienność przepływu w czasie. Umożliwia to uwzględnienie skomplikowanych zjawisk takich jak oscylacje, turbulencje i ścieżki wirowe, które mogą wystąpić w rzeczywistych warunkach jazdy i wpływać na aerodynamikę pojazdu. Pomimo, że mechanizm generowania oporu i jego kontrola są znacznie bardziej związane z niestacjonarnymi charakterystykami przepływu [149], SAE International dopuszcza zarówno symulacje niestacjonarne

jak i stacjonarne do wyznaczania powierzchni oporu aerodynamicznego samochodów ciężarowych. Również model referencyjny używany do certyfikacji urządzeń aerodynamicznych na europejskim rynku został wykonany w oparciu o przepływ ustalony [120]. Pomimo, że symulacje stacjonarne mogą nie uwzględniać wszystkich złożonych efektów związanych z turbulencją i innymi niestacjonarnymi zjawiskami przepływowymi, wciąż stanowią ważne i użyteczne narzędzie, szczególnie na etapie prototypowania.

4.4 Metody pośrednie i bezpośrednie modelowania turbulencji

Obliczenia oparte na RANS są efektywne obliczeniowo i powszechnie stosowane w wielu zastosowaniach inżynierskich i naukowych. Ze względu jednak na ograniczoną dokładność wraz z rozwojem mocy obliczeniowych RANS będzie sukcesywnie zastępowany przez bardziej precyzyjne, lecz jednocześnie bardziej kosztowne obliczeniowo metody takie jak DES, LES i ostatecznie DNS.



Rys. 4.4. Wizualizacja przepływu na podstawie wyników symulacji DNS, LES i RANS [149].

DNS jest bezpośrednią metodą symulacji obliczeniowej przepływów turbulentnych i polega na bezpośrednim rozwiązaniu równań NS bez jakichkolwiek uproszczeń, co oznacza uwzględnienie w obliczeniach wszystkich skal turbulencji [150]. Obliczenia prowadzone metodą DNS umożliwiają prawidłowe odtworzenie dynamiki

wszystkich skal liniowych i czasowych turbulencji, które w odróżnieniu od metod RANS nie są obliczane, lecz są wynikiem numerycznego modelowania. Wykorzystanie DNS wiąże się jednak z koniecznością zastosowania gęstych, wysoce dokładnych siatek i odpowiadającym im odpowiednio małym krokom czasowym, co poza prostymi przypadkami pozostaje poza zasięgiem współczesnych superkomputerów [151].

LES jest metodą pośrednią między metodami RANS i DNS. Jej podstawowym założeniem jest separacja ciągłego widma energii turbulentnych fluktuacji w procesie tzw. filtracji. W jej wyniku następuje podział na ruch drobno i wielkoskalowy, który jest uzależniony od przyjętych parametrów filtra. Wielkoskalowy ruch płynu jest wyznaczany ze zmodyfikowanych równań NS, natomiast drobnoskalowe struktury (mniejsze od szerokości zastosowanego filtra), w których energia kinetyczna jest dyssypowana przez działanie sił lepkości, są modelowane. Im mniejsza szerokość filtra tym bardziej LES zbliża się do DNS [152, 153].

Modele turbulencji stanowią obszar nieustannego rozwoju, czego przykładem są modele hybrydowe łączące RANS z LES. Jednym z przykładów jest DES, który wykorzystuje RANS w obszarach przyściennych oraz LES w regionach z dala od ścian. Rozwój modeli hybrydowych świadczy o dążeniu do wykorzystania niezaprzeczalnych zalet RANS wszędzie tam gdzie jest to możliwe, rozszerzając dokładność obliczeń w obszarach, w których RANS wykazuje ograniczenia. Ponieważ jednak wszystkie metody poza RANS mogą być rozwiązywane wyłącznie niestacjonarnie, niezależnie od przyszłego rozwoju modeli turbulencji, RANS stanie się pewien ugruntowany standard, zwłaszcza w kontekście szybkiej weryfikacji nowych technologii.

4.5 Metody automatyzacji i optymalizacji obliczeń w symulacjach komputerowych

Parametryzacja projektów i automatyzacja obliczeń stały się kluczowymi elementami współczesnych badań CFD, szczególnie w obszarze obliczeń wielkoskalowych i projektowaniu prototypów. Producenci oprogramowania CFD coraz częściej w ramach środowiska obliczeniowego oferują zintegrowane narzędzia do automatyzacji obliczeń i optymalizacji projektów, czego przykładem jest środowisko obliczeniowe Ansys. Parametryzacja pozwala na zdefiniowanie jako zmiennych dowolnych parametrów projektu takich jak np. geometria, warunki brzegowe czy właściwości materiałowe. Umożliwia to przeprowadzenie analizy wrażliwości przyjętych parametrów wejściowych na parametry wyjściowe i optymalizację w oparciu

o modyfikację tych zmiennych, o ile symulacje przeprowadzane są w trybie stacjonarnym. Automatyzacja obliczeń dla różnych kombinacji parametrów wejściowych pozwala na przyspieszenie przepływu pracy i znalezienie rozwiązania optymalnego dla danego projektu w przyjętych warunkach.

4.5.1 Projektowanie eksperymentów

Projektowanie eksperymentów (DOE) jest metodą statystyczną używaną do efektywnego planowania eksperymentów i analizy wyników. DOE umożliwia manipulowanie wieloma parametrami wejściowymi, w celu określenia ich wpływu na parametry wyjściowe. Zmieniając wiele wejść jednocześnie, DOE pomaga zidentyfikować istotne interakcje, które mogą być pominięte eksperymentując tylko z jedną z nich. Ilość generowanych w ramach DOE próbek jest uzależniona od liczby parametrów wejściowych i wyjściowych oraz przyjętego algorytmu [154].

W literaturze dostępnych jest wiele algorytmów i metod związanych z DOE, lecz wszystkie posiadają pewne wspólne cechy. Ich głównym zadaniem jest optymalizacja rozmieszczenia punktów próbkowania w taki sposób, aby przestrzeń zmiennych wejściowych była badana jak najbardziej efektywnie, lub aby uzyskać potrzebne informacje przy możliwie najmniejszej liczbie punktów pomiarowych. Efektywne rozmieszczenie próbek pozwala nie tylko na ograniczenie ich liczby, ale także zwiększa dokładność modelu odpowiedzi. W ramach środowiska ANSYS i modułu DesignXplorer domyślnym algorytmem jest Central Composite Design. Algorytm ten opiera się na technice pięciopoziomowego projektowania, w której każdy analizowany parametr wejściowy jest reprezentowany przez pięć charakterystycznych punktów, które obejmują cały zakres od wartości minimalnej do maksymalnej. Oprócz punktów skrajnych i centralnego, metoda ta obejmuje dodatkowe punkty, określane jako punkty gwiazdowe. Pozwala to na dokładniejsze odwzorowanie badanego obszaru oraz identyfikowanie potencjalnych nieliniowości w odpowiedzi systemu. CCD stanowi jeden z najbardziej popularnych planów eksperymentów, stosowanych na cele modelowania powierzchni odpowiedzi [155].

4.5.2 Powierzchnia odpowiedzi

Powierzchnia odpowiedzi stanowi zestaw technik statystycznych i matematyki stosowanej wykorzystywanych do budowy modeli eksperymentalnych. Celem RSM jest

optymalizacja odpowiedzi (zmiennej wyjściowej) pod wpływem kilku zmiennych niezależnych (zmiennych wejściowych). Wyniki DOE umożliwiają ogólny przegląd analizowanej sytuacji, a dopiero na ich podstawie możliwe jest generowanie modeli powierzchni odpowiedzi, które umożliwiają aproksymację zależności pomiędzy parametrami wejściowymi a wynikami symulacji.

Na przykładzie oprogramowania ANSYS, model powierzchni odpowiedzi jest generowany na podstawie danych z wykonanych symulacji. To oznacza, że im więcej danych jest dostępnych w DOE tym bardziej dokładny będzie model. Możliwe jest ręczne lub automatyczne dodanie dowolnej liczby punktów pomiarowych, które zostaną obliczone w celu zwiększenia dokładności. Model powierzchni odpowiedzi jest następnie wykorzystywany do przewidywania wyników dla różnych kombinacji parametrów wejściowych, co pozwala na przeprowadzenie analizy wrażliwości czy też optymalizacji bez konieczności przeprowadzania dodatkowych symulacji.

W ramach oprogramowania Ansys, standardowy algorytm stanowi Genetic Aggregation. Mechanizm ten automatyzuje proces selekcji, konfiguracji i tworzenia optymalnego rodzaju powierzchni odpowiedzi dla poszczególnych parametrów wyjściowych. Chociaż wymaga użycia większej pamięci komputerowej w porównaniu z takimi modelami jak wielomiany drugiego stopnia (Full 2nd-Order Polynomials), regresja nieparametryczna (Non-Parametric Regression) czy metoda Kriging, posiada opinię bardziej niezawodnego [156].

4.5.3 Metody optymalizacji

Ostatecznym celem wielu symulacji CFD jest znalezienie optymalnego zestawu parametrów, które maksymalizują lub minimalizują określone kryterium dla przyjętych warunków brzegowych [157]. Na przykładzie Ansys stosowane są dwa podejścia:

1. Optymalizacja powierzchni – wykorzystuje model powierzchni odpowiedzi jako funkcję celu dla algorytmu optymalizacji. Jest to efektywna metoda, która pozwala na szybkie znalezienie optymalnego zestawu parametrów, ale może nie być odpowiednia w przypadkach gdy model powierzchni odpowiedzi jest niedokładny. W oprogramowaniu Ansys algorytm optymalizacji powierzchni odpowiedzi jest oparty o metodę MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm), który jest wariantem popularnego algorytmu NSGA-II (Non-dominated Sorted Genetic Algorithm-II) opartego na koncepcji kontrolowanego elitaryzmu. Metoda ta obsługuje wiele

warunków brzegowych i ograniczeń, a jej celem jest znalezienie globalnego optimum. [158]. Pracując bezpośrednio na powierzchni odpowiedzi metoda ta pozwala na szybkie znalezienie optimum co jest wygodna w trakcie zmian czy modyfikacji warunków brzegowych i ich zakresów. Po znalezieniu punktu optymalnego przewidywanego na podstawie powierzchni odpowiedzi istnieje możliwość jego bezpośredniej weryfikacji poprzez wykonanie obliczeń.

2. Optymalizacja bezpośrednia – w tej metodzie, algorytm optymalizacji działa bezpośrednio na wynikach symulacji CFD. W ramach pakietu ANSYS dostępne są algorytmy takie jak Screening, MOGA, NLPQL, MISQP, Adaptive Multi-Objective, Adaptive Single-Objective. Niezależnie od wybranego algorytmu, optymalizacja bezpośrednia bazuje wyłącznie na wynikach symulacji. Takie podejście zapewnia precyzyjne wyniki jednak wymaga więcej czasu, a każda zmiana warunków brzegowych wymaga rozpoczęcia cyklu symulacyjnego od nowa [159].

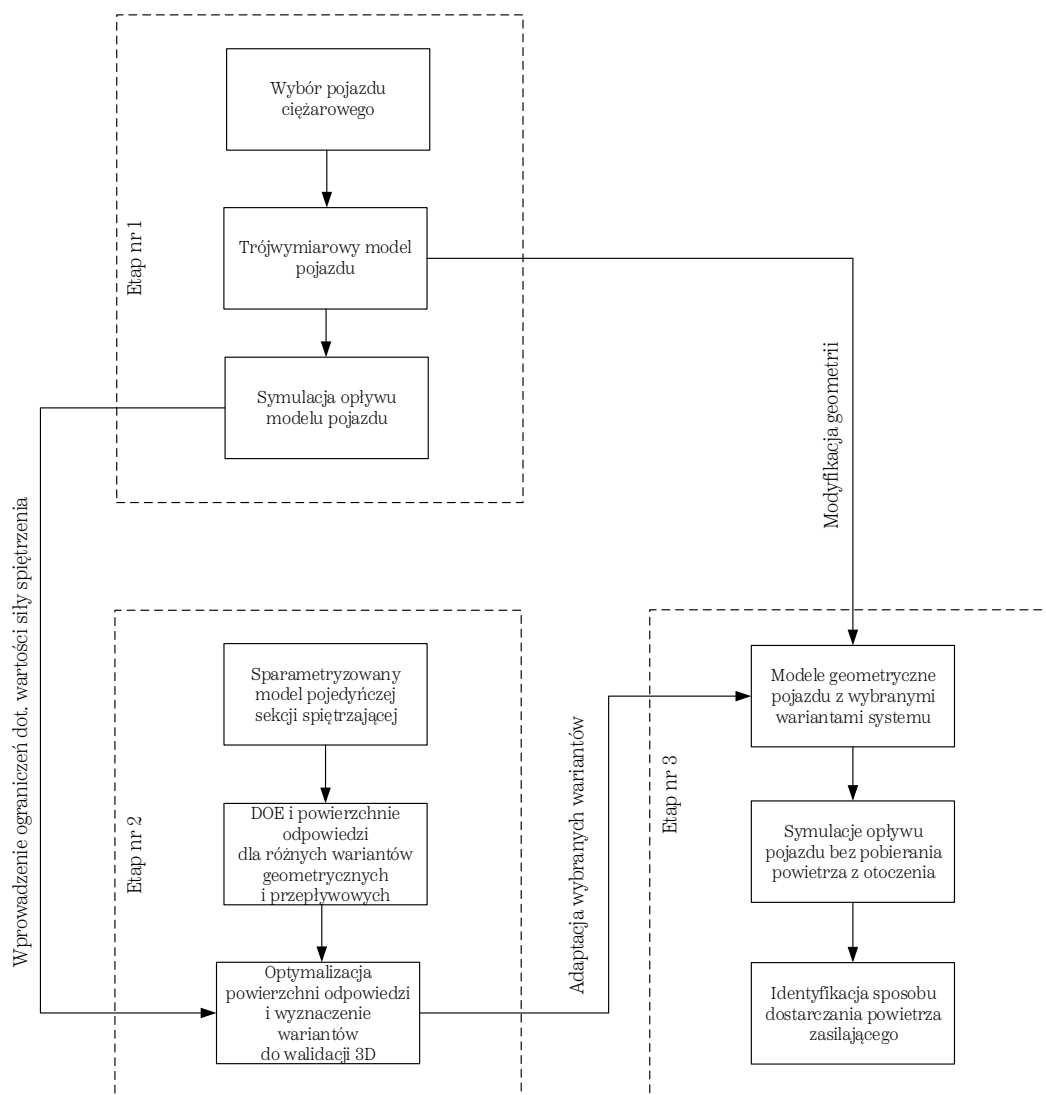
W kontekście badań aerodynamiki pojazdów DOE wraz z modelowaniem powierzchni odpowiedzi stanowi kluczowe narzędzie umożliwiające wielowymiarowe analizy. Stosowanie tej techniki umożliwia m.in. szczegółową charakterystykę zależności oporu aerodynamicznego – traktowanego jako parametr wyjściowy – od zmiennych takich jak prędkość pojazdu, kierunek i siła wiatru czy inne specyficzne warunki atmosferyczne. Współczesne narzędzia bazujące na metodach DOE umożliwiają precyzyjne modelowanie oraz modyfikacje wybranych cech geometrycznych zarówno pojazdów jak i podzespołów systemów aerodynamicznych. Umożliwiają tym samym osiągnięcie przyjętych celów, np. dotyczących ograniczenia oporu aerodynamicznego w przyjętych warunkach operacyjnych.

Weryfikacja systemu aktywnej aerodynamiki za pomocą komputerowej mechaniki płynów

W rozdziale przedstawiono proces weryfikacji koncepcji sztucznej bariery powietrznej ograniczającej opór aerodynamiczny lekkiego pojazdu ciężarowego począwszy od modeli matematycznych opływu pojazdu ciężarowego, przez szereg modeli matematycznych dla różnych wariantów sekcji spiętrzających, a następnie adaptację wybranych konfiguracji sekcji spiętrzających do zabudowy pojazdu. W końcowej części rozdziału przedstawiono wytyczne dotyczące efektywnego sposobu dostarczania powietrza do zasilania systemu aerodynamicznego.

5.1 Strategia weryfikacji

Plan weryfikacji opierał się na podziale na trzy zasadnicze ściśle powiązane ze sobą etapy w ramach których osiągnięto kluczowe kamienie milowe. Każdy etap zaprojektowano, aby stopniowo przybliżać walidację idei zaproponowanego systemu. Plan realizacji prac przedstawiono schematycznie na rys. 5.1.



Rys. 5.1. Plan weryfikacji koncepcji systemu aerodynamicznego.

W ramach pierwszego etapu wybrano pojazd ciężarowy, a następnie opracowano jego trójwymiarowy model. Na podstawie tego modelu wykonano domenę obliczeniową dostosowaną do wymagań symulacji. Na opracowanej domenie przeprowadzono symulacje opływu pojazdu odpowiadające stałej prędkości jazdy bez wiatru bocznego. Pierwszy kamień milowy stanowiło wyznaczenie wartości siły oporu aerodynamicznego oraz jej składowych, w tym wartości siły działającej na tylną strefę pojazdu.

Wartość tej siły została zaadaptowana w drugim etapie jako jeden z warunków brzegowych w procesie wyznaczania konfiguracji sekcji spiętrzających do weryfikacji na pojeździe.

W drugim etapie opracowano zestaw sparametryzowanych modeli dwuwymiarowych reprezentujących pojedynczą sekcję spiętrzającą. Badania przeprowadzono dla 8 wariantów zakładających montaż na pojeździe od 1 do 128 sekcji spiętrzających. Prace prowadzono pod kątem analiz wpływu fizycznej szerokości strumieni spiętrzenia i ich prędkości na wartości generowanych sił na powierzchniach spiętrzenia oraz ich stosunku to teoretycznej siły ciągu, jaką identyczne strumienie mogłyby wytworzyć gdyby zostały wykorzystane jako źródło odrzutu. Dla każdego wariantu obliczeniowego wykonano powierzchnie odpowiedzi, które następnie zostały poddane procesowi optymalizacji z uwzględnieniem celów i ograniczeń, w tym wartości siły oporu działającej na tylną strefę pojazdu strefę tylną. Kamień milowy uzyskany w tym etapie stanowią pojedyncze konfiguracje wyłonione osobno dla każdego z wariantów.

W trzecim etapie przeprowadzono adaptację wyznaczonych konfiguracji do trójwymiarowego modelu pojazdu, a następnie wykonano symulacje opływu pojazdu dla każdej konfiguracji systemu. W ramach pierwszego kroku dokonano ogólnej identyfikacji skuteczności bariery powietrznej w ograniczaniu oporu aerodynamicznego strefy tylnej pojazdu oraz pojazdu jako całości. W tym kroku autor skupił się wyłącznie na wytwarzaniu strumieni spiętrzających w strefie tylnej pojazdu, bez analizy budowy i przepływów w wewnętrznych kanałach systemu aerodynamicznego oraz bez pobierania powietrza z otoczenia niezbędnego do jego zasilania. Uzyskane wyniki i wyznaczona z nich konfiguracja o największej skuteczności stanowi trzeci kamień milowy. W drugim kroku autor przeprowadził wstępną analizę dotyczącą sposobu pobierania powietrza z otoczenia, gdzie na podstawie analizy składowych całkowitej siły oporu działających na każdą ze stref pojazdu wskazał wstępny sposób do zbilansowania kosztu energetycznego niezbędnego do wytworzenia strumieni zasilających. Uzyskane wyniki wskazują na możliwość uzyskania dodatniego bilansu energetycznego, co stanowi czwarty kamień milowy i jednocześnie potwierdzenie dla postawionej tezy.

Obliczenia w ramach każdego z etapów wykonano przy użyciu pakietu komercyjnego oprogramowania Ansys z solverem Ansys Fluent oraz modułami DOE, powierzchni odpowiedzi i optymalizacji Ansys Xplorer na jednostkach obliczeniowych

należących do Katedry Termodynamiki, Mechaniki Płynów i Napędów Lotniczych Politechniki Lubelskiej.

5.2 Pojazd ciężarowy przyjęty na cele symulacji

Jako pojazd referencyjny na cele symulacji CFD wybrano IVECO Daily 50C15 z zabudową kontenerową Spier 1KRal2. Kluczowym czynnikiem, który wpłynął na wybór wskazanego pojazdu jest jego bezpośrednia dostępność. Pojazd stanowi własność autora i został zakupiony a następnie zmodyfikowany na cele prowadzonych przez niego badań drogowych w zakresie aerodynamiki pojazdów ciężarowych.



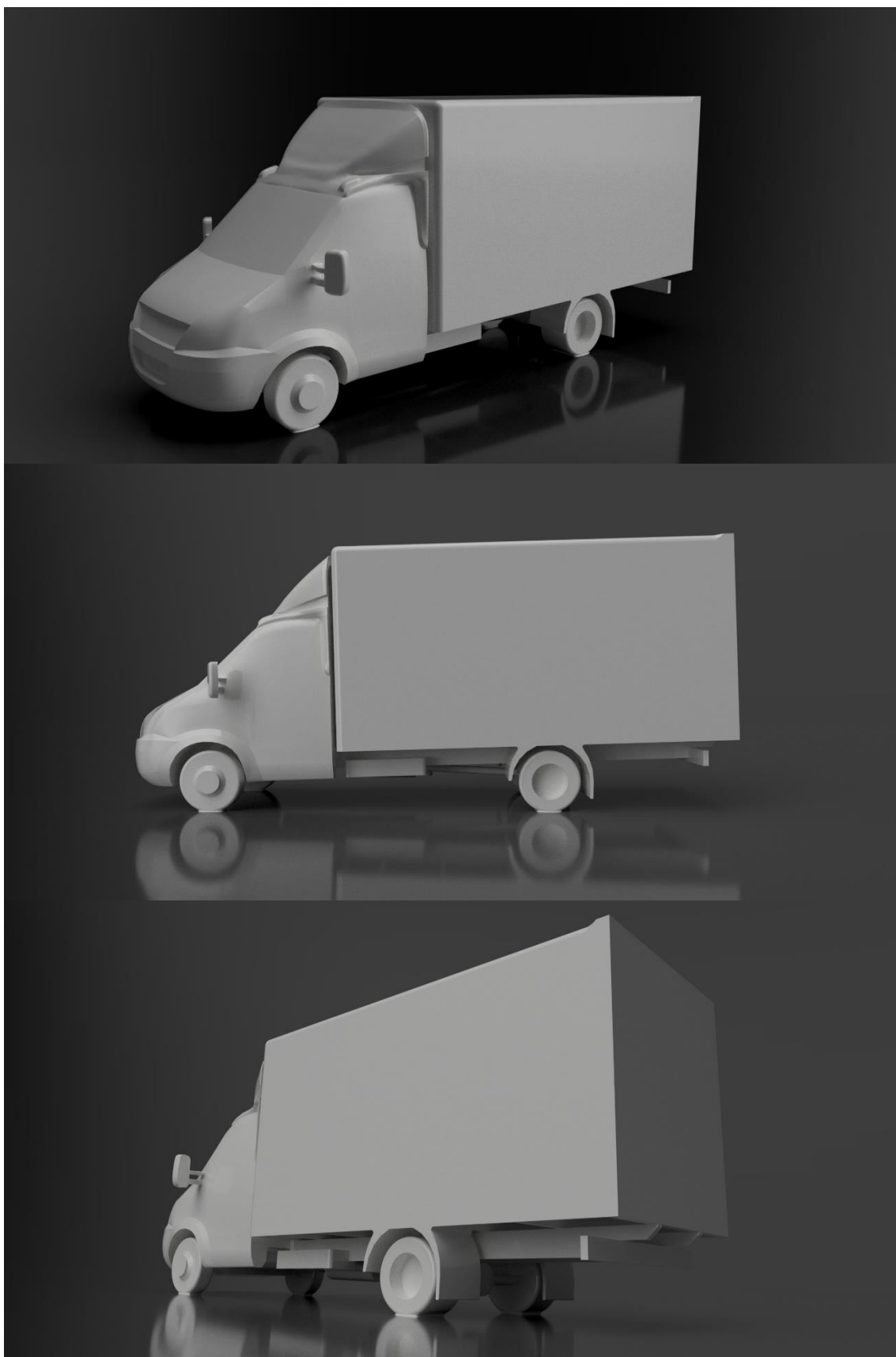
Rys. 5.2. Samochód ciężarowy IVECO Daily 50C15 wraz ze zmodyfikowaną zabudową.

Wybrane auto jest jednym z najbardziej popularnych przedstawicieli lekkich samochodów ciężarowych na europejskim rynku, a w połączeniu z zastosowaną zabudową kontenerową jest typowym przykładem Bluff Body, stanowiącego obszar badawczy niniejszej pracy. Jego wybór umożliwi w przyszłości weryfikację w rzeczywistych warunkach drogowych efektywności prototypów systemów aerodynamicznych, które zostaną zbudowane w oparciu o wykonane analizy CFD. Umożliwi to bezpośrednie porównanie wyników teoretycznych uzyskanych w symulacjach z wynikami praktycznymi z testów drogowych. Jednocześnie ze względu na kształt zabudowy, a szczególnie dużą powierzchnię jej tylnej strefy, uzyskane wyniki będą użyteczne do wstępnych analiz aerodynamiki większych pojazdów takich jak autobusy czy zestawy ciągnik siodłowy – naczepa.

Tab. 5.1. Wybrane parametry geometryczne pojazdu.

Parametr	Wartość	Jednostka
Powierzchnia aerodynamiczna	8,01	m ²
Powierzchnia tylnej ściany zabudowy	4,72	m ²
Wysokość pojazdu z zabudową	3,051	m
Długość pojazdu z zabudową	6,843	m
Szerokość pojazdu bez lusterek	2,1	m
Szerokość pojazdu z lusterkami	2,63	m
Wysokość zabudowy	2,245	m
Długość zabudowy	4,4	m
Szerokość zabudowy	2,1	m

Cyfrowy bliźniak pojazdu czyli cyfrowa replika odzwierciedlająca geometrię pojazdu w środowisku wirtualnym, został wykonany za pomocą technik inżynierii odwrotnej. Digitalizacja pojazdu została przeprowadzona w sposób hybrydowy, łącząc pomiary ręczne wykonane klasycznymi metodami stykowymi z metodami bezstykowymi, takimi jak laserowe skanowanie 3D i fotogrametria. Wirtualny model pojazdu został wykonany w skali 1:1 a jego geometria została uproszczona i dostosowana do wymagań symulacji CFD. Strefa podwoziowa została znacząco uproszczona poprzez wyeliminowanie większości drobnych elementów. Niewielkie elementy takie jak uchwyty, wycieraczki, elementy zawieszenia, przewody elektryczne i hydrauliczne, klamki, szczeliny itp. zostały pominięte lub uproszczone. Koła i opony zostały zastąpione bryłami geometrycznymi o zbliżonym kształcie. Elementy te miałyby niewielki wpływ na zjawiska aerodynamiczne w skali całego pojazdu ale znacząco zwiększałyby złożoność modelu prowadząc do przekroczenia dostępnej mocy obliczeniowej.



Rys. 5.3. Widok cyfrowego bliźniaka pojazdu referencyjnego przygotowanego do symulacji CFD.



Rys. 5.4. Porównanie geometrii pojazdu referencyjnego (strona lewa) z jego cyfrowym bliźniakiem (strona prawa).

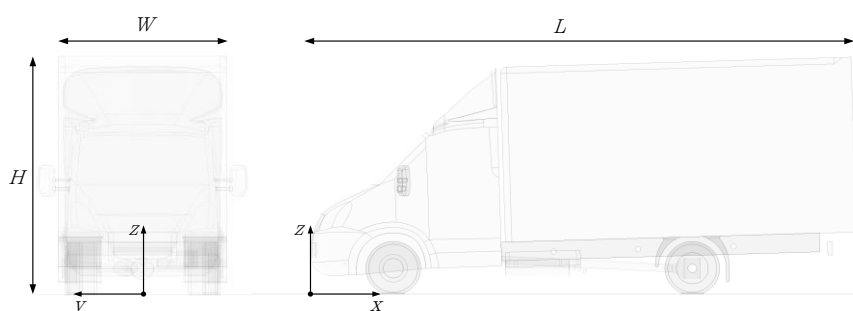
5.3 Identyfikacja mocy oporów aerodynamicznych pojazdu referencyjnego

W celu wyznaczenia sił aerodynamicznych działających na pojazd referencyjny zastosowano pakiet komercyjnego oprogramowania Ansys Fluent, który rozwiązuje równania Naviera–Stokesa w dyskretyzowanej domenie obliczeniowej. Obliczenia wykonano w oparciu o podejście ustalone korzystając z techniki RANS oraz modelu turbulencji *Realizable k-ε*. Dla solverów odpowiedzialnych za ciśnienie i lepkość dynamiczną zastosowano model dyskretyzacji drugiego rzędu.

5.3.1 Domena i siatka obliczeniowa

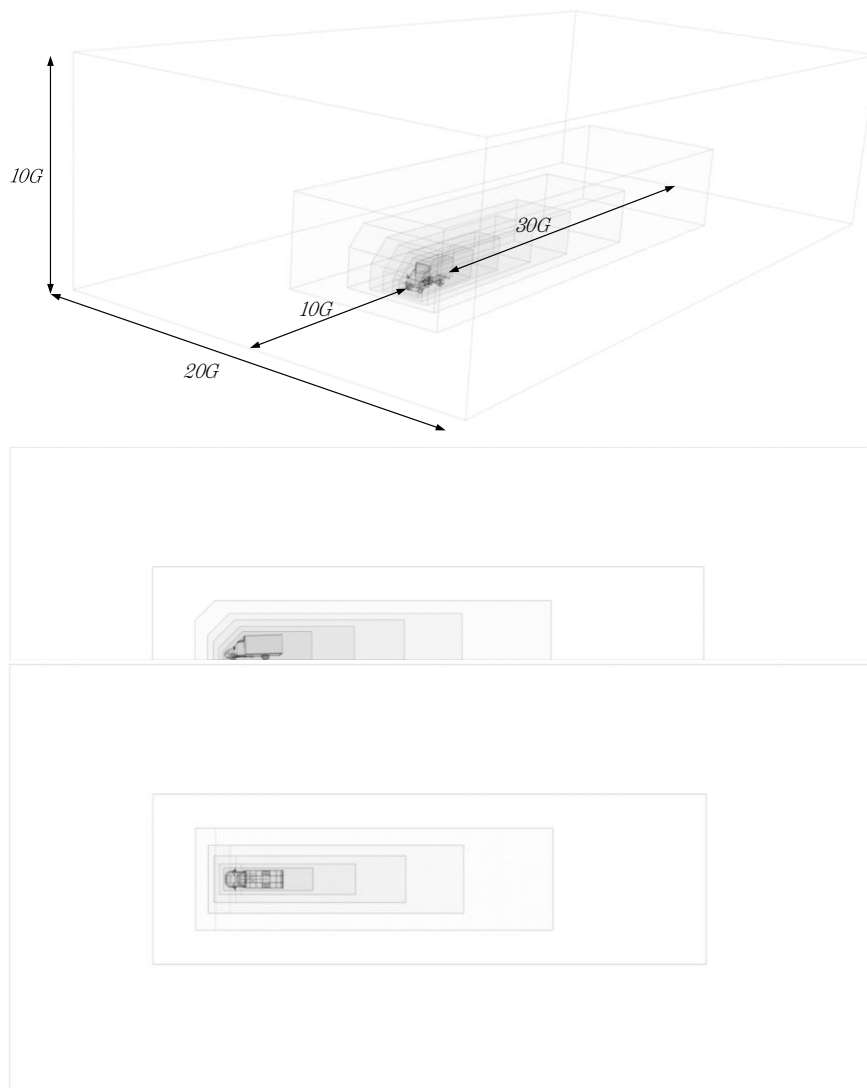
Domenę obliczeniową reprezentującą drogę i otaczające pojazd powietrze zaprojektowano zgodnie z wytycznymi SAE International J2966. Rozmiar domeny i położenie pojazdu określono za pomocą parametru odległości definiowanego jako:

$$G = \sqrt{W \cdot H} \quad (5.1)$$



Rys. 5.5. Oznaczenia wymiarów pojazdu i lokalizacja globalnego układu współrzędnych domeny.

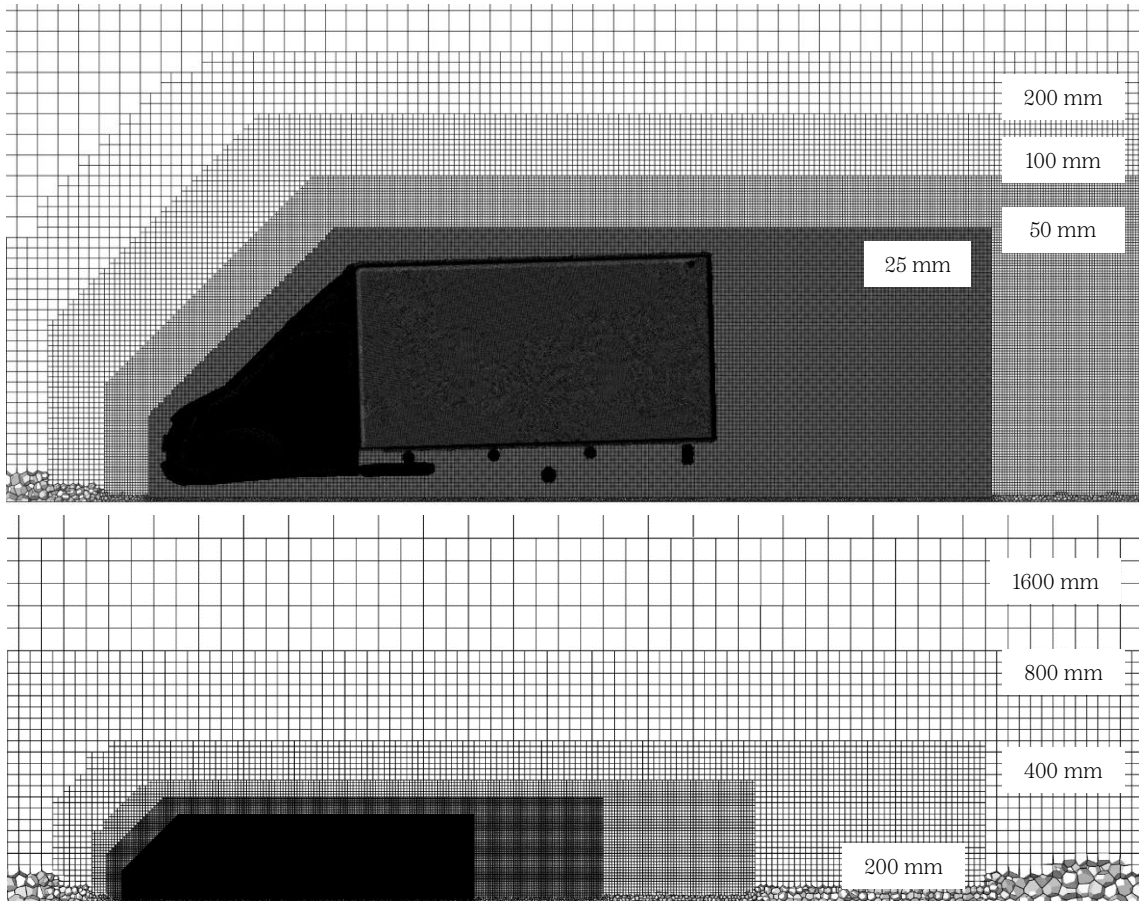
W celu odzwierciedlenia warunków panujących na otwartej drodze wysokość i szerokość domeny zaprojektowano tak, aby współczynnik blokowania reprezentujący stosunek powierzchni czołowej pojazdu do powierzchni przekroju domeny obliczeniowej w płaszczyźnie yz nie przekraczał 0,5%. Strefy przed i za pojazdem zostały odpowiednio wydłużone aby zapewnić stabilizację przepływu napływającego oraz umożliwić analizę rozwoju i rozprzestrzeniania się struktur turbulentnych za pojazdem.



Rys. 5.6. Domena obliczeniowa wraz ze strefami dodatkowego zagęszczenia BOI.

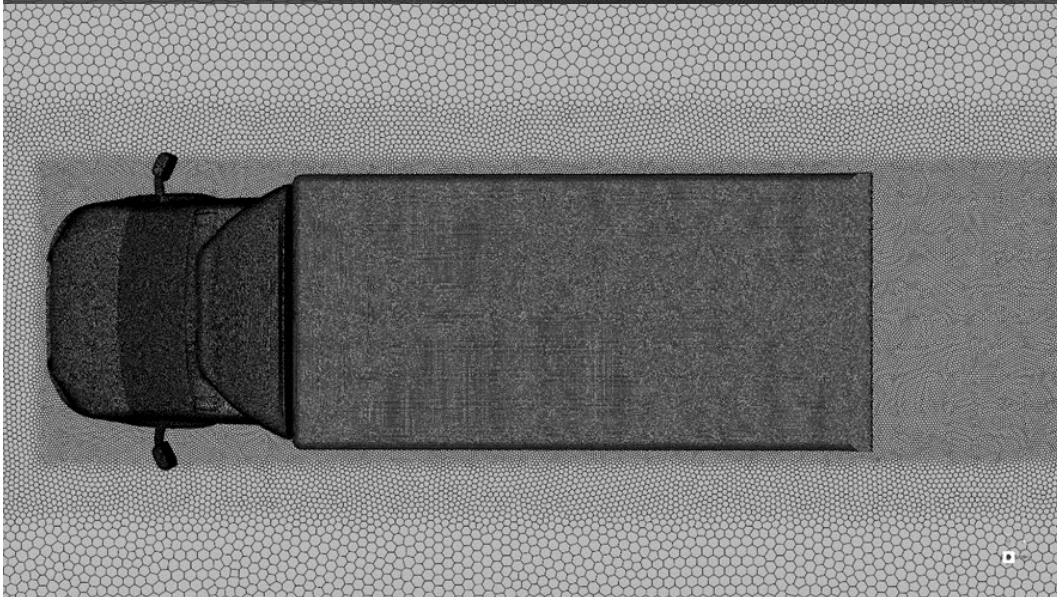
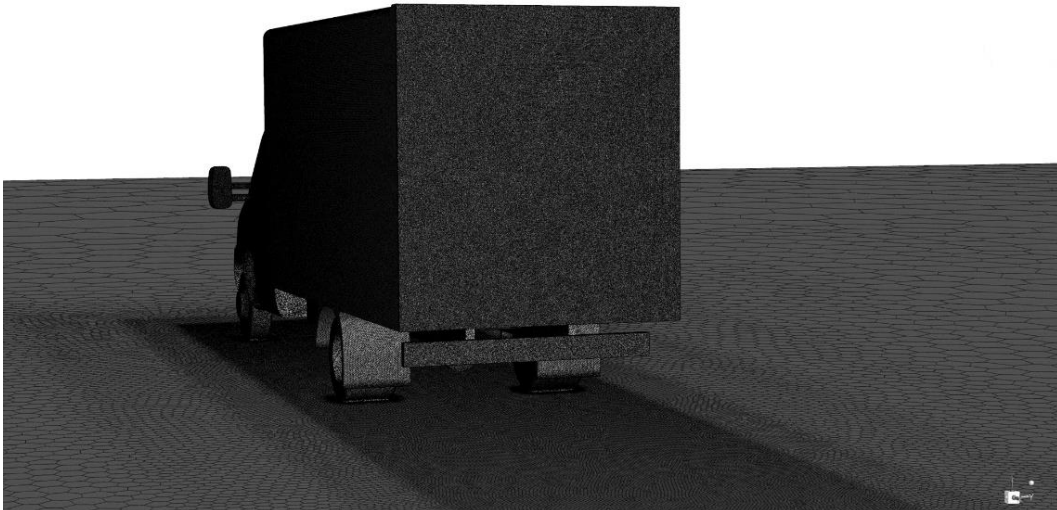
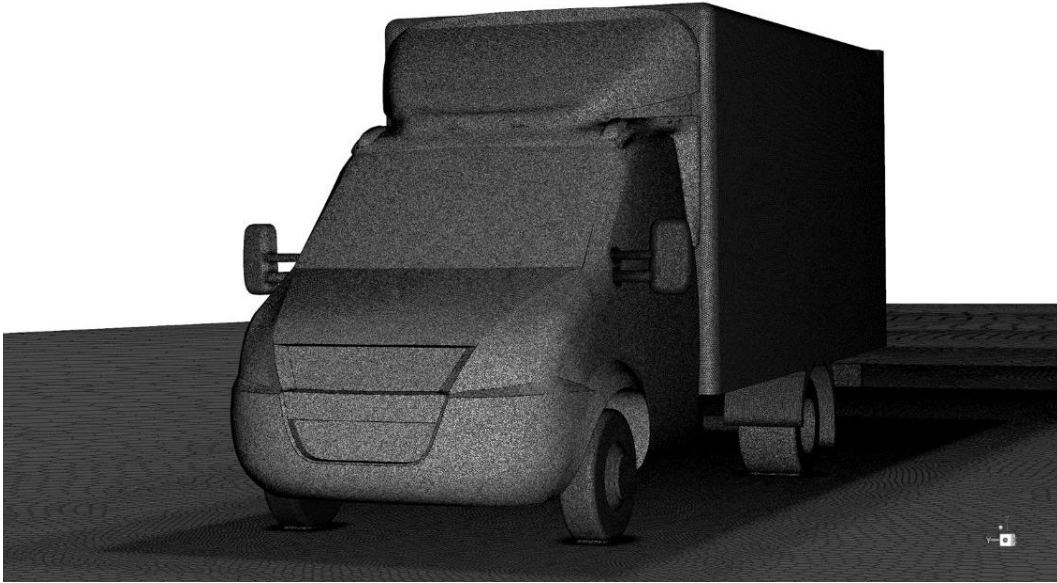
Otoczenie pojazdu poddano dodatkowemu zagęszczeniu w ramach sześciu dodatkowych obszarów (BOI) o rozmiarach elementów kolejno 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600 mm. W celu zastosowania podejścia obliczeniowego w oparciu o funkcje ściany, na wszystkich powierzchniach pojazdu jak i na powierzchni drogi zamodelowano warstwę przyścienną. Bezwymiarowy parametr y^+ zachowano na wszystkich

powierzchniach pojazdu na poziomie powyżej 30. Symulowaną powierzchnię jezdni zamodelowano jako ruchomą i poruszającą się zgodnie z przepływem powietrza. Koła zamodelowano jako obracające się. Dolny wlot powietrza w zderzaku ustawiono jako przepływowy i transportujący strumień powietrza o wielkości 2 kg/s do strefy podwoziowej. Zabieg ten został wykonany w celu dopasowania charakterystyki opływu i sposobu formowania się wirów za pojazdem do wyników uzyskanych w takcie badań drogowych.



Rys. 5.7. Rozkład elementów siatki w płaszczyźnie *xz*.

Podział domeny na siatkę przeprowadzono przy wykorzystaniu techniki mozaiki Poly-Hexcore (ANSYS Mosaic). Technika ta generuje siatkę poli-pryzmatyczną w obszarze przyściennym, po czym za pomocą elementów poliedralnych przechodzi w sześciokąty oparte na strukturze drzewa ósemkowego, które wypełniają zasadniczą objętość domeny. Względem pozostałych typów siatek takie podejście umożliwia szybsze symulacje o większej dokładności przy jednoczesnym mniejszym zapotrzebowaniu na pamięć RAM [160]. Po przeprowadzeniu badania czułości, określającego wpływ rozmiaru elementów siatki na generowane wyniki, końcowa siatka obliczeniowa została zbudowana w oparciu o 67,5 mln trójwymiarowych elementów.



Rys. 5.8. Elementy siatki obliczeniowej na powierzchniach pojazdu i drogi.

5.3.2 Warunki brzegowe

Parametry otoczenia dostosowano do atmosfery wzorcowej przyjmując powietrze jako gaz doskonały. Przepływ na wlocie domeny ustalono na 25 m/s, co odpowiada symulowanej prędkości pojazdu wynoszącej 90 km/h. Kierunek przepływu powietrza został skierowany równolegle do osi x globalnego układu współrzędnych domeny symulując warunki jazdy bez wiatru bocznego.

5.3.3 Wyniki

Całkowita siła oporu aerodynamicznego, działających na model pojazdu referencyjnego przy prędkości 90 km/h wynosi 851,7 N, z czego 276,5 N (32,5 %) stanowi opór strefy tylnej. Moc strat wynikających z działania powyższych sił aerodynamicznych stanowi iloczyn ich wartości i symulowanej prędkości pojazdu odpowiadającej prędkości na wlocie do domeny:

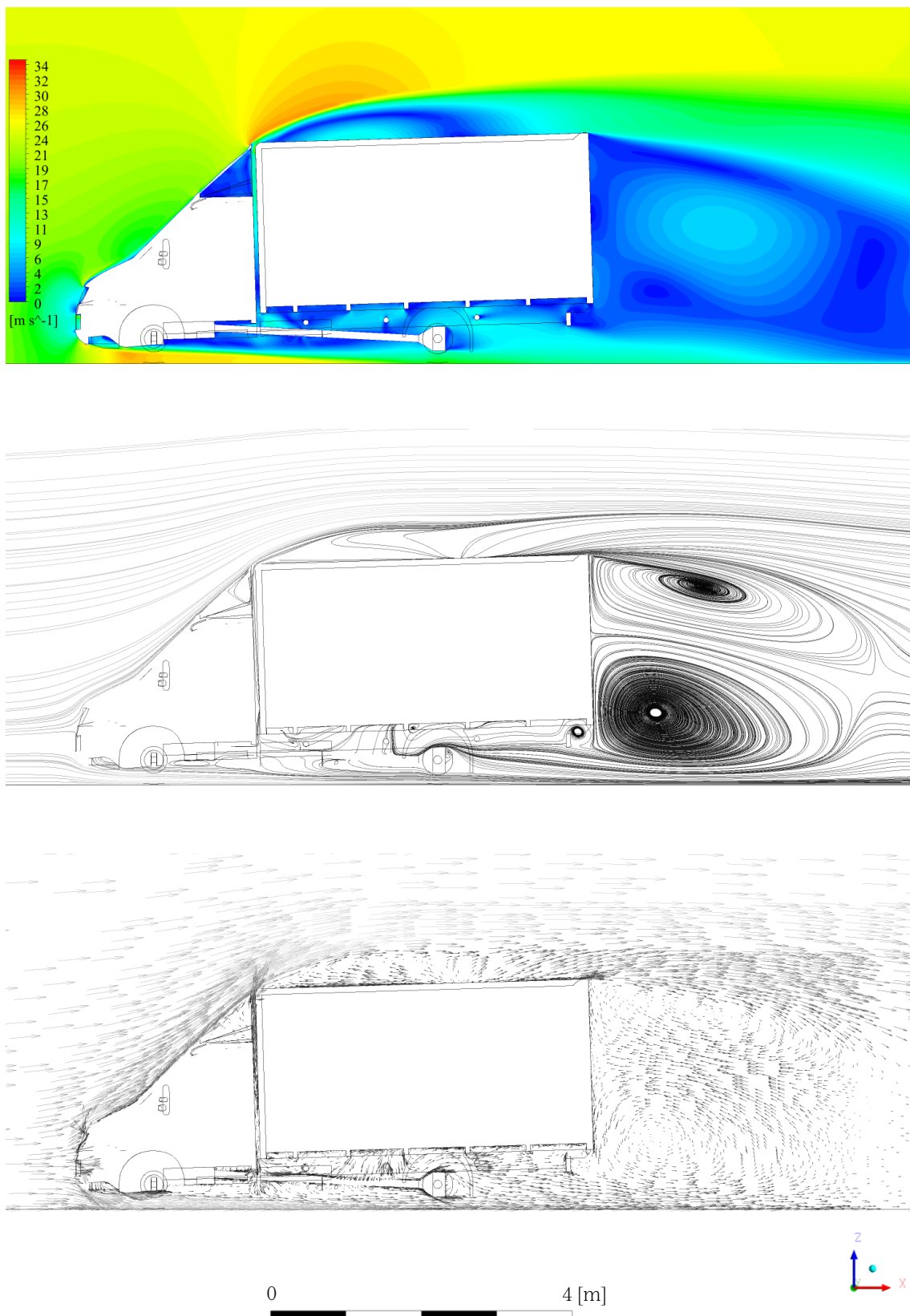
$$P_{aero} = F_{aero} \cdot v_{in} \quad (5.2)$$

$$P_t = F_t \cdot v_{in} \quad (5.3)$$

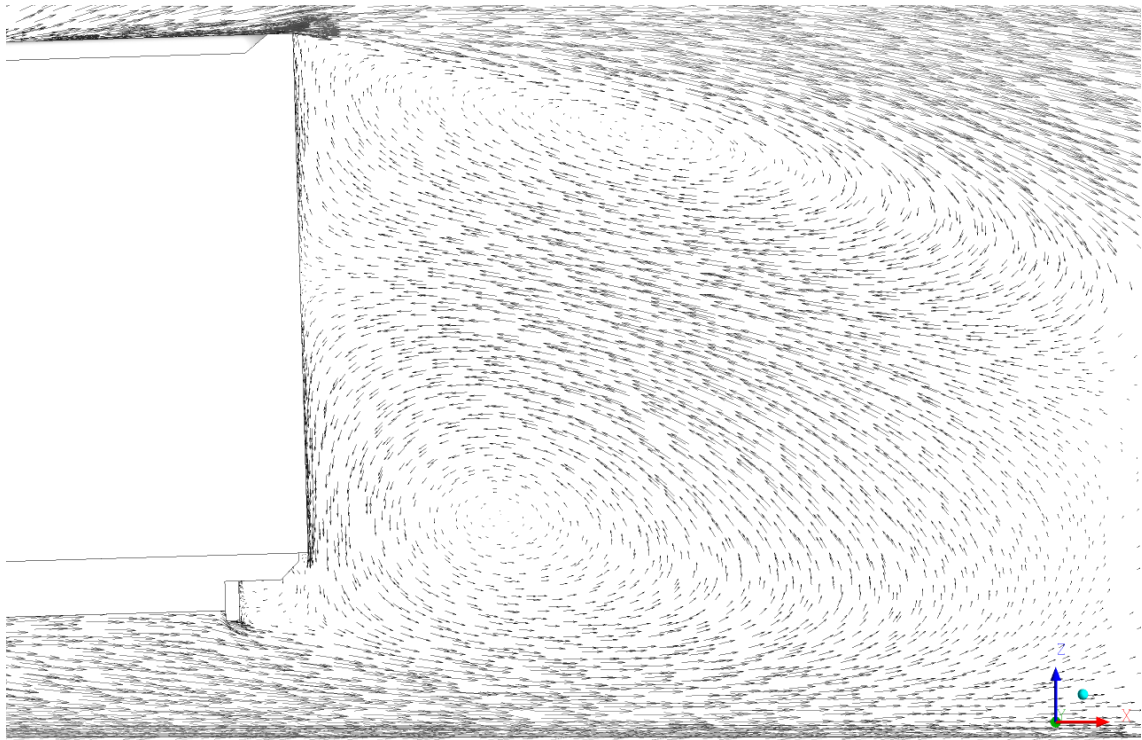
Zgodnie z powyższymi równaniami całkowita moc oporów aerodynamicznych pojazdu dla przyjętych warunków symulacji wynosi 21,3 kW, z czego za 6,91 kW odpowiada opór strefy tylnej. Zestawienie udziału lepkości i ciśnienia w kształtowaniu składowych oporów dla poszczególnych sekcji pojazdu przedstawiono w tab. 5.2. Rozkłady ciśnienia i prędkości powietrza w otoczeniu pojazdu przedstawiono graficznie na rys. 5.9–5.11.

Tab. 5.2. Wybrane parametry geometryczne pojazdu.

Strefa	Opór ciśnieniowy [N]	Opór lepkościowy [N]	Łączny opór [N]
Kabina	677,00	13,50	690,50
Lusterka	46,58	0,87	47,45
Podwozie	57,24	1,03	58,27
Koła	63,72	8,62	72,33
Zabudowa bez strefy tylnej	-322,02	28,67	-293,35
Tylna ściana zabudowy	276,48	0,01	276,49
Suma	799,00	52,69	851,69

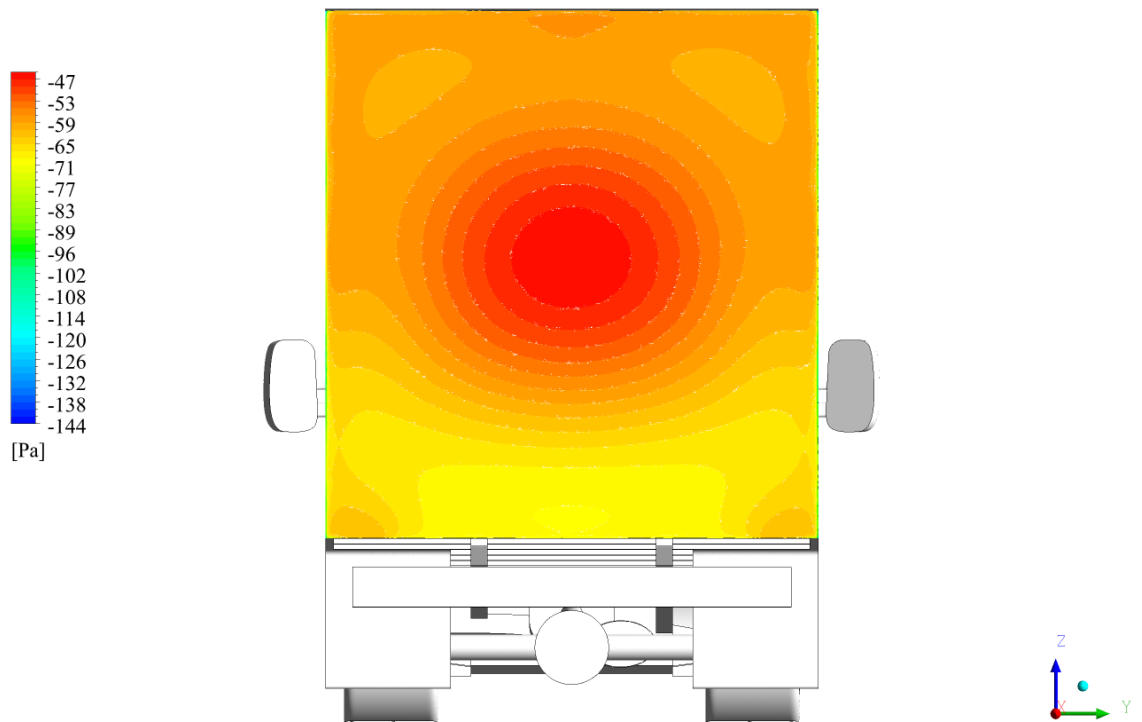


Rys. 5.9. Rozkłady prędkości w płaszczyźnie xz dla $y=0$ (górze) z odpowiadającymi im liniami prądu (środek) oraz wektorami (dół).



0 1 [m]

Rys. 5.10. Wektory prędkości w strefie tylnej na płaszczyźnie xz dla $y = 0$.



-47
-53
-59
-65
-71
-77
-83
-89
-96
-102
-108
-114
-120
-126
-132
-138
-144
[Pa]

0 1 [m]

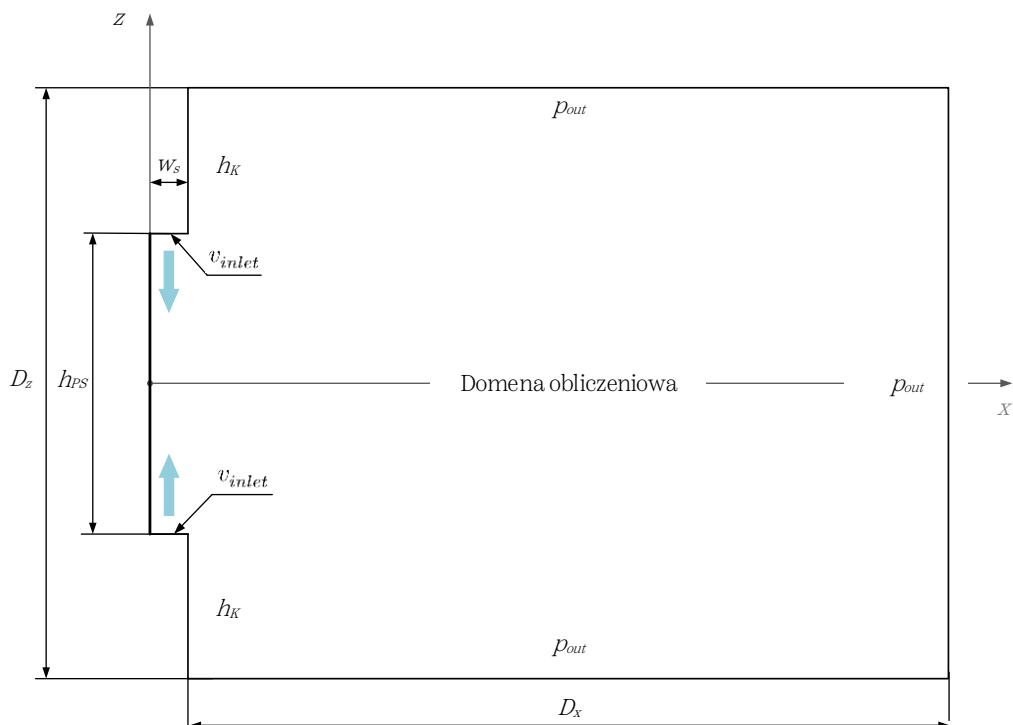
Rys. 5.11. Rozkłady ciśnienia na tylnej powierzchni zabudowy.

5.4 Modele matematyczne różnych wariantów pojedynczej sekcji spiętrzającej

Podstawę obliczeń dla pojedynczej sekcji spiętrzającej stanowi sparametryzowany model przepływowy umożliwiający identyfikację wpływu parametrów wejściowych w postaci prędkości strumieni spiętrzających i ich szerokości na parametry wyjściowe w postaci siły generowanej na powierzchni spiętrzenia oraz stosunku tej siły do teoretycznej siły ciągu generowanej przez strumienie spiętrzające.

5.4.1 Domena obliczeniowa i warunki brzegowe

Obszar obliczeniowy zbudowano w oparciu o podejście dwuwymiarowe, przy czym trzeci wirtualny wymiar stanowi szerokość zabudowy pojazdu. Domena obliczeniowa posiada dwa wloty powietrza reprezentujące strumienie spiętrzające oraz trzy wyloty ciśnieniowe. Obszar pomiędzy wlotami stanowi powierzchnia spiętrzenia na której zamodelowano pełną warstwę przyścienną zachowując wartość parametru y^+ poniżej 1. Wartość siły spiętrzenia przedstawiono w odniesieniu do kierunku $-x$.



Rys. 5.11. Dwuwymiarowa sparametryzowana domena obliczeniowa reprezentująca pojedynczą sekcję spiętrzającą.

Parametrem geometrycznym zmiennym dla każdego z wariantów obliczeniowych była wysokość domeny D_z , która reprezentuje całkowitą wysokość przyjętej do obliczeń pojedynczej sekcji spiętrzenia h_{SP} . W celu zachowania podobieństwa geometrycznego pomiędzy różnymi wariantami geometrycznymi globalny rozmiar elementów siatki obliczeniowej związane proporcjonalnie do każdej z przyjętych wartości h_{SP} . Długość domeny D_x ograniczono wyłącznie do obszaru strefy zderzeń i krótkiego obszaru odpływu zgodnie z zależnością:

$$D_x = D_z = h_{SP} \quad (5.4)$$

Takie podejście umożliwia zmniejszenie globalnej liczby elementów siatki i pominięcie obszaru dalszej dyssypacji energii odpływających strumieni co ogranicza czas obliczeń i zapewnia ich stabilność niezależnie od konfiguracji parametrów wejściowych.

Do obliczeń przyjęto 8 wariantów geometrycznych zakładających podział strefy tylnej zabudowy na od 1 do 128 sekcji spiętrzających zgodnie z ciągiem: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128. Dla każdego wariantu wykonano osobną domenę obliczeniową reprezentującą odpowiadającą mu pojedynczą sekcję spiętrzającą.

Tab. 5.3. Warianty geometryczne przyjęte do wstępnych obliczeń.

<i>Wariant</i>	h_{SP} [mm]	n_{SP} [-]	n_s [-]
1	2245	1	2
2	1122,5	2	4
3	561,3	4	8
4	280,6	8	16
5	140,3	16	32
6	70,2	32	64
7	35,1	64	128
8	17,5	128	256

W celu umożliwienia zmiany kierunku i stabilizacji przepływu przed wylotem z kierownicy powietrza, założono, że wysokość pojedynczej kierownicy jest równa szerokości kanału wylotowego:

$$h_K = w_s \quad (5.5)$$

Ponadto, aby wyeliminować warianty obliczeniowe, w których strumienie spiętrzenia byłyby zbyt blisko siebie względem ich szerokości, a tym samym powierzchnie spiętrzenia stanowiłyby marginalny rozmiar w porównaniu do całkowitego rozmiaru sekcji spiętrzającej, dla każdego z wariantów maksymalną szerokość kanału wylotowego w_s powiązano w funkcji wysokości powierzchni spiętrzenia. Aby rozszerzyć analizę i uzyskać większą liczbę danych dotyczących m.in. wpływu wysokości h_{SP} względem

szerokości w_s na uzyskiwane siły, warianty obliczeniowe podzielono na dwie podgrupy. Dla wariantów 1-4 założono, że łączna powierzchnia aktywna aerodynamicznie systemu aerodynamicznego tworzona przez wszystkie powierzchnie spiętrzenia musi być co najmniej trzykrotnie większa od powierzchni nieaktywnej tworzonej przez powierzchnie zewnętrzne kierownic. Stąd, maksymalna szerokość strumieni dla wariantów 1-4 powinna wynosić:

$$w_{s_{\max (1-4)}} = \frac{1}{8} h_{SP} \quad (5.6)$$

Dla wariantów 5-8 założono, że powierzchnia aktywna musi być co najmniej dwukrotnie większa od powierzchni nieaktywnej. Stąd, maksymalna szerokość strumieni powinna wynosić:

$$w_{s_{\max (5-8)}} = \frac{1}{6} h_{SP} \quad (5.7)$$

Dla każdego z wariantów geometrycznych przyjęto wspólne ograniczenia przepływowe:

1. Warunki operacyjne dla powietrza:
 - otoczenie – atmosfera wzorcowa,
 - ciśnienie względne na wlocie – 0 Pa,
 - intensywność turbulencji na wlocie – 1 %,
 - turbulencja w przepływie wstecznym – 1 %.
2. Zakres prędkości strumieni spiętrzących.

Prędkość zderzenia stanowi wypadkową prędkością strumieni generowanych przez górną i dolną kierownicę. Dla przepływu symetrycznego, wypadkowa prędkość zderzeń przyjmie postać:

$$v_s^* = 2v_s \quad (5.8)$$

W celu wyeliminowania wpływu ściśliwości powietrza, wypadkową prędkość zderzeń ograniczono do 0,2 Ma. Stąd maksymalna prędkość każdego ze strumieni została ograniczona do połowy tej wartości:

$$v_{s_{\max}} \leq 0,1M_a \quad (5.9)$$

co dla atmosfery wzorcowej wynosi:

$$v_{s_{\max}} \leq 34 \text{ m/s} \quad (5.10)$$

Prędkość minimalną ograniczono do 10% prędkości maksymalnej:

$$v_{s_{min}} \geq 3,4 \text{ m/s} \quad (5.11)$$

Powyższe ograniczenie ma na celu ograniczenie obliczeń konfiguracji, w których prędkość strumieni względem wysokości sekcji spiętrzenia będzie na tyle niska, że zanim dojdzie do zderzenia nastąpi znacząca dyssypacja energii strumieni w otoczeniu. W kontekście badań takie warianty nie wносиłyby istotnej wartości, a mogłyby zaburzyć interpretację globalnych charakterystyk i powierzchni odpowiedzi.

Tab. 5.4. Zestawienie wariantów przyjętych do obliczeń i odpowiadających im zakresów parametrów wejściowych.

<i>Wariant</i>	v_s [m/s]	w_s [mm]	w_{smax}/h_{SP} [-]
1	1 – 34	56,1 – 280,6	1/8
2	1 – 34	28,1 – 140,3	1/8
3	1 – 34	14 – 70,2	1/8
4	1 – 34	7 – 35,1	1/8
5	1 – 34	4,7 – 23,4	1/6
6	1 – 34	2,3 – 11,7	1/6
7	1 – 34	1,2 – 5,9	1/6
8	1 – 34	0,6 – 2,9	1/6

5.4.2 Procedura obliczeń

Dla każdego z ośmiu wariantów geometrycznych wykonano osobny cykl obliczeniowy składający się z następujących etapów:

1. Wyznaczenie i obliczenie punktów DOE metodą Central Composite Design dla pełnego zakresu parametrów wejściowych.
2. Wyznaczenie na podstawie DOE wstępnej powierzchni odpowiedzi metodą Generic Aggregation z dodatkowymi 20 punktami weryfikacyjnymi.
3. Wykonanie cyklu obliczeń dla dodatkowych punktów zwiększających rozdzielczość powierzchni odpowiedzi w celu osiągnięcia maksymalnego przewidywanego błędu dla parametru wyjściowego F_{PS} na poziomie $\leq 0,1$ N oraz przy założeniu nie mniej niż 100 punktów zagęszczających.
4. Przeprowadzenie optymalizacji powierzchni odpowiedzi metodą MOGA w celu wyznaczenia po jednym punkcie reprezentacyjnym przy uwzględnieniu dodatkowych ograniczeń i celów:
 - minimalizacja wartości parametrów wejściowych w_s i v_s ,
 - minimalizacja teoretycznej mocy niezbędnej do przyspieszenia strumieni spiętrzających P'_s ,

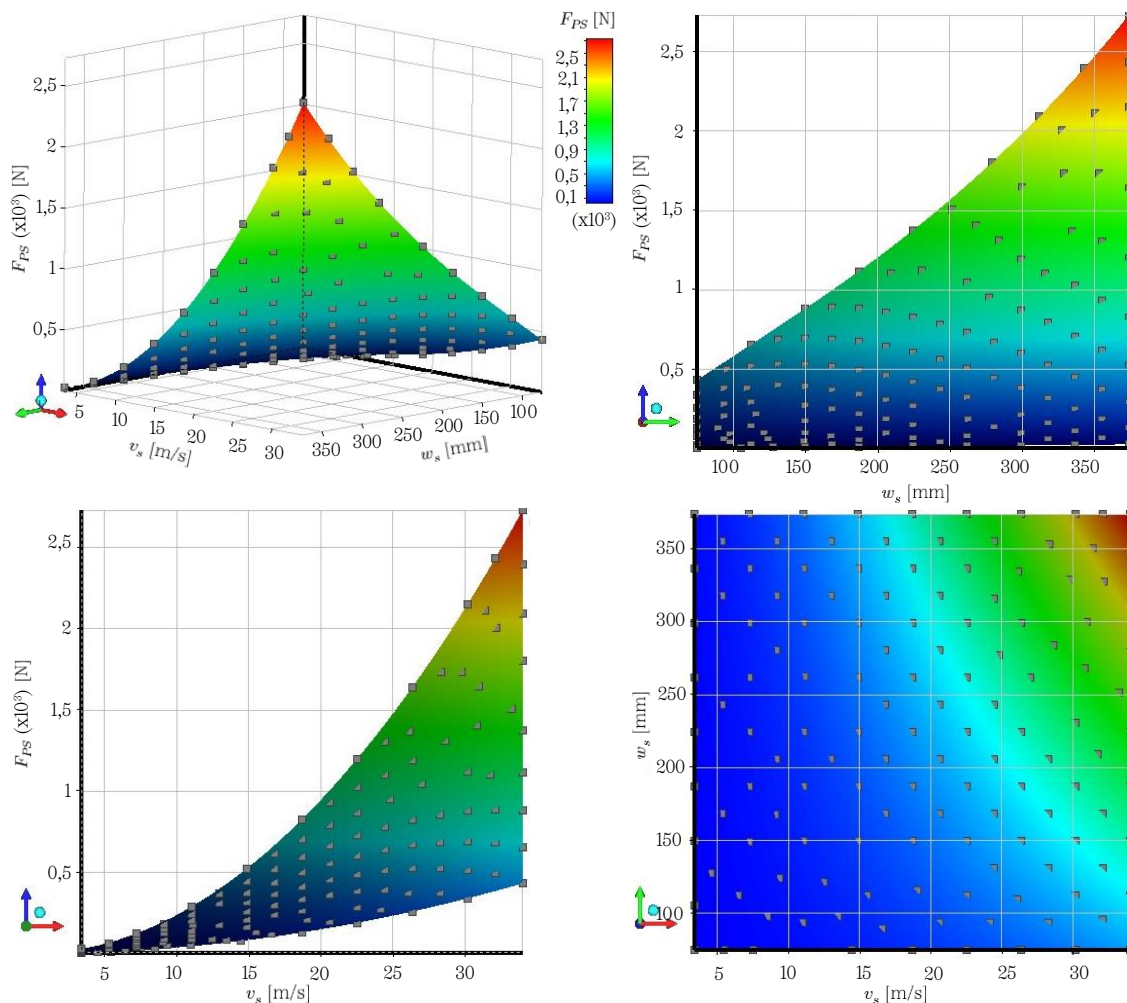
- maksymalizacja siły generowanej na powierzchni spiętrzeni F_{PS} względem teoretycznej łącznej siła ciągu pary strumieni spiętrzających T'_s przy zachowaniu ich stosunku na poziomie nie mniejszym niż 1,2,
- maksymalizacja wartości siły F_{PS} przy zachowaniu jej wartości stosunku na poziomie nie mniejszym niż 20% oporu aerodynamicznego przypadającego na powierzchnię pojedynczej sekcji spiętrzającej zgodnie z równaniem:

$$F_{PS_{min}} = 0,2 \frac{F_t}{n_{SP}} = \frac{276,5 N}{n_{SP}} \quad (5.12)$$

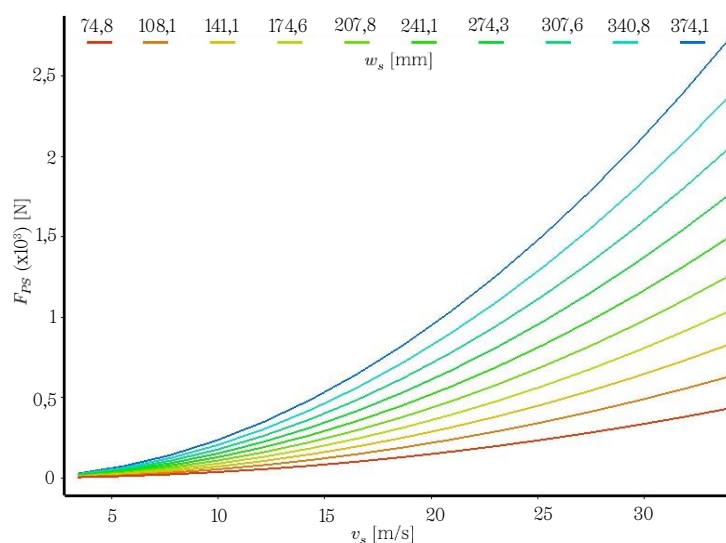
5. Weryfikacja punktów reprezentacyjnych przewidywanych w procesie optymalizacji powierzchni odpowiedzi poprzez ich bezpośrednie obliczenie.

5.4.3 Wyniki

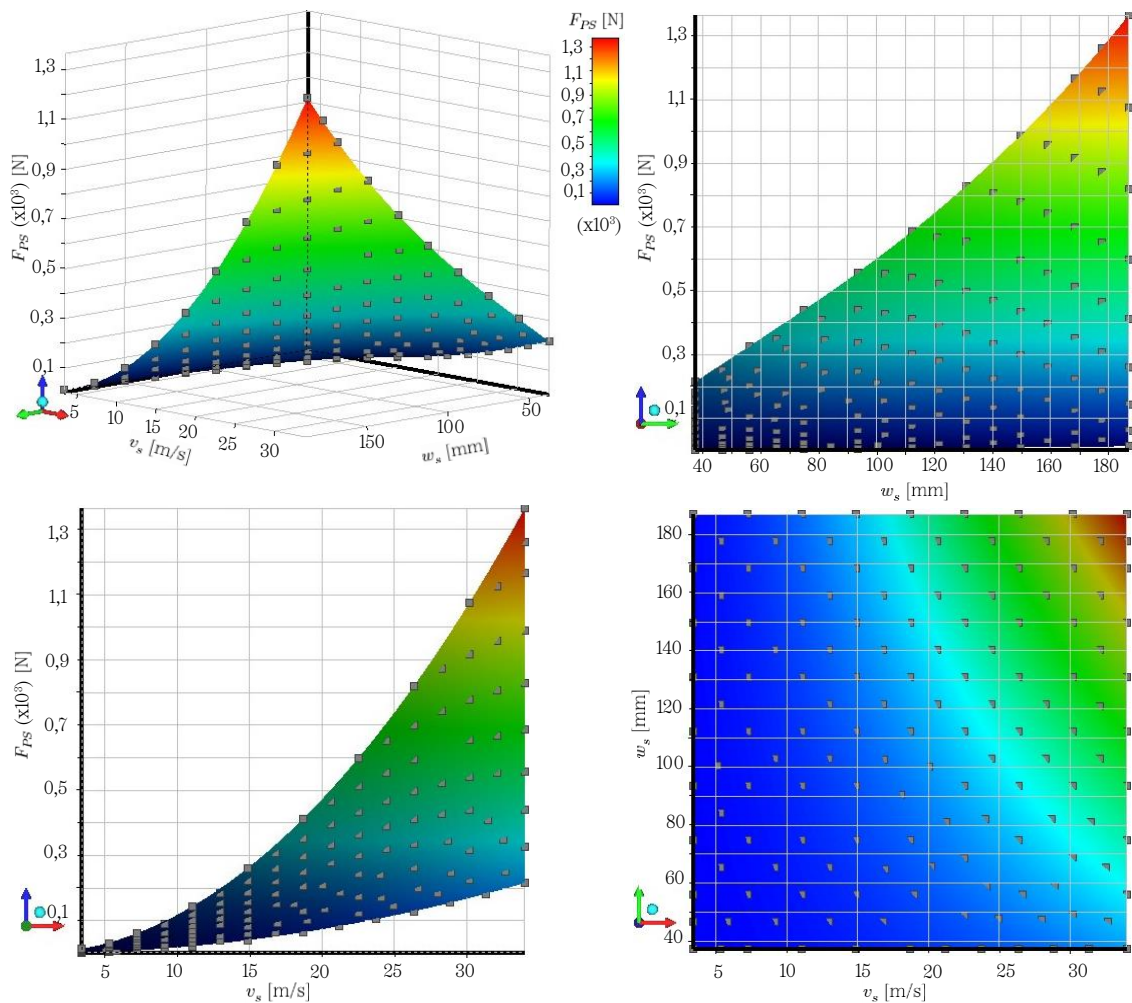
Szczegółowe dane dotyczące punktów DOE, weryfikacyjnych i uszczegółwiających zamieszczono dla każdego z wariantów osobno w załącznikach A-H. Powierzchnie odpowiedzi powstałe na podstawie tych danych przedstawiono w formie dwuwymiarowych i trójwymiarowych wykresów. Rys. 5.12-3.27. przedstawiają wpływ parametrów wejściowych w_s i v_s na wartość generowanej siły F_{PS} . Rys. 5.28-5.43 przedstawiają wpływ parametrów wejściowych na stosunek siły spiętrzenia do teoretycznej siły ciągu pary strumieni oraz wrażliwość wybranych parametrów wyjściowych na parametry wejściowe. Punkty widoczne na wykresach przedstawiających powierzchnie odpowiedzi reprezentują wartości obliczone. Wykresy zgodności dopasowania wartości F_{PS}/T'_s przewidywanych na podstawie powierzchni odpowiedzi względem wartości punktów obliczonych przedstawiono zbiorczo na rys 5.44. Wartości punktów wyznaczonych w procesie optymalizacji powierzchni odpowiedzi przedstawiono zbiorczo w tab. 5.5, natomiast porównanie wartości przewidywanych z wartościami obliczonymi w etapie weryfikacji w tab. 5.6. Rozkłady prędkości w płaszczyźnie xy dla konfiguracji wyznaczonych w procesie optymalizacji przedstawiono zbiorczo na rys. 5.45. Rozkłady ciśnienia na powierzchniach spiętrzenia dla tych konfiguracji przedstawiono na wykresach na rys. 5.46 i rys. 5.47. Zakres wartości maksymalnych i minimalnych obliczonych dla parametrów wyjściowych przedstawiono w tab. 5.7, natomiast maksymalny przewidywany błąd wartości siły spiętrzenia F_{PS} w tab. 5.8.



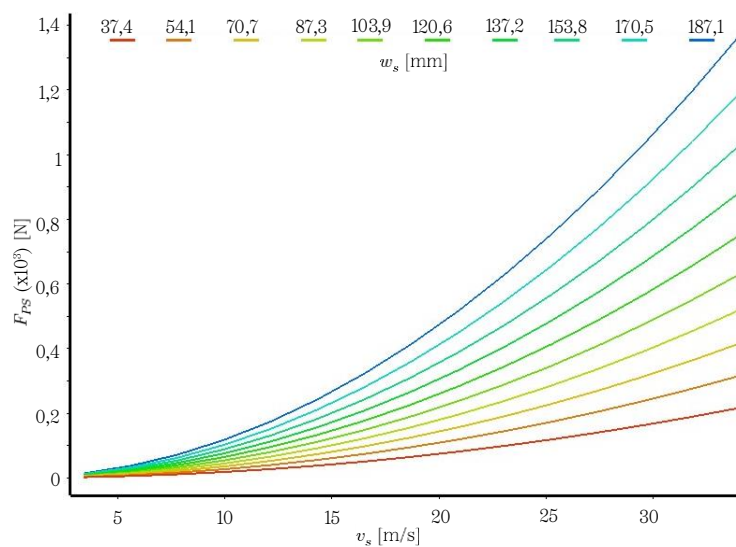
Rys. 5.12. Powierzchnia odpowiedzi w widoku izometrycznym oraz w rzutach na każdą z trzech płaszczyzn reprezentująca wpływ parametrów wejściowych v_s i w_s na parametr wyjściowy F_{PS} dla wariantu obliczeniowego nr 1.



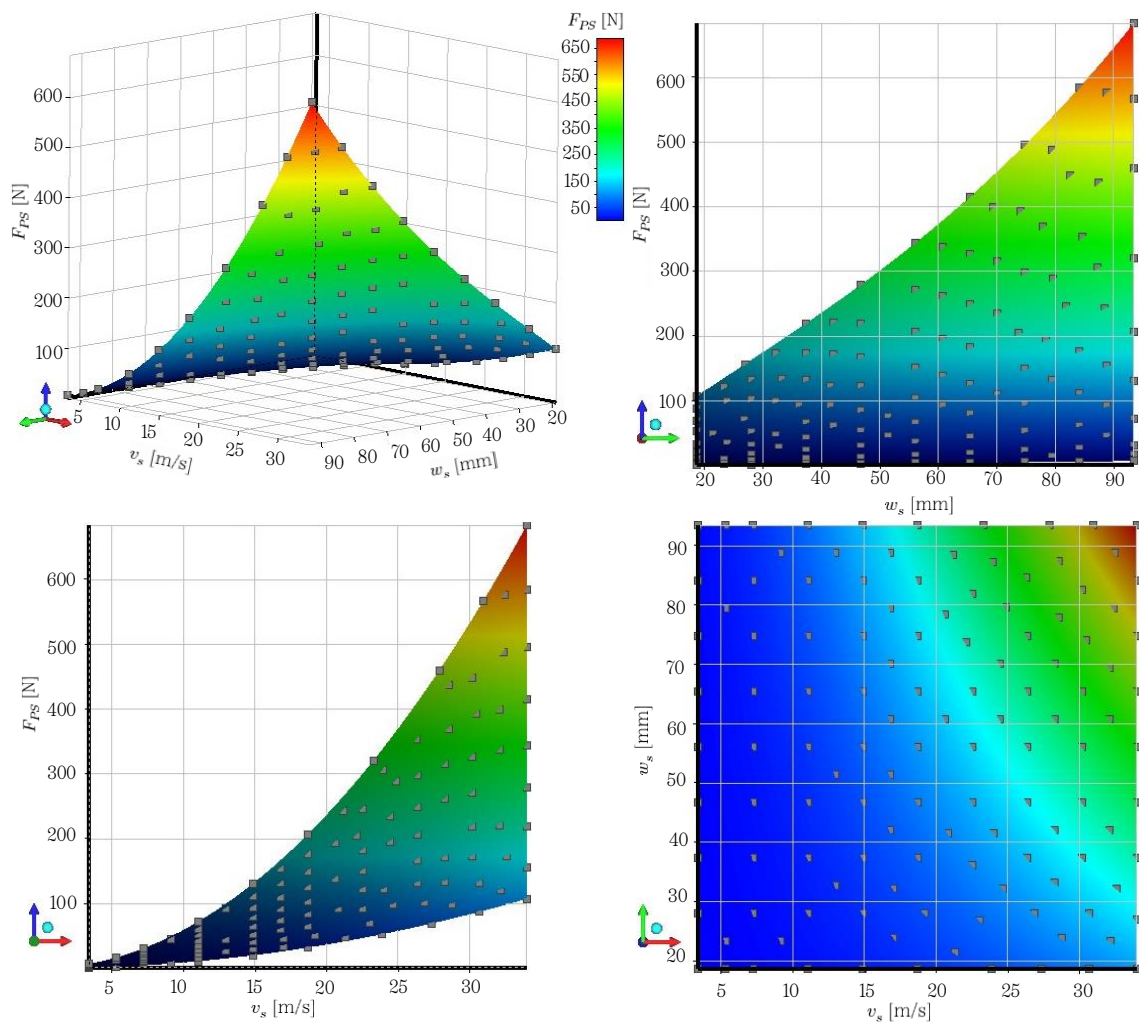
Rys. 5.13. Wykres konturowy przedstawiający wpływ parametrów wejściowych v_s i w_s na parametr wyjściowy F_{PS} dla wariantu obliczeniowego nr 1.



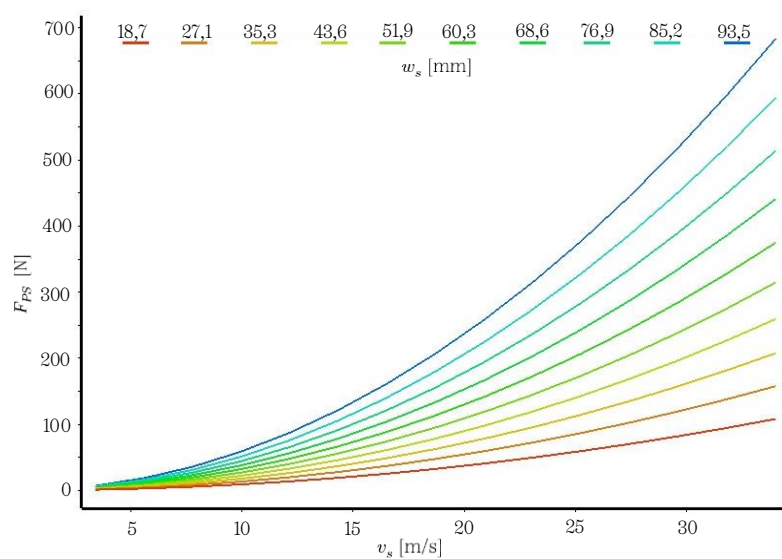
Rys. 5.14. Powierzchnia odpowiedzi w widoku izometrycznym oraz w rzutach na każdą z trzech płaszczyzn reprezentująca wpływ parametrów wejściowych v_s i w_s na parametr wyjściowy F_{PS} dla wariantu obliczeniowego nr 2.



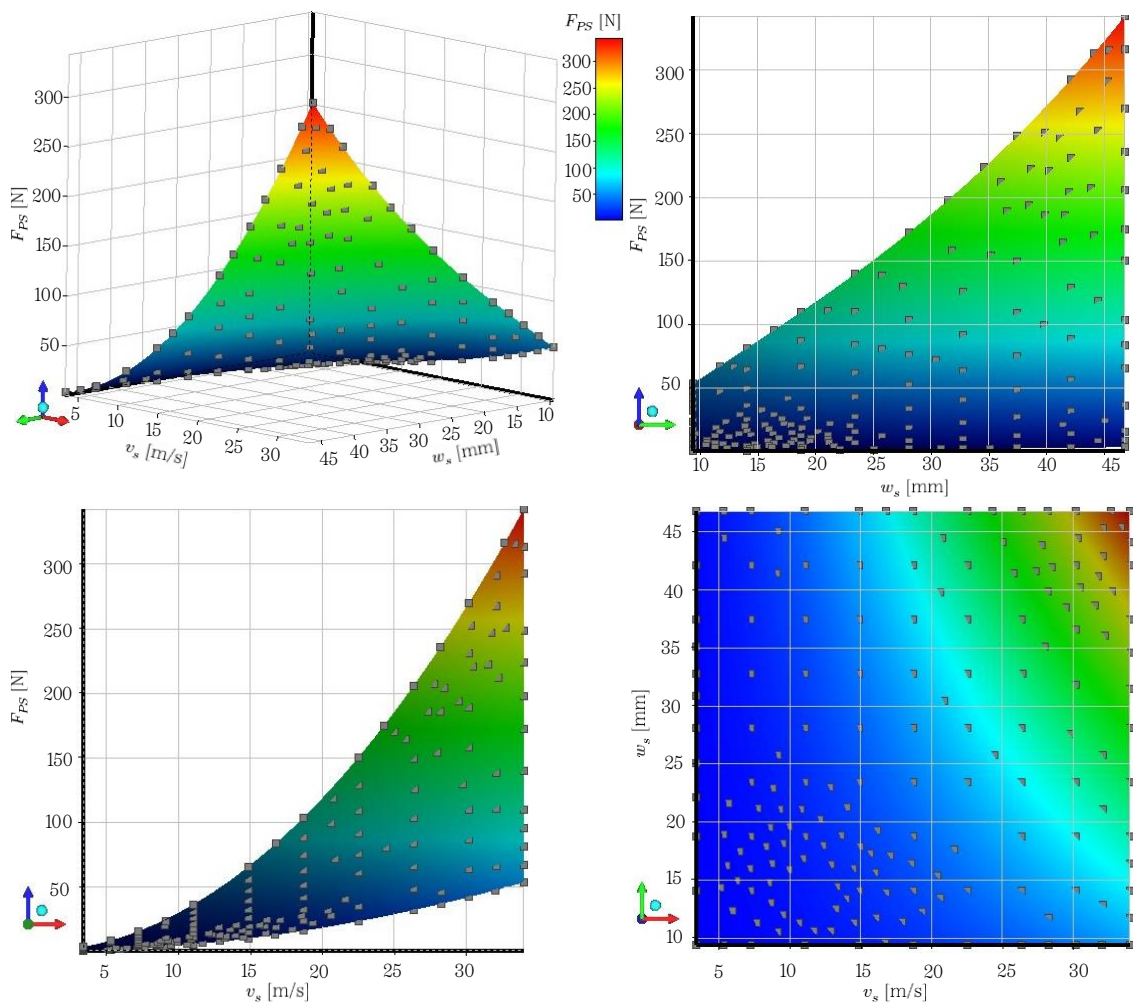
Rys. 5.15. Wykres konturowy przedstawiający wpływ parametrów wejściowych v_s i w_s na parametr wyjściowy F_{PS} dla wariantu obliczeniowego nr 2.



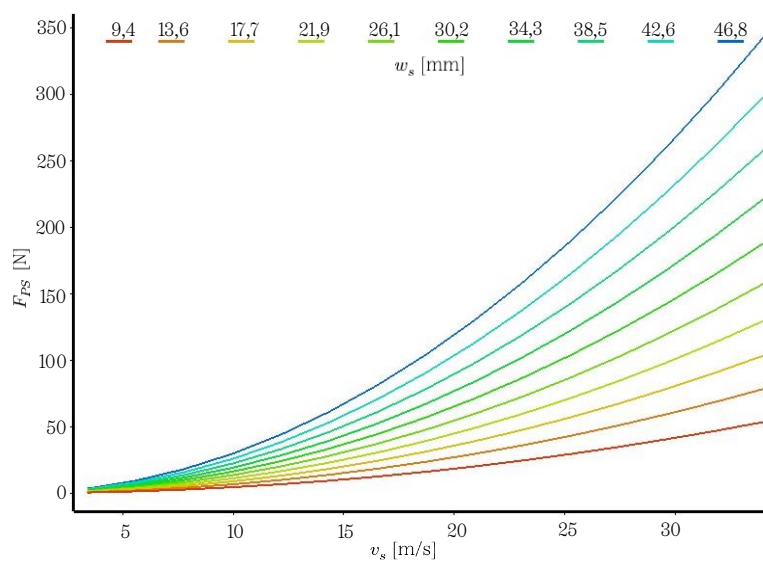
Rys. 5.16. Powierzchnia odpowiedzi w widoku izometrycznym oraz w rzutach na każdą z trzech płaszczyzn reprezentująca wpływ parametrów wejściowych v_s i w_s na parametr wyjściowy F_{PS} dla wariantu obliczeniowego nr 3.



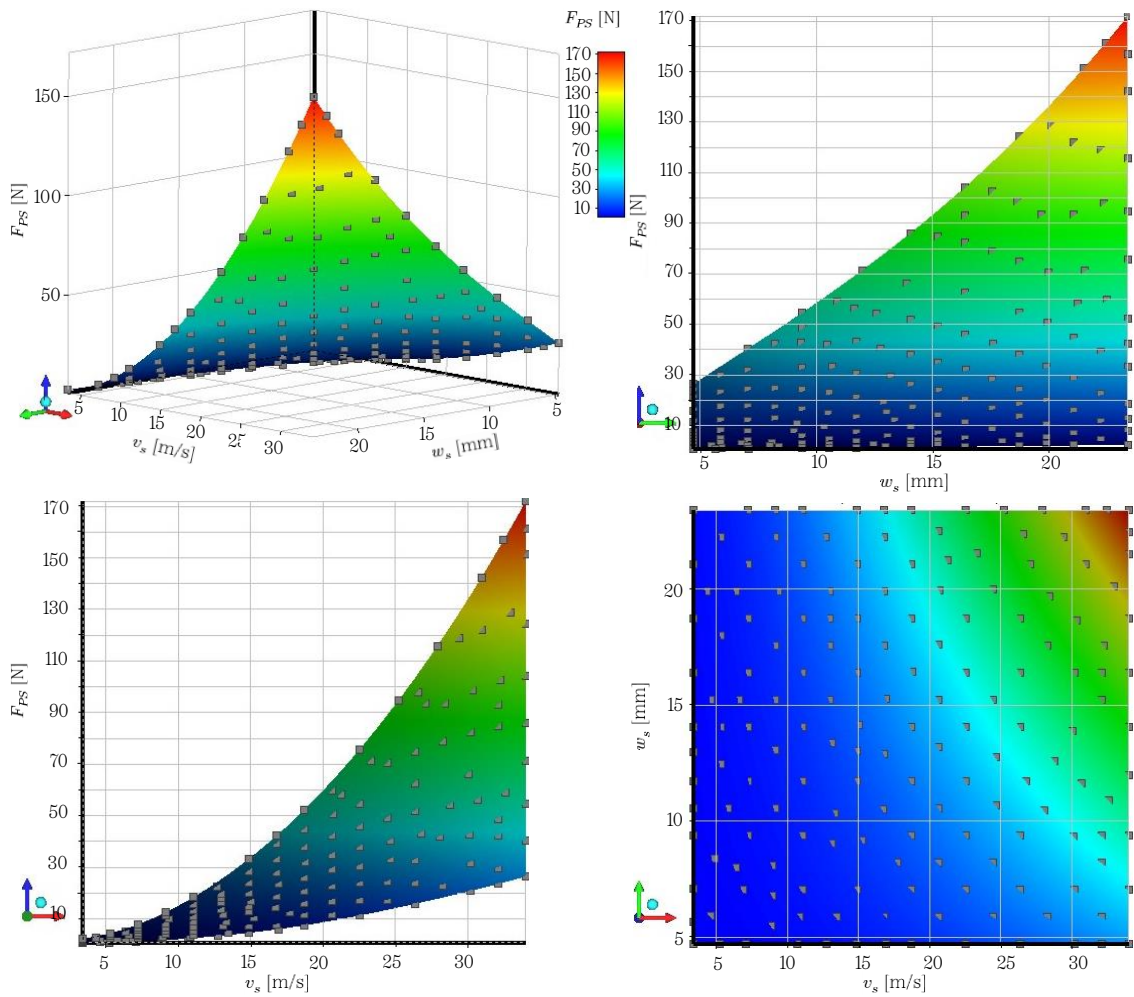
Rys. 5.17. Wykres konturowy przedstawiający wpływ parametrów wejściowych v_s i w_s na parametr wyjściowy F_{PS} dla wariantu obliczeniowego nr 3.



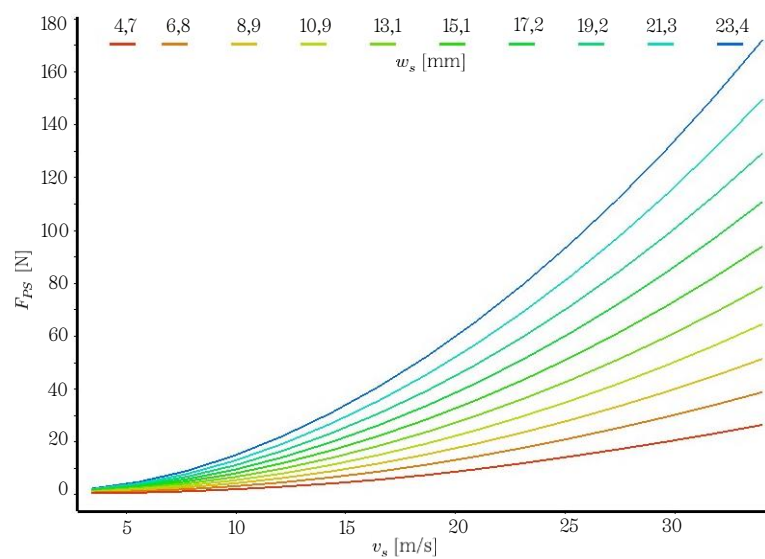
Rys. 5.18. Powierzchnia odpowiedzi w widoku izometrycznym oraz w rzutach na każdą z trzech płaszczyzn reprezentująca wpływ parametrów wejściowych v_s i w_s na parametr wyjściowy F_{PS} dla wariantu obliczeniowego nr 4.



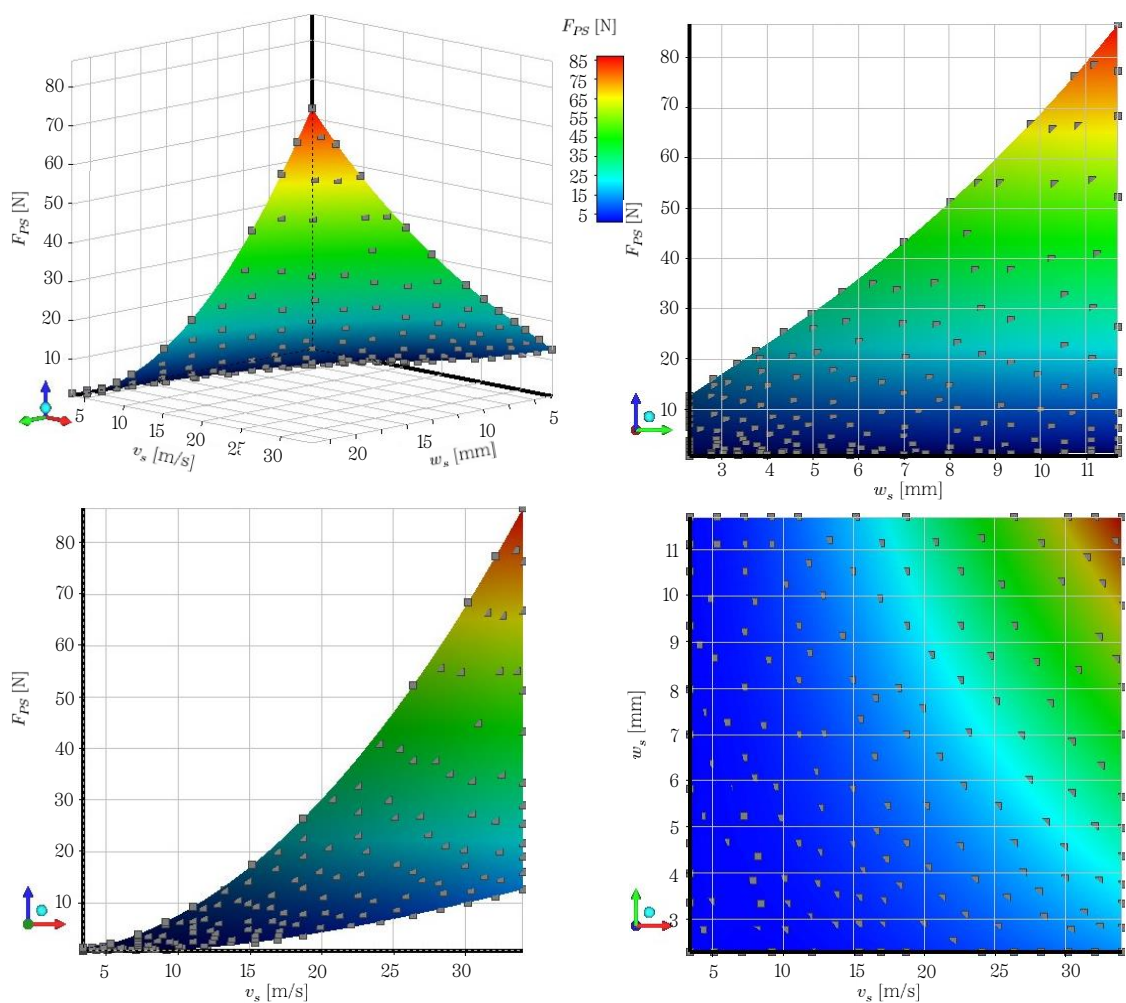
Rys. 5.19. Wykres konturowy przedstawiający wpływ parametrów wejściowych v_s i w_s na parametr wyjściowy F_{PS} dla wariantu obliczeniowego nr 4.



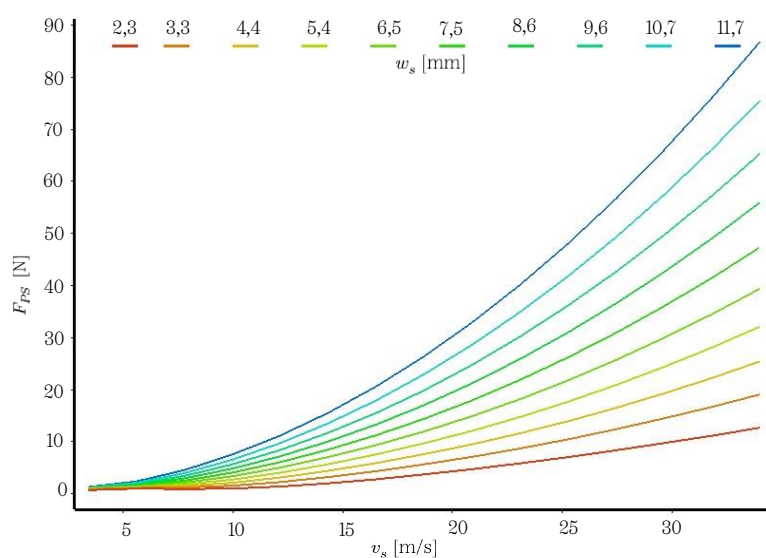
Rys. 5.20. Powierzchnia odpowiedzi w widoku izometrycznym oraz w rzutach na każdą z trzech płaszczyzn reprezentująca wpływ parametrów wejściowych v_s i w_s na parametr wyjściowy F_{PS} dla wariantu obliczeniowego nr 5.



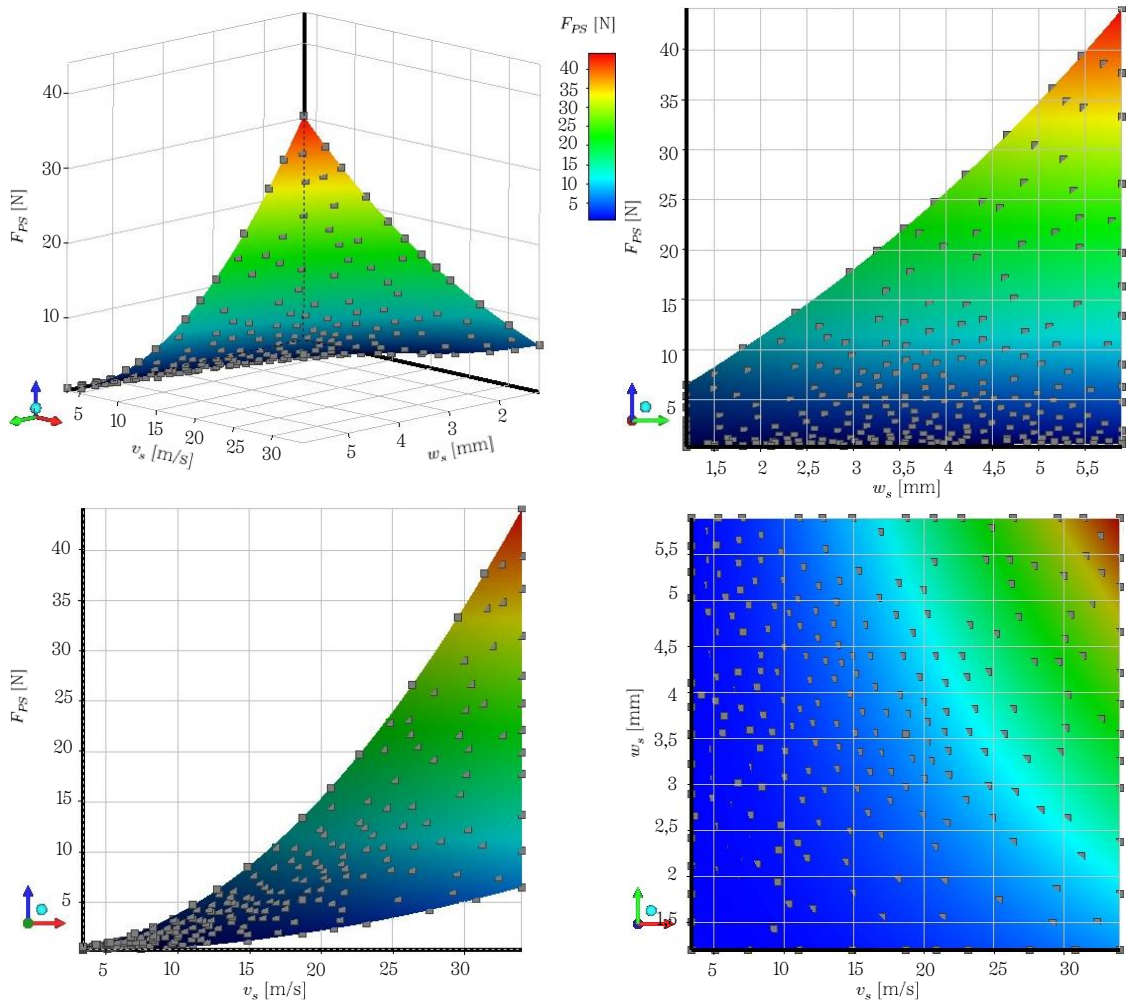
Rys. 5.21. Wykres konturowy przedstawiający wpływ parametrów wejściowych v_s i w_s na parametr wyjściowy F_{PS} dla wariantu obliczeniowego nr 5.



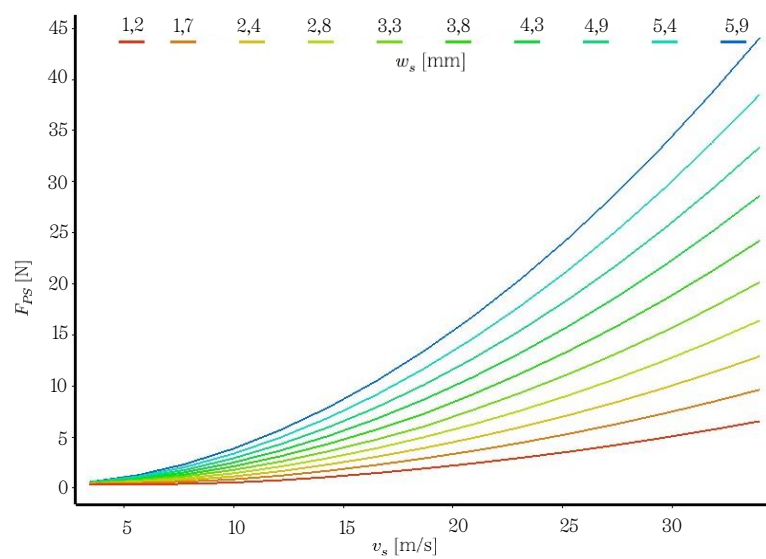
Rys. 5.22. Powierzchnia odpowiedzi w widoku izometrycznym oraz w rzutach na każdą z trzech płaszczyzn reprezentująca wpływ parametrów wejściowych v_s i w_s na parametr wyjściowy F_{PS} dla wariantu obliczeniowego nr 6.



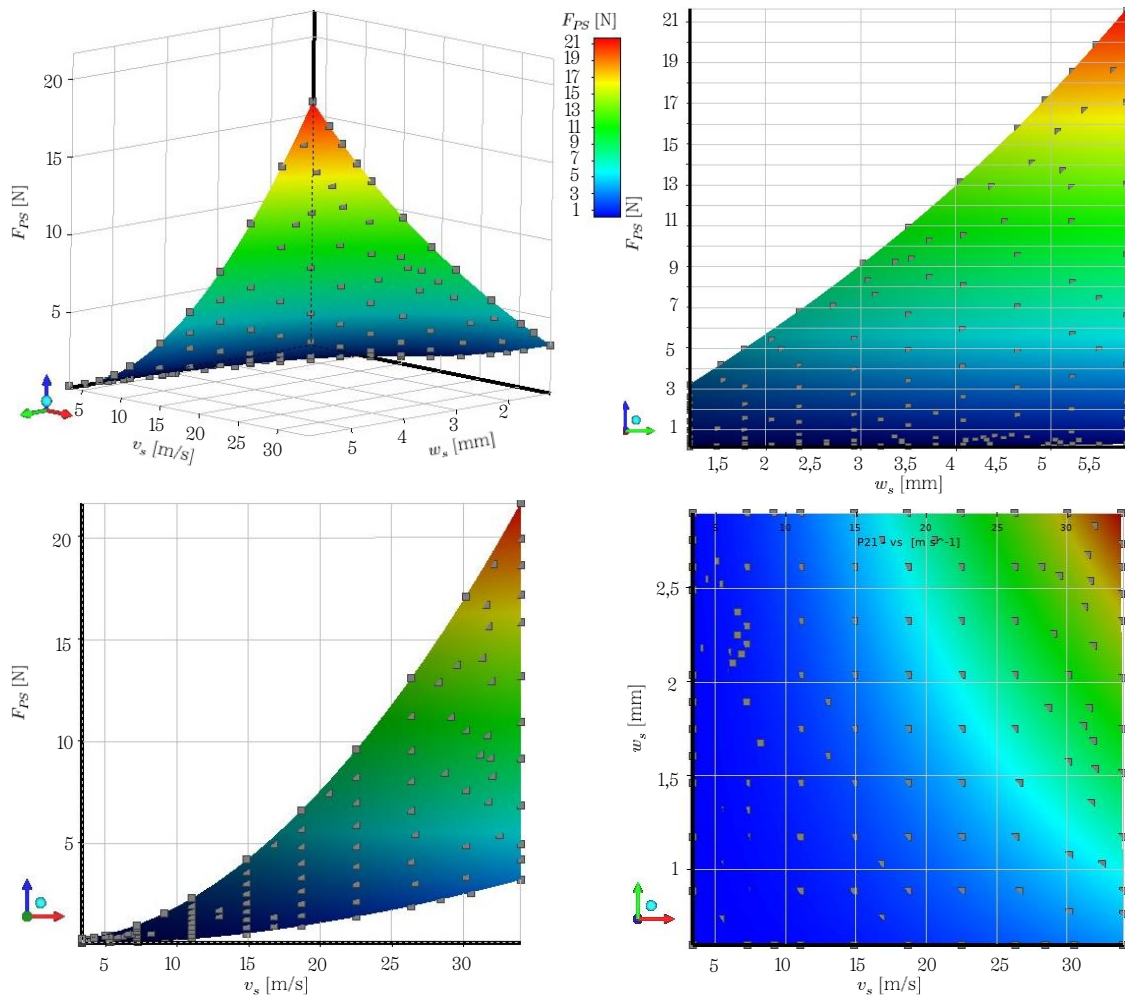
Rys. 5.23. Wykres konturowy przedstawiający wpływ parametrów wejściowych v_s i w_s na parametr wyjściowy F_{PS} dla wariantu obliczeniowego nr 6.



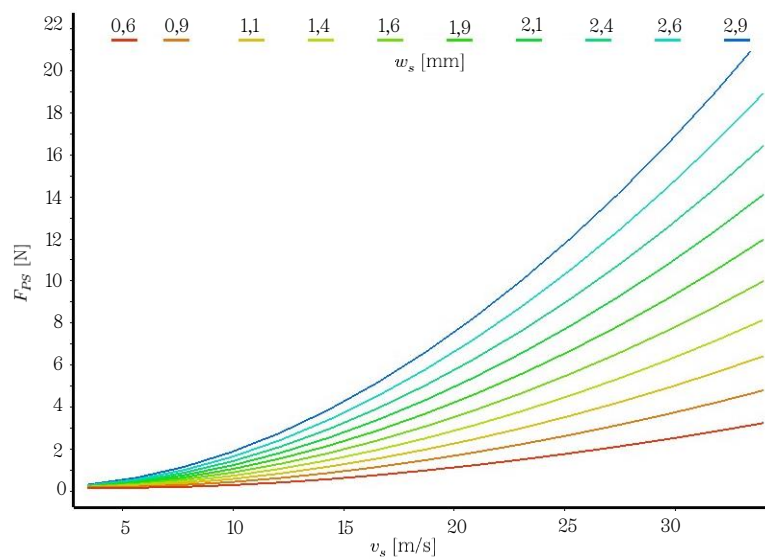
Rys. 5.24. Powierzchnia odpowiedzi w widoku izometrycznym oraz w rzutach na każdą z trzech płaszczyzn reprezentująca wpływ parametrów wejściowych v_s i w_s na parametr wyjściowy F_{PS} dla wariantu obliczeniowego nr 7.



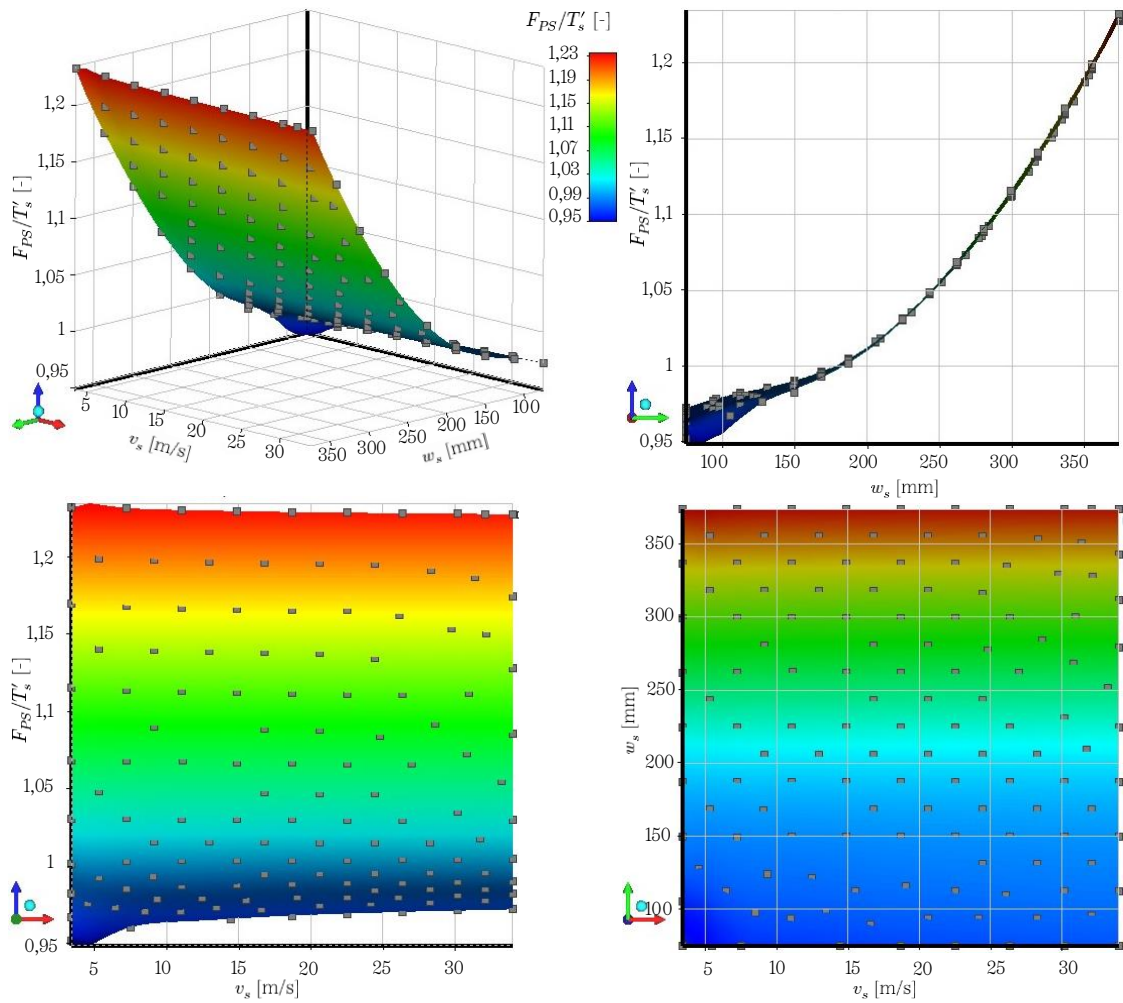
Rys. 5.25. Wykres konturowy przedstawiający wpływ parametrów wejściowych v_s i w_s na parametr wyjściowy F_{PS} dla wariantu obliczeniowego nr 7.



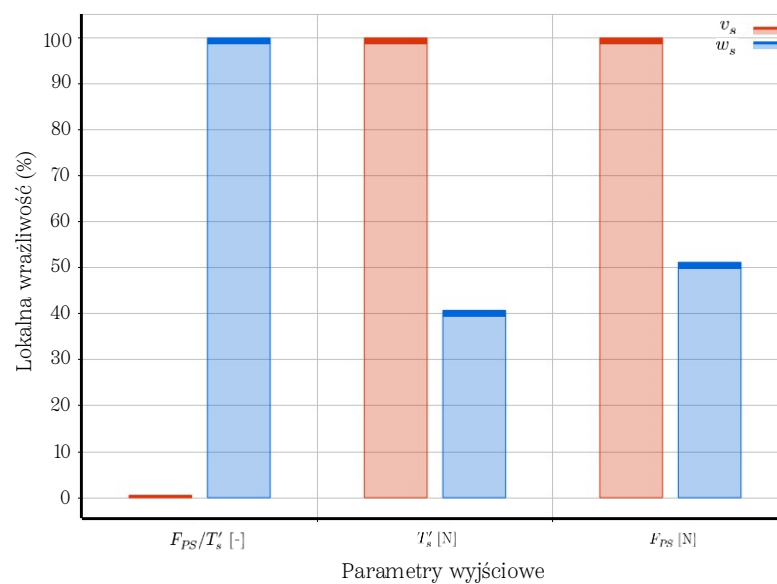
Rys. 5.26. Powierzchnia odpowiedzi w widoku izometrycznym oraz w rzutach na każdą z trzech płaszczyzn reprezentująca wpływ parametrów wejściowych v_s i w_s na parametr wyjściowy F_{PS} dla wariantu obliczeniowego nr 8.



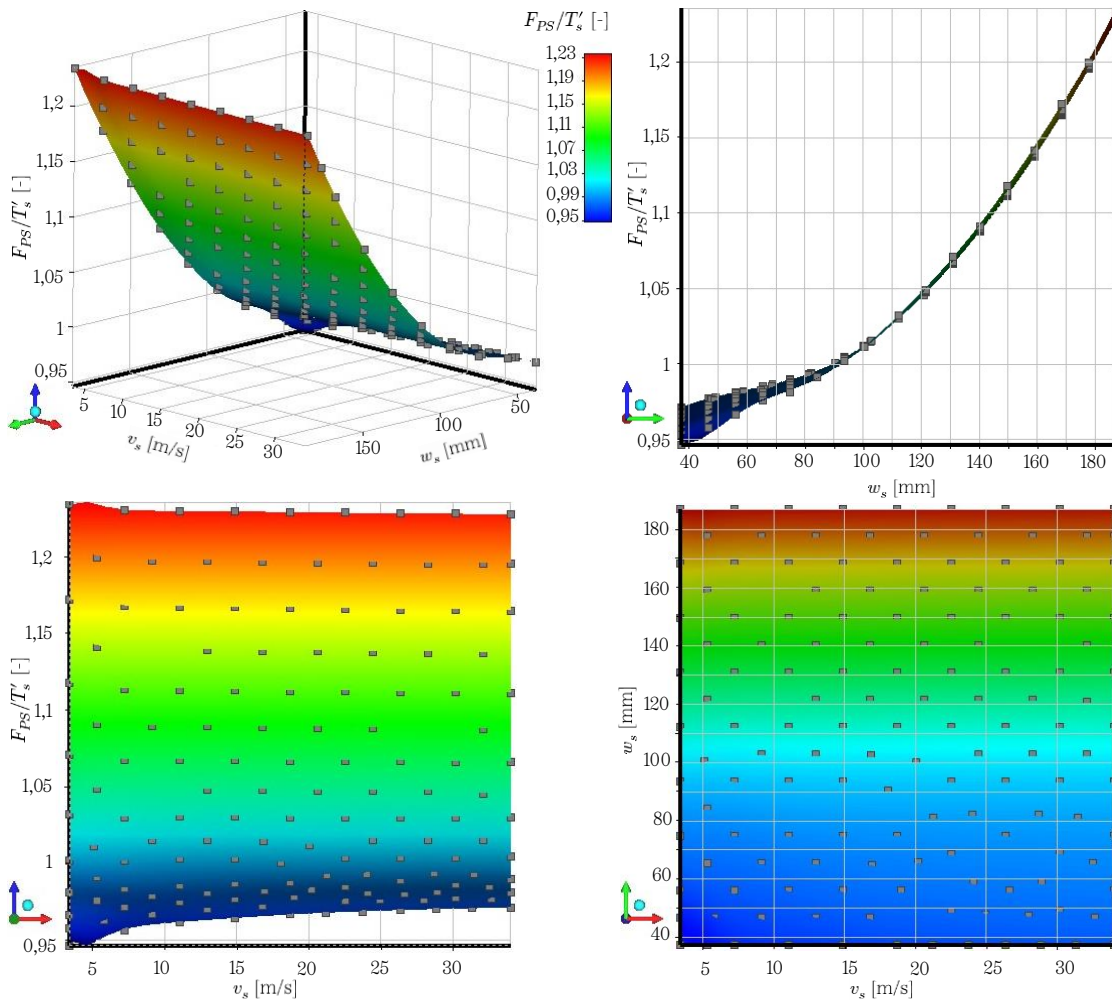
Rys. 5.27. Wykres konturowy przedstawiający wpływ parametrów wejściowych v_s i w_s na parametr wyjściowy F_{PS} dla wariantu obliczeniowego nr 8.



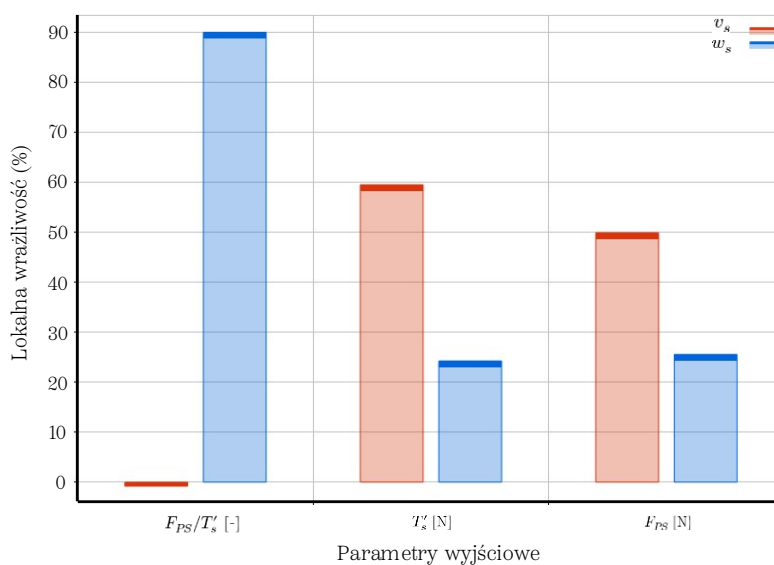
Rys. 5.28. Powierzchnia odpowiedzi w widoku izometrycznym oraz w rzutach na każdą z trzech płaszczyzn reprezentująca wpływ parametrów wejściowych v_s i w_s na parametr wyjściowy F_{PS}/T'_s dla wariantu obliczeniowego nr 1.



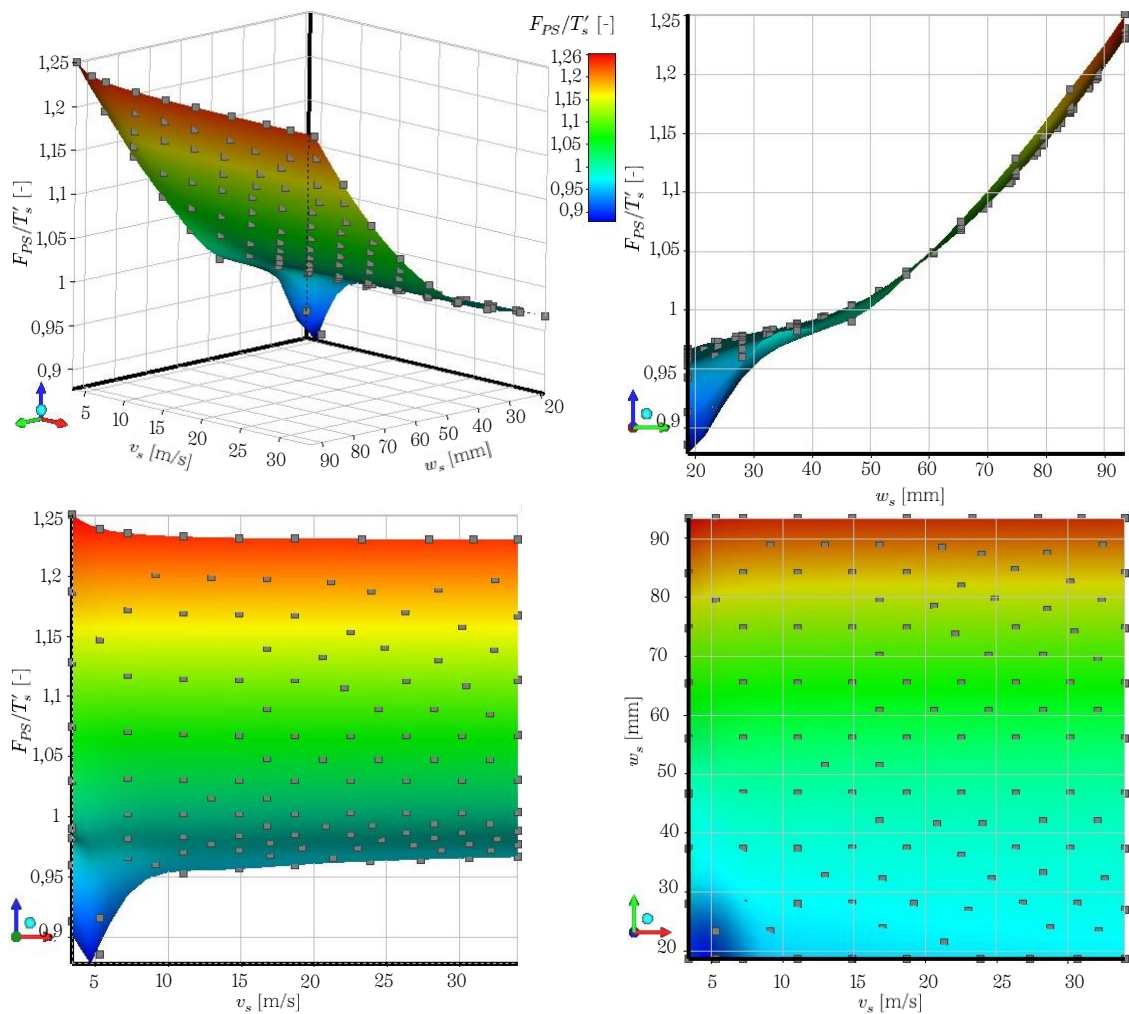
Rys. 5.29. Lokalna wrażliwość wybranych parametrów wyjściowych na parametry wejściowe v_s i w_s dla wariantu obliczeniowego nr 1.



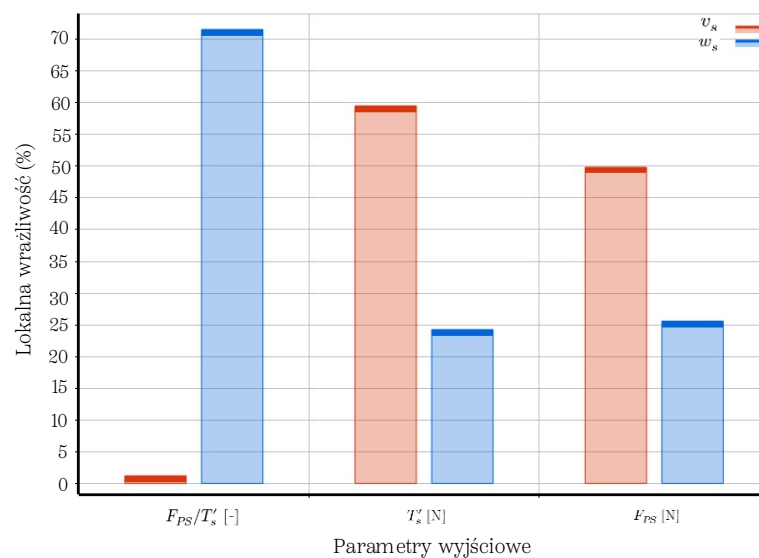
Rys. 5.30. Powierzchnia odpowiedzi w widoku izometrycznym oraz w rzutach na każdą z trzech płaszczyzn reprezentująca wpływ parametrów wejściowych v_s i w_s na parametry wyjściowy F_{PS}/T'_s dla wariantu obliczeniowego nr 2.



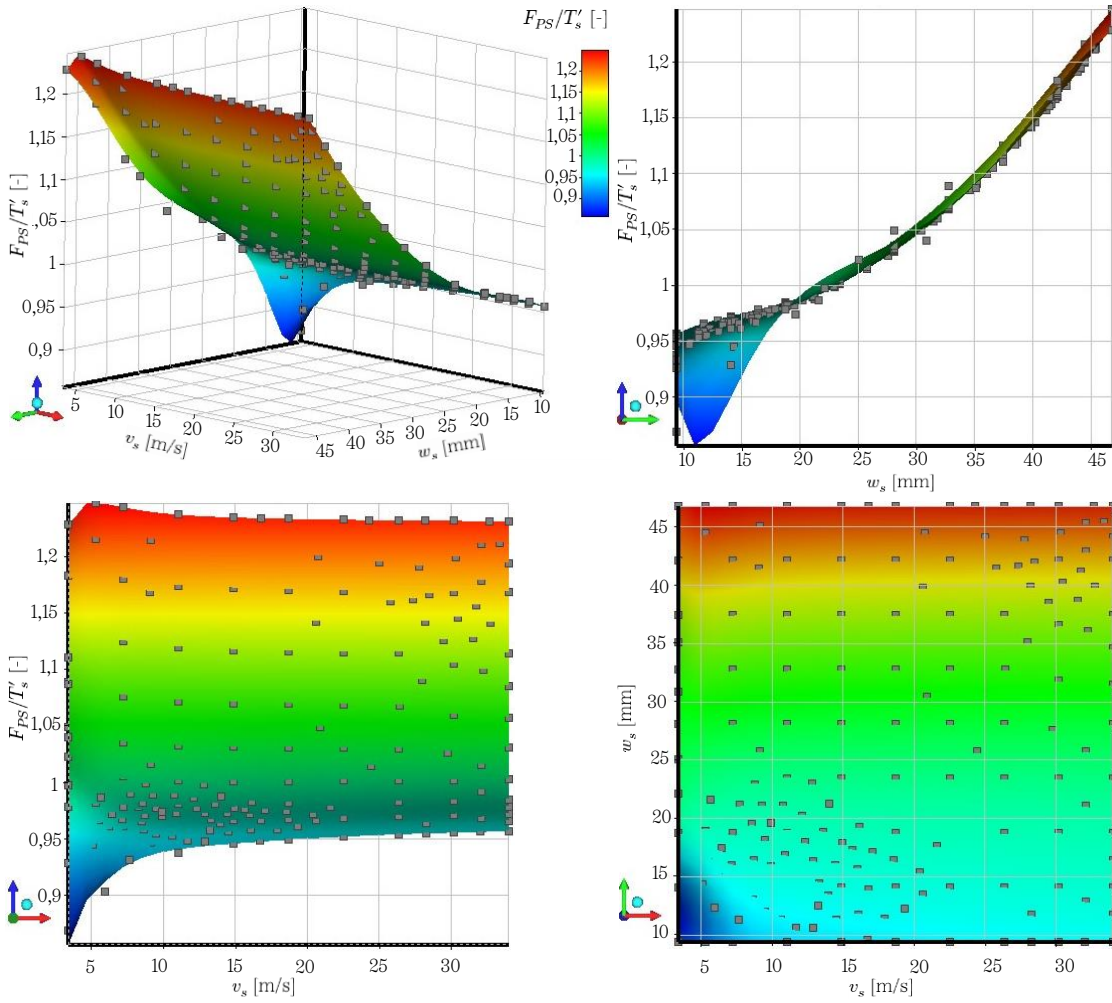
Rys. 5.31. Lokalna wrażliwość wybranych parametrów wyjściowych na parametry wejściowe v_s i w_s dla wariantu obliczeniowego nr 2.



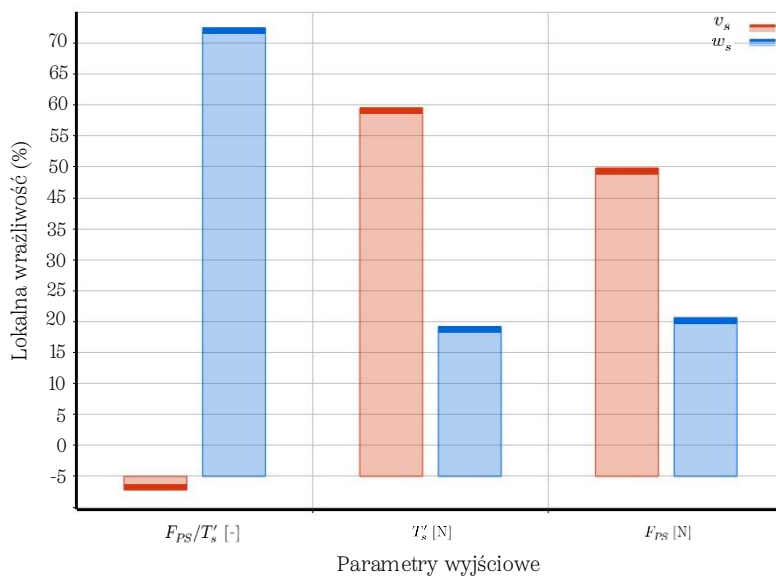
Rys. 5.32. Powierzchnia odpowiedzi w widoku izometrycznym oraz w rzutach na każdą z trzech płaszczyzn reprezentująca wpływ parametrów wejściowych v_s i w_s na parametry wyjściowe F_{PS}/T'_s dla wariantu obliczeniowego nr 3.



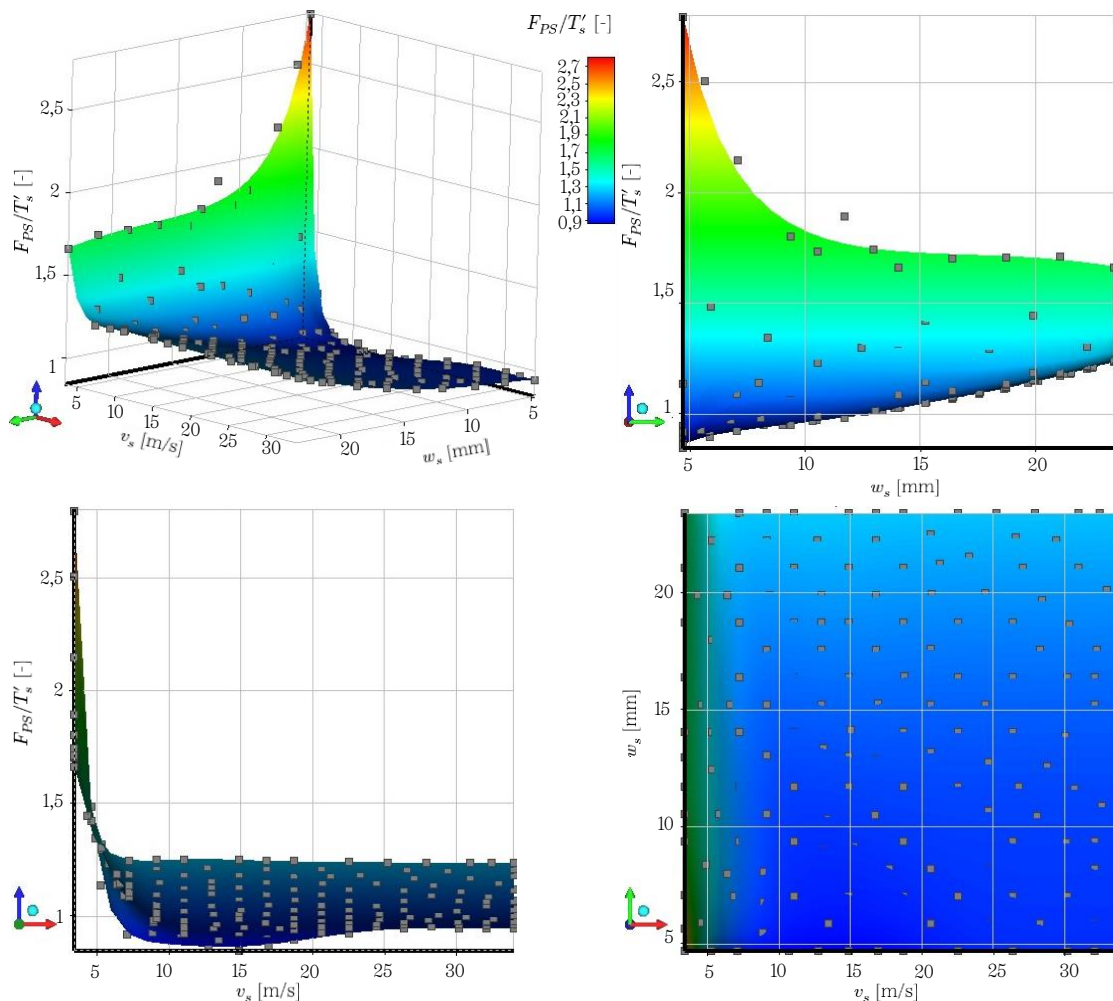
Rys. 5.33. Lokalna wrażliwość wybranych parametrów wyjściowych na parametry wejściowe v_s i w_s dla wariantu obliczeniowego nr 3.



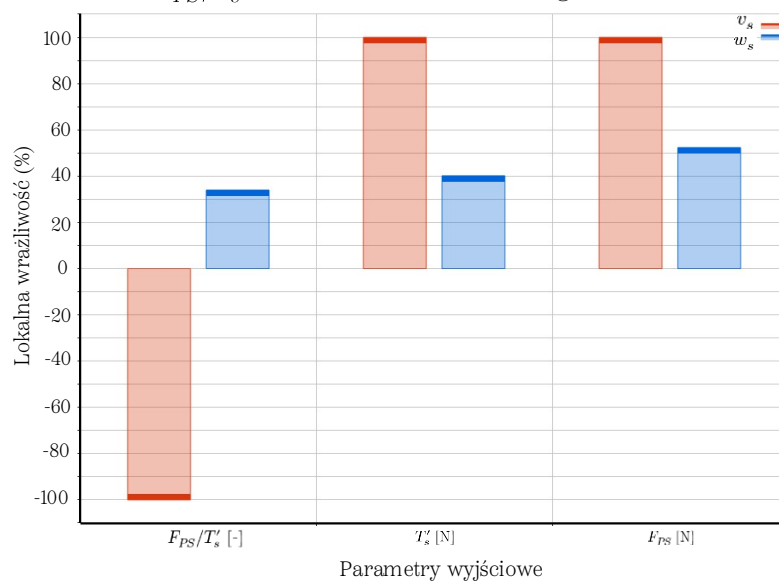
Rys. 5.34. Powierzchnia odpowiedzi w widoku izometrycznym oraz w rzutach na każdą z trzech płaszczyzn reprezentująca wpływ parametrów wejściowych v_s i w_s na parametr wyjściowy F_{PS}/T'_s dla wariantu obliczeniowego nr 4.



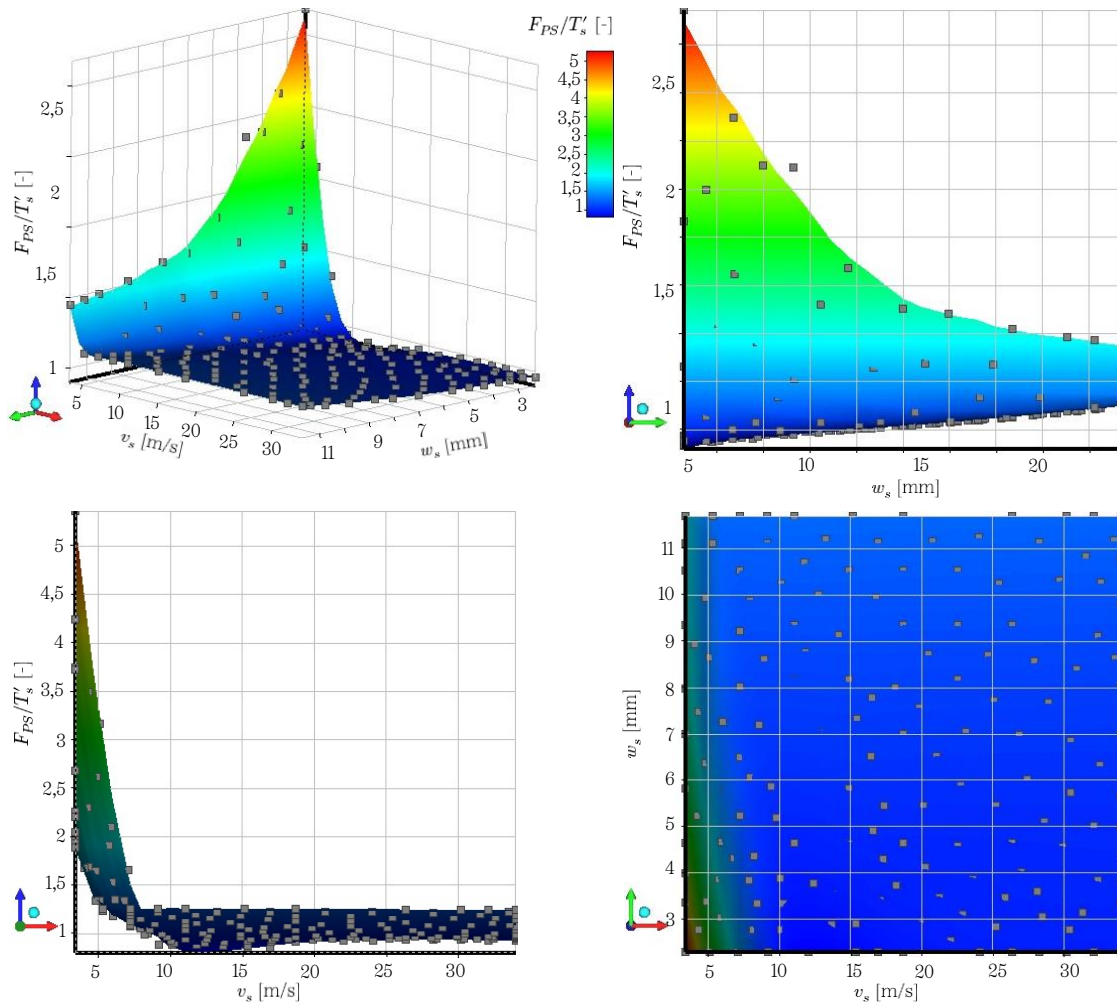
Rys. 5.35. Lokalna wrażliwość wybranych parametrów wyjściowych na parametry wejściowe v_s i w_s dla wariantu obliczeniowego nr 4.



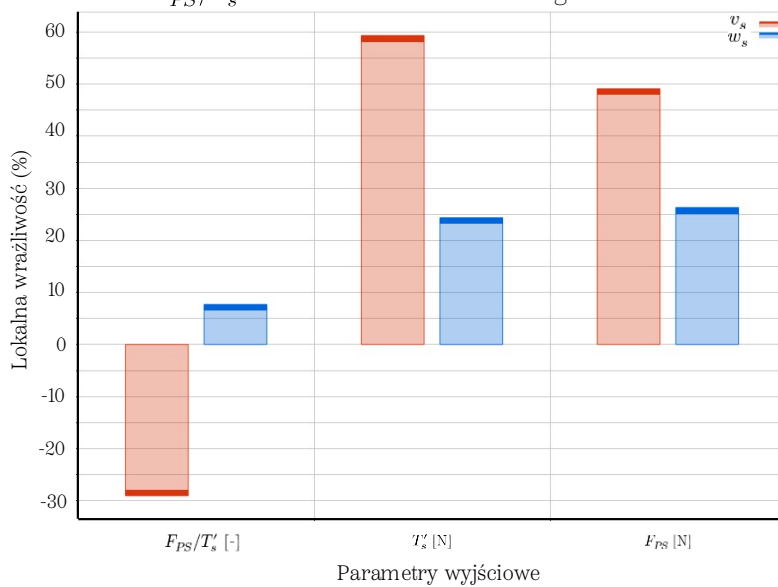
Rys. 5.36. Powierzchnia odpowiedzi w widoku izometrycznym oraz w rzutach na każdą z trzech płaszczyzn reprezentująca wpływ parametrów wejściowych v_s i w_s na parametr wyjściowy F_{PS}/T'_s dla wariantu obliczeniowego nr 5.



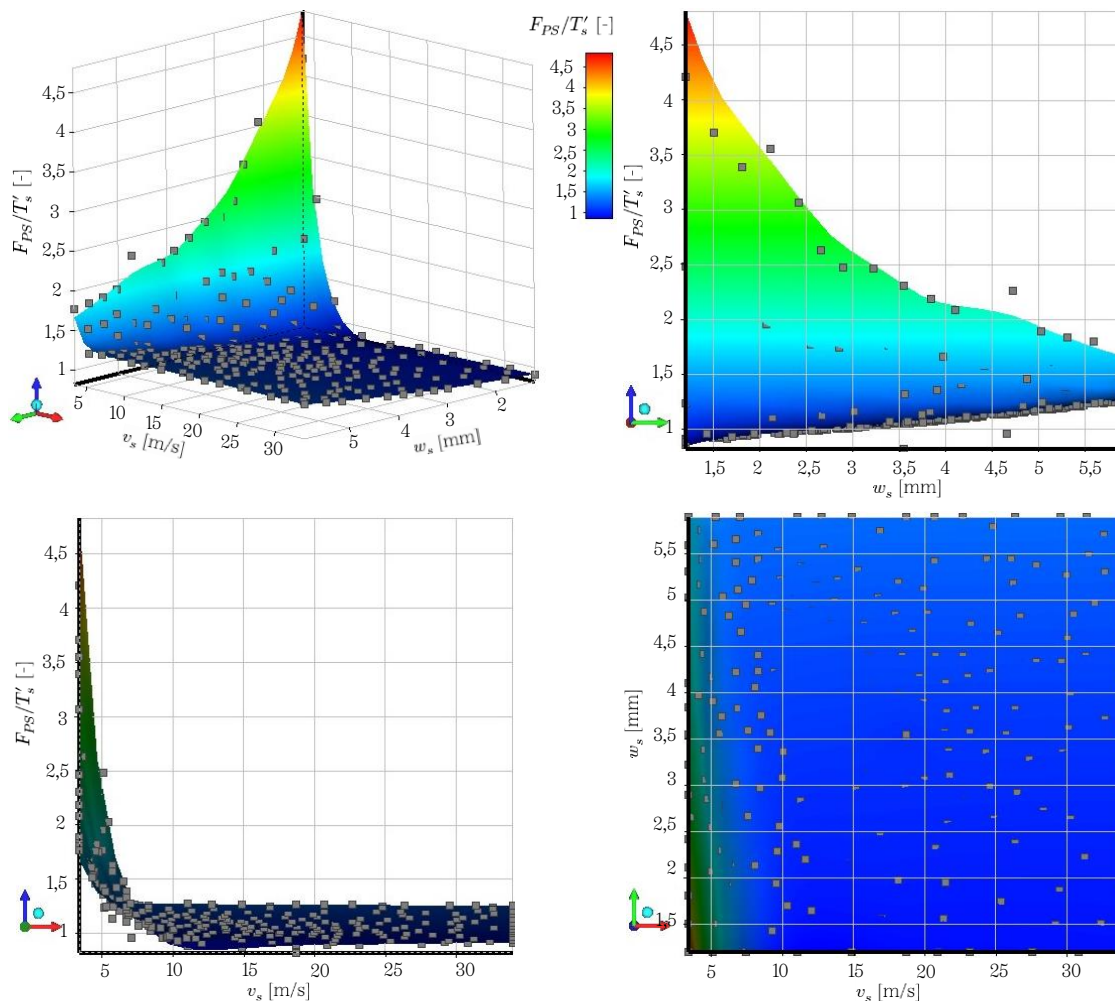
Rys. 5.37. Lokalna wrażliwość wybranych parametrów wyjściowych na parametry wejściowe v_s i w_s dla wariantu obliczeniowego nr 5.



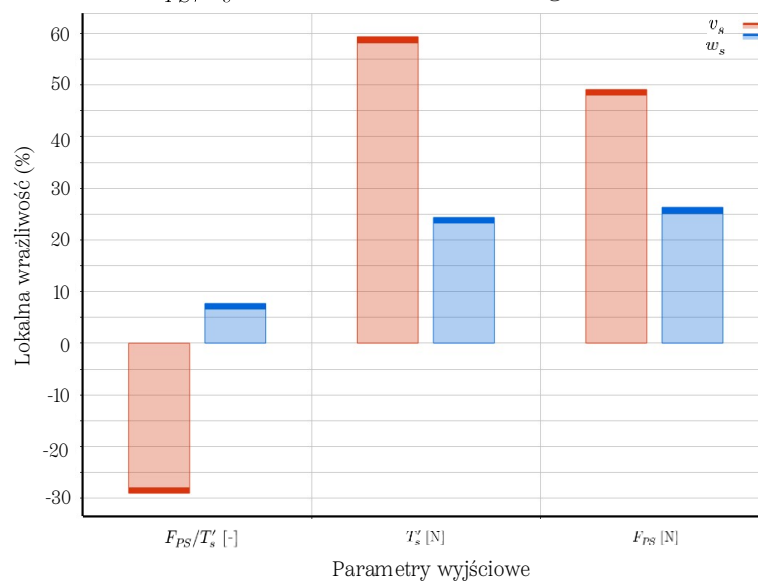
Rys. 5.38. Powierzchnia odpowiedzi w widoku izometrycznym oraz w rzutach na każdą z trzech płaszczyzn reprezentująca wpływ parametrów wejściowych v_s i w_s na parametr wyjściowy F_{PS}/T'_s dla wariantu obliczeniowego nr 6.



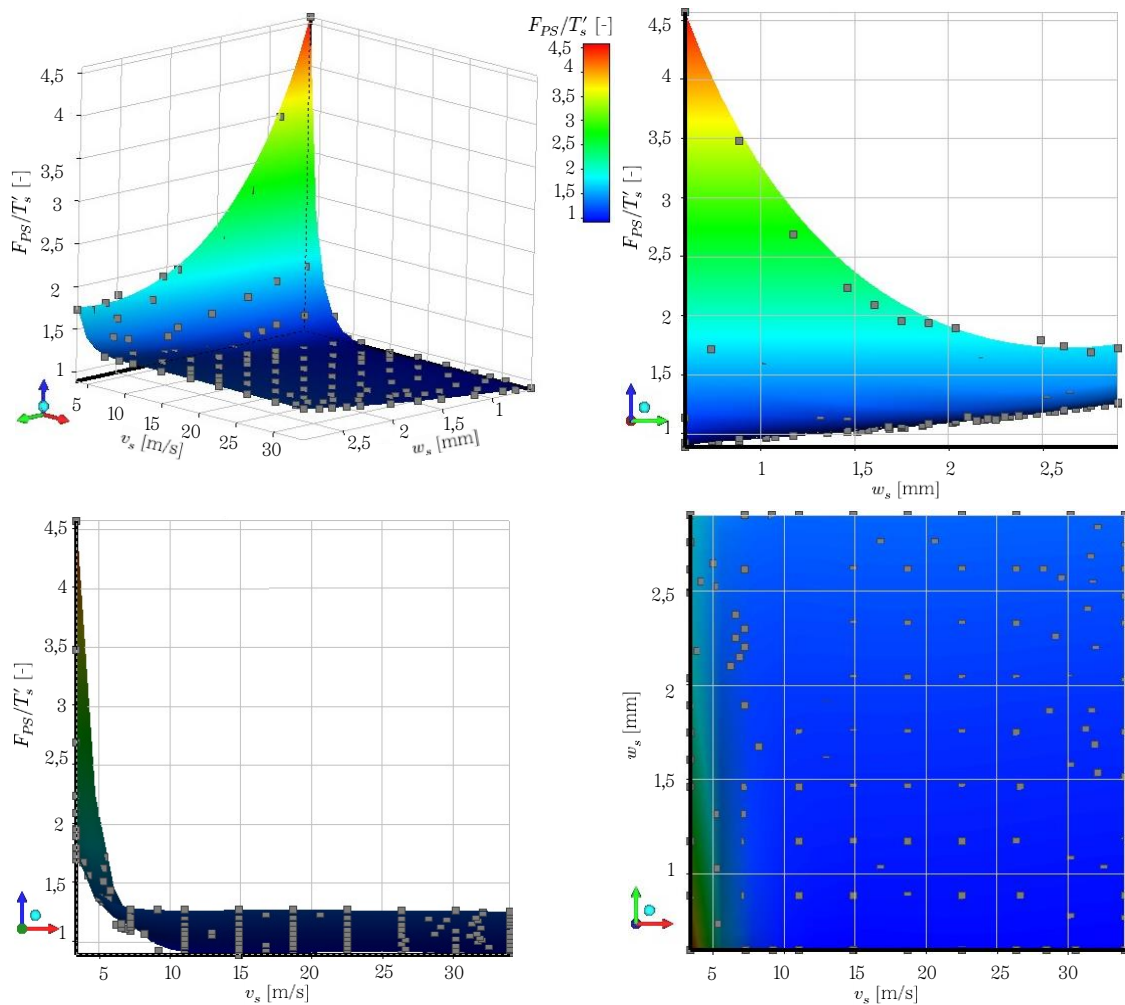
Rys. 5.39. Lokalna wrażliwość wybranych parametrów wyjściowych na parametry wejściowe v_s i w_s dla wariantu obliczeniowego nr 6.



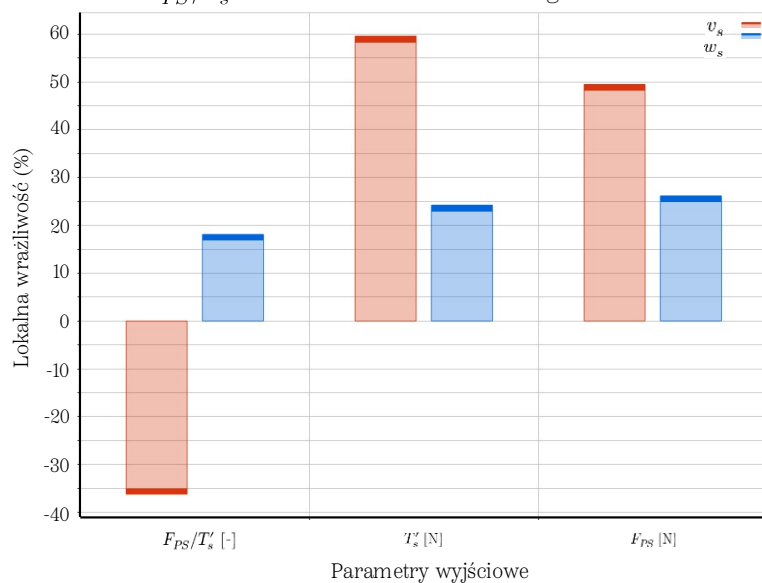
Rys. 5.40. Powierzchnia odpowiedzi w widoku izometrycznym oraz w rzutach na każdą z trzech płaszczyzn reprezentująca wpływ parametrów wejściowych v_s i w_s na parametr wyjściowy F_{PS}/T'_s dla wariantu obliczeniowego nr 7.



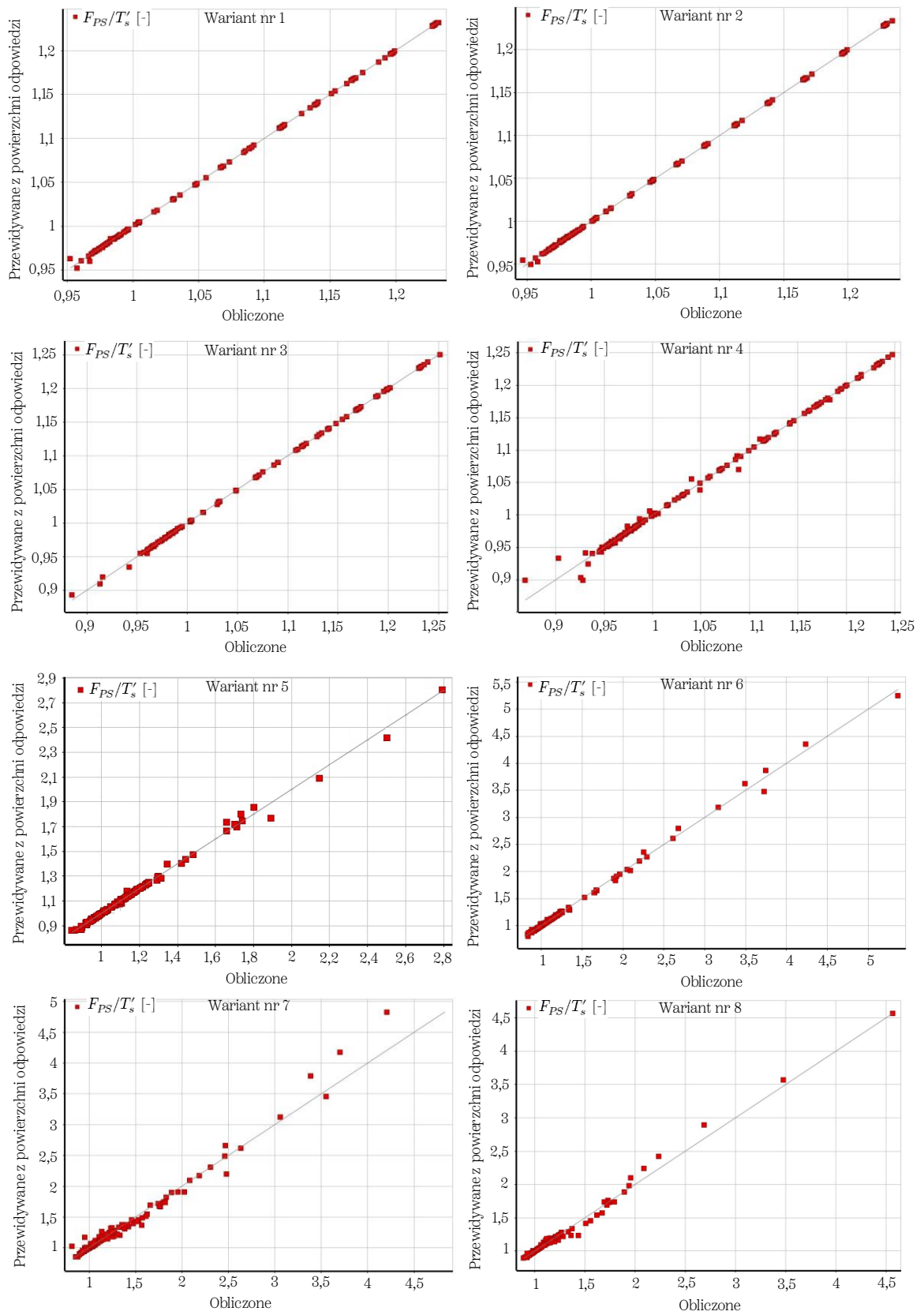
Rys. 5.41. Lokalna wrażliwość wybranych parametrów wyjściowych na parametry wejściowe v_s i w_s dla wariantu obliczeniowego nr 7.



Rys. 5.42. Powierzchnia odpowiedzi w widoku izometrycznym oraz w rzutach na każdą z trzech płaszczyzn reprezentująca wpływ parametrów wejściowych v_s i w_s na parametry wyjściowy F_{PS}/T'_s dla wariantu obliczeniowego nr 8.



Rys. 5.43. Lokalna wrażliwość wybranych parametrów wyjściowych na parametry wejściowe v_s i w_s dla wariantu obliczeniowego nr 8.



Rys. 5.44. Wykres zgodności dopasowania wartości F_{PS}/T'_s przewidywanych na podstawie powierzchni odpowiedzi względem wartości punktów obliczonych.

Tab. 5.5. Punkty wyznaczone w procesie optymalizacji powierzchni odpowiedzi techniką MOGA.

<i>Wariant</i>	v_s [m/s]	w_s [mm]	m'_s [kg/s]	F_{PS} [N]	T'_s [N]	F_{PS}/T'_s [-]	P'_s [W]
1	5,18	366,50	9,77	61,74	50,62	1,220	131,08
2	5,35	185,97	5,12	33,68	27,39	1,230	73,27
3	5,35	92,93	2,56	16,91	13,69	1,236	36,64
4	5,35	46,52	1,28	8,53	6,85	1,244	18,32
5	4,81	23,39	0,58	3,80	2,79	1,36	6,71
6	5,93	8,36	0,26	1,82	1,51	1,20	4,57
7	6,56	3,31	0,11	0,91	0,73	1,24	2,37
8	5,93	2,08	0,06	0,46	0,38	1,21	1,05

Tab. 5.6. Porównanie wartości przewidywanych z obliczonymi w procesie ich weryfikacji.

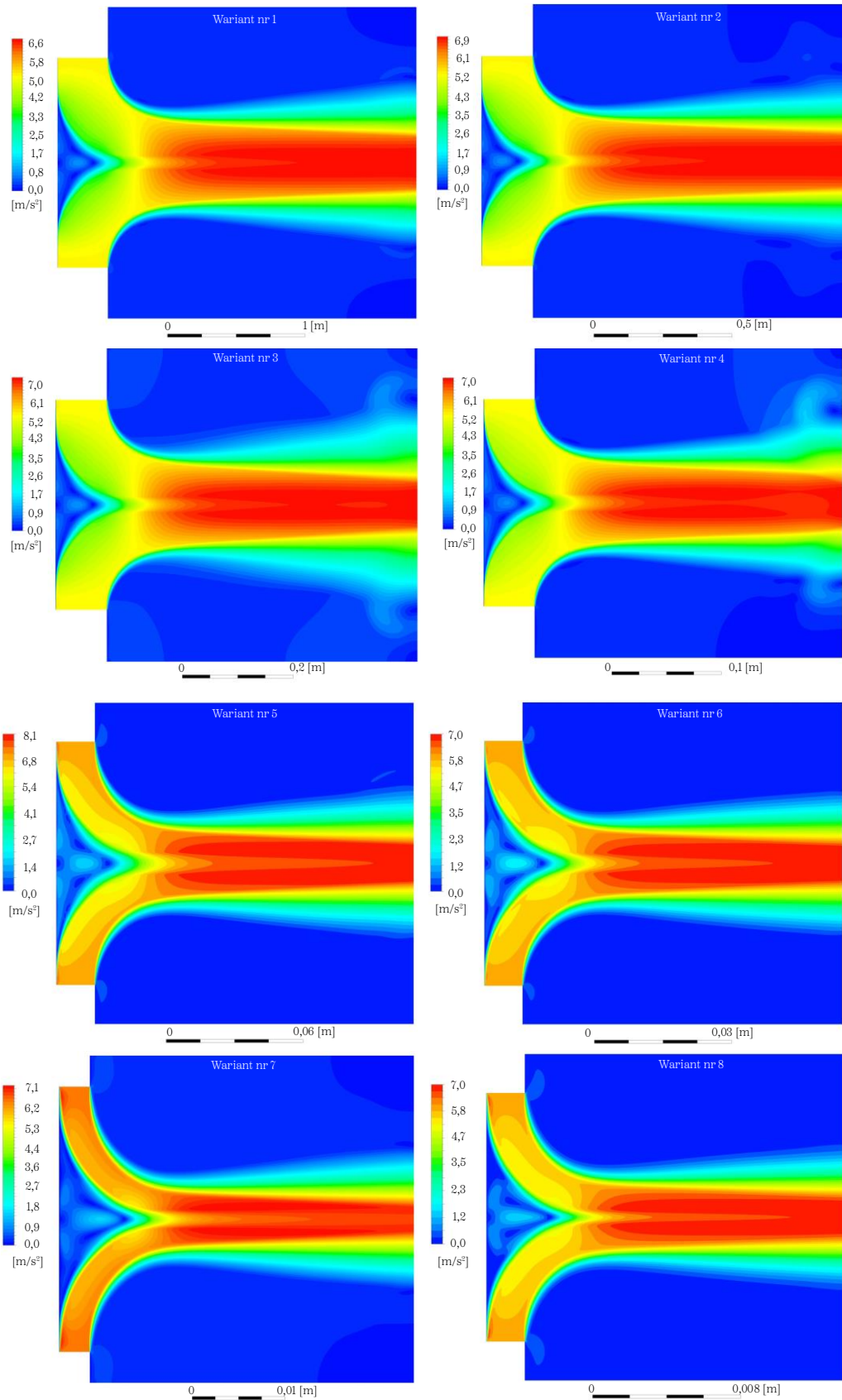
<i>Wariant</i>	F_{PS} [N]		F_{PS}/T'_s [-]		<i>Różnica</i>
	<i>Przewidywane</i>	<i>Obliczone</i>	<i>Przewidywane</i>	<i>Obliczone</i>	
1	61,74	61,67	1,220	1,218	-0,16%
2	33,68	33,64	1,230	1,228	-0,16%
3	16,91	16,91	1,236	1,235	-0,08%
4	8,53	8,52	1,244	1,244	-0,01%
5	3,80	3,50	1,36	1,26	-7,35%
6	1,82	1,69	1,20	1,15	-4,17%
7	0,91	0,78	1,24	1,04	-16,13%
8	0,46	0,43	1,21	1,28	-5,79%

Tab. 5.7. Minimalne i maksymalne wartości siły spiętrzenia, siły ciągu oraz ich stosunku.

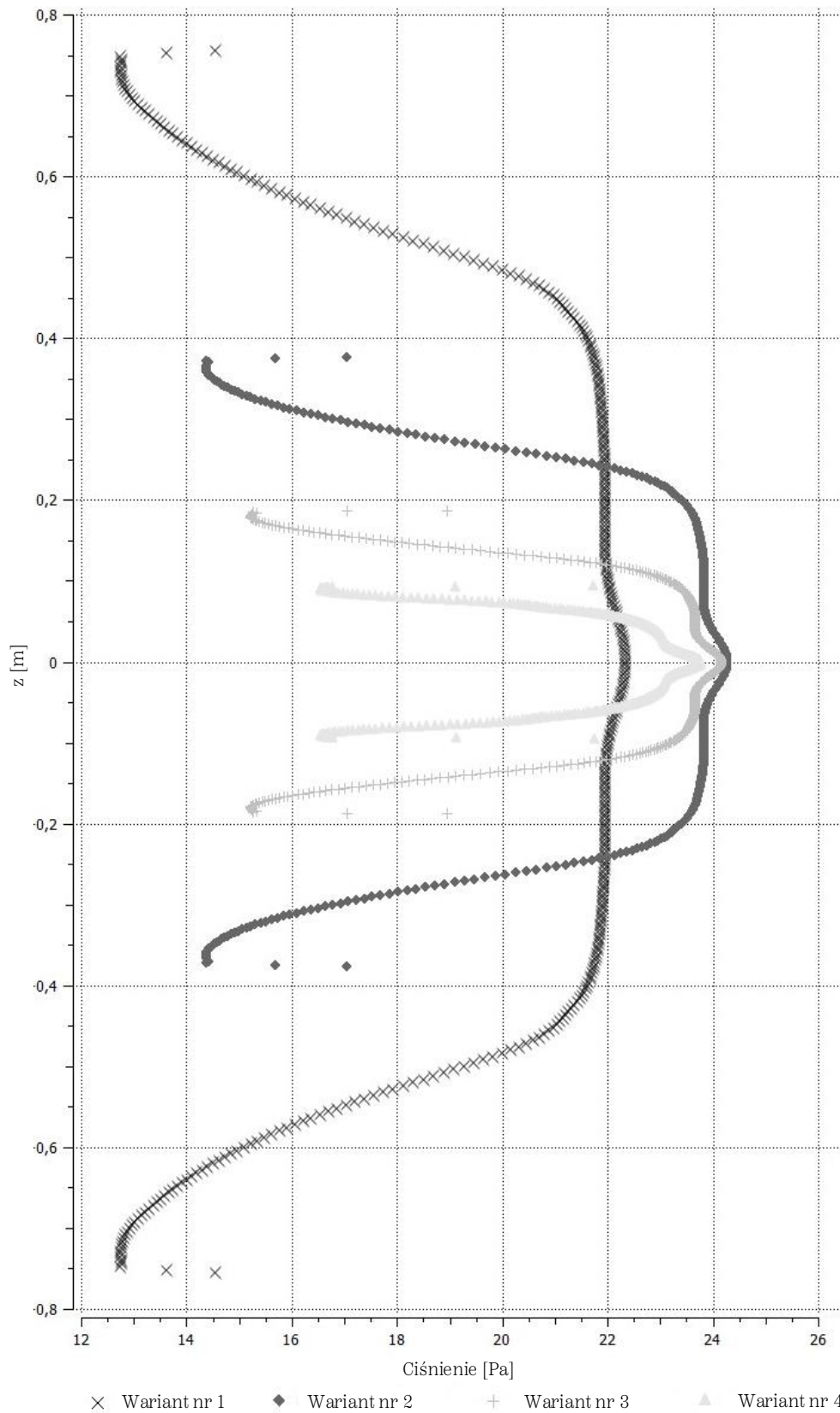
<i>Wariant</i>	F_{PS} [N]		T'_s [N]		F_{PS}/T'_s [-]	
	min.	maks.	min.	maks.	min.	maks.
1	4,29	2731,9	4,45	2225	0,947	1,235
2	2,12	1366,3	2,22	1112,8	0,945	1,237
3	1,01	684,35	1,11	556,1	0,872	1,251
4	0,49	342,77	0,56	278,35	0,856	1,248
5	0,73	171,99	0,28	139,17	0,864	2,804
6	0,72	86,73	0,137	69,59	0,801	5,251
7	0,34	44,06	0,07	35,09	0,846	4,813
8	0,16	21,64	0,04	17,25	0,891	4,661

Tab. 5.8. Maksymalny przewidywany błąd wartości siły spiętrzenia.

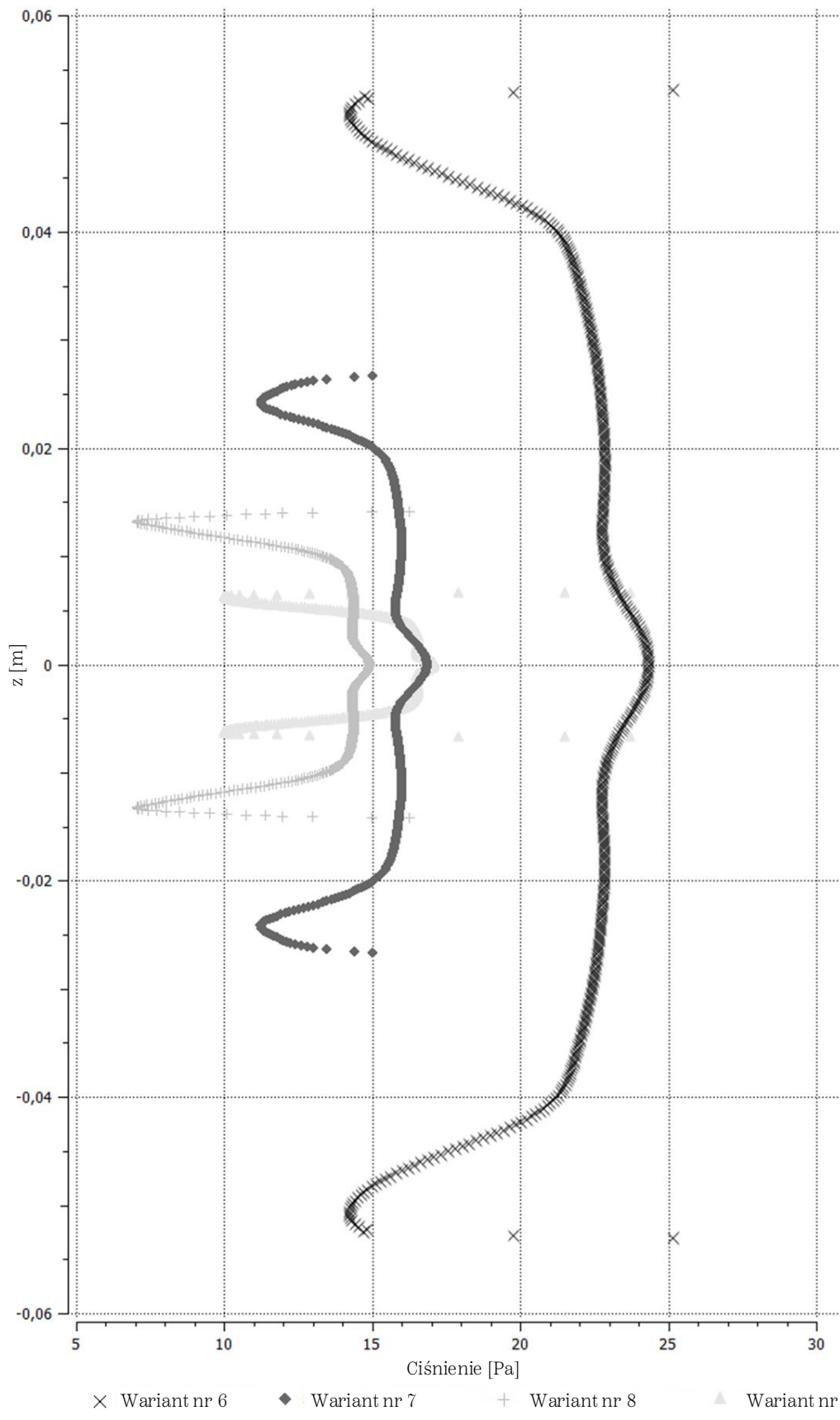
<i>Wariant</i>	Błąd F_{PS} [N]
1	0,0226
2	0,0259
3	0,0070
4	0,0039
5	0,0417
6	0,0031
7	0,0643
8	0,0060



Rys. 5.45. Rozkłady prędkości w płaszczyźnie xy dla konfiguracji wyznaczonych w procesie optymalizacji wariantów 1-4.



Rys. 5.46. Rozkłady ciśnienia na powierzchniach spiętrzenia dla konfiguracji wyznaczonych w procesie optymalizacji dla wariantów 1-4.



Rys. 5.47. Rozkłady ciśnienia na powierzchniach spiętrzenia dla konfiguracji wyznaczonych w procesie optymalizacji dla wariantów 5-8.

Powierzchnie odpowiedzi reprezentujące wpływ parametrów wejściowych na siłę spiętrzenia wykazują zbieżną charakterystykę w pełnym obszarze badawczym. Niezależnie od wariantu wartość siły spiętrzenia wykazuje zależność wykładniczą od prędkości strumieni i quasi-liniową względem ich szerokości, przy czym prędkość wykazuje dwukrotnie większy wpływ na wartość siły niż szerokość strumieni.

Osiągnięcie wartości siły spiętrzenia większych względem teoretycznych wartości siły ciągu jest możliwe w szerokim zakresie kombinacji parametrów wejściowych, przy czym dla każdej z podgrup obserwowane są znaczące różnice w przebiegach odpowiadających im powierzchni odpowiedzi. Dla wariantów 1-4 stosunek sił zależy wykładniczo od szerokości strumieni, co jest kluczowym czynnikiem wpływającym na jego wartość. Zależność od prędkości przebiega quasi-liniowo, z wyjątkiem najmniejszych prędkości i szerokości strumienia, gdzie występuje gwałtowne załamanie charakterystyk. W tej podgrupie siła spiętrzenia osiąga wartość maksymalnie o 25% większą od teoretycznej siły ciągu. Dla podgrupy nr 2, obejmującej warianty 5-8, powierzchnia odpowiedzi wykazuje tendencję do generowania w ograniczonym obszarze znacznie większych wartości stosunku sił, przekraczających nawet 525% na korzyść siły spiętrzenia. Dla wszystkich wariantów w tej podgrupie zaobserwowano podobną zależność dotyczącą gwałtownej zmiany charakterystyki powierzchni odpowiedzi dla prędkości strumieni poniżej wartości około 7,5 m/s. W obszarze powyżej tej prędkości wartość stosunku sił rośnie quasi-liniowo wraz ze wzrostem szerokości strumieni oraz liniowo wraz ze zmianą prędkości, a stosunek sił nie przekracza wartości około 1,3. Poniżej 7,5 m/s dominuje silny wykładniczy wpływ prędkości strumieni, a ekstremalne wartości osiągnane są dla najmniejszych prędkości i najmniejszych wymiarów strumieni.

Wykresy zgodności przedstawiają znaczące różnice w jakości dopasowania wartości stosunku sił przewidywanych do obliczonych dla obu podgrup. Wykresy dla podgrupy pierwszej wykazują wysoki poziom dopasowania, podczas gdy warianty z drugiej grupy wykazują znaczący rozrzut, szczególnie widoczny pomiędzy wartościami zweryfikowanymi dla punktów wyznaczonych w procesie optymalizacji. Dla podgrupy pierwszej różnica pomiędzy wartościami obliczonymi a przewidywanymi wynosi znacznie poniżej 1%, natomiast dla podgrupy drugiej różnica osiąga wartości nawet ponad 16% dla wariantu nr 7. Świadczy to o konieczności wykonania dalszych badań i optymalizacji parametrów dla drugiej podgrupy lub konieczności podziału zakresu parametrów wejściowych.

Rozkłady prędkości dla punktów optymalnych wykazują zbieżne przebiegi niezależnie od przyjętego wariantu obliczeniowego. Po zderzeniu strumieni spiętrzenia tworzą wspólny strumień odpływowy skierowany prostopadle do powierzchni spiętrzenia. W żadnym z wariantów nie zaobserwowano wcześniej spodziewanej strefy ujemnego ciśnienia w strefie najbliższej wylotu powietrza. Dla każdego z wariantów w punkcie zerowej prędkości obserwowany jest pik ciśnienia.

Na podstawie uzyskanych wyników najbardziej obiecujący do adaptacji na pojeździe wydaje się wariant nr 5. Pomimo konieczności adaptacji skomplikowanej geometrii, na którą składają się aż 32 sekcje spiętrzające, wariant ten wykazuje największy zweryfikowany stosunek siły spiętrzenia do siły ciągu przy jednocześnie największym stosunku wartości siły względem mocy niezbędnej do wytwarzania strumieni spiętrzających.

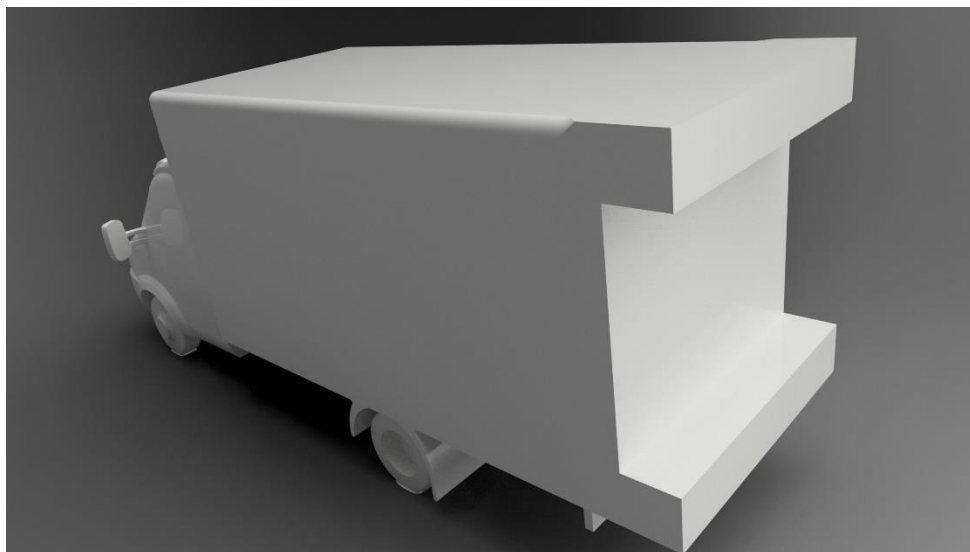
5.5 Modele matematyczne opływu samochodu ciężarowego dla wybranych wariantów systemu aerodynamicznego

5.5.1 Warianty geometryczne przyjęte do weryfikacji

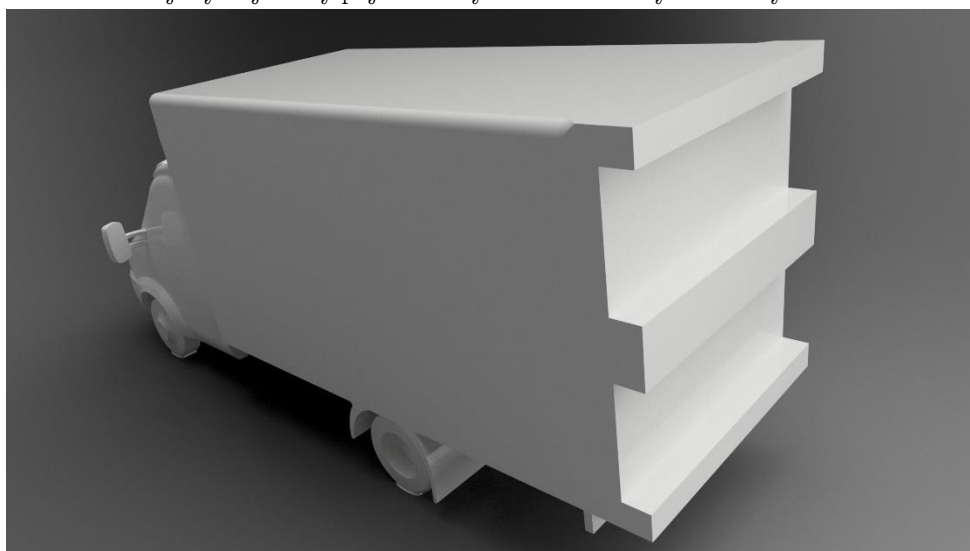
Spośród punktów reprezentacyjnych uzyskanych w etapie optymalizacji powierzchni odpowiedzi do weryfikacji na pojeździe wybrano warianty od 1 do 6. Warianty 7 i 8 zostały odrzucone ze względu na skrajnie mały rozmiar strumieni, który pokrywałaby się z wysokością pierwszego elementu warstwy przyściennej prowadząc tym samym do nierzetelnych wyników.

5.5.2 Domeny obliczeniowe i warunki brzegowe

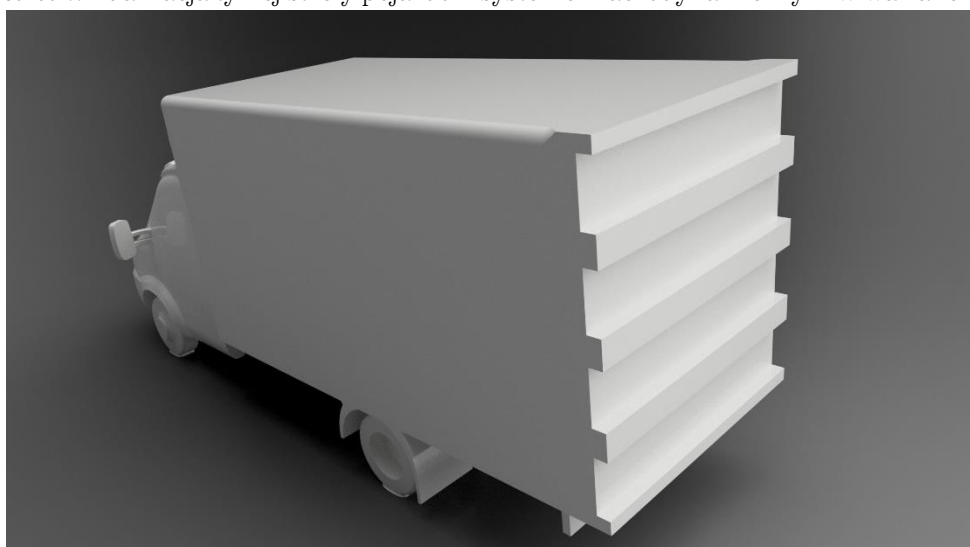
Obliczenia przeprowadzono na sześciu nowych domenach obliczeniowych powstałych na podstawie modyfikacji domeny opływu pojazdu referencyjnego przedstawionej w sekcji 5.2 niniejszej pracy. Zarówno sposób budowy siatek obliczeniowych jak i przyjęte warunki brzegowe dla otoczenia pojazdu zostały przyjęte w sposób bliźniaczy względem modelu referencyjnego. Konfiguracje odpowiadające wybranym wariantom zostały zaadaptowane do zabudowy pojazdu referencyjnego. Modyfikacji uległa strefa tylna zabudowy gdzie płaską powierzchnię zabudowy zastąpiono sekcjami spiętrzającymi.



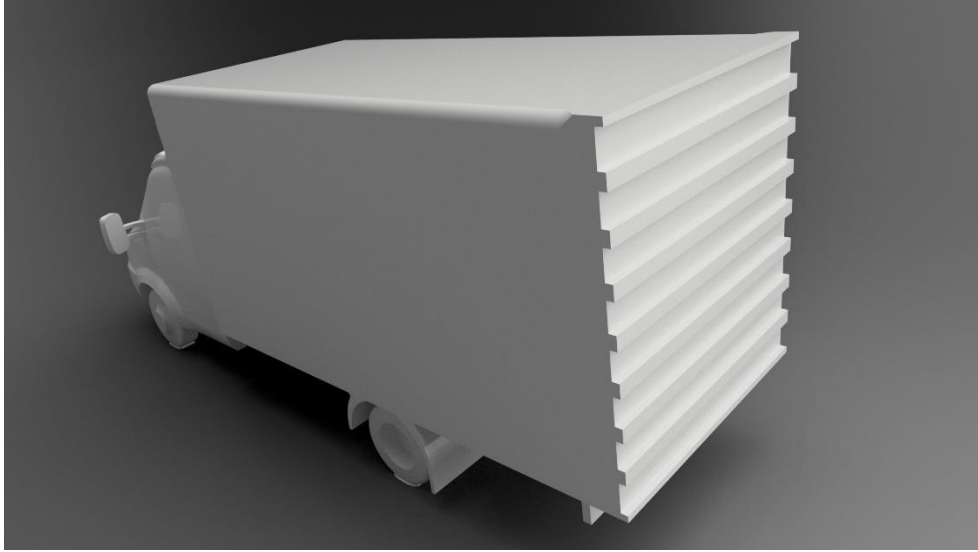
Rys. 5.48. Wizualizacja tylnej strefy pojazdu z systemem aerodynamicznym w wariacie nr 1.



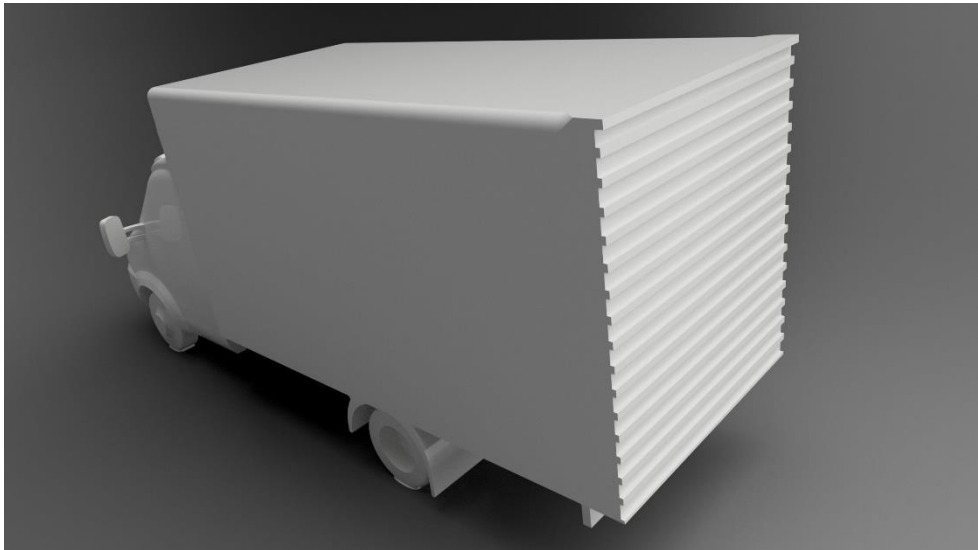
Rys. 5.49. Wizualizacja tylnej strefy pojazdu z systemem aerodynamicznym w wariacie nr 2.



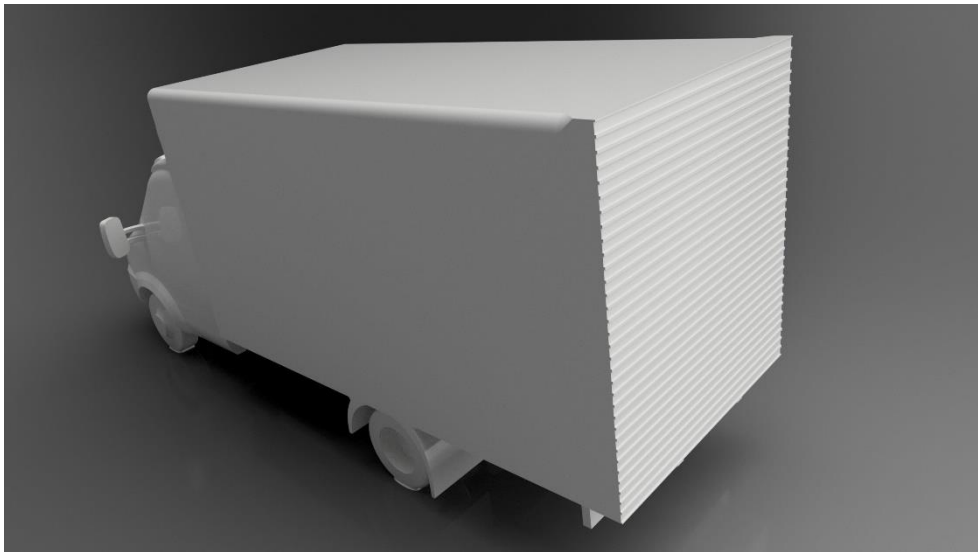
Rys. 5.50. Wizualizacja tylnej strefy pojazdu z systemem aerodynamicznym w wariacie nr 3.



Rys. 5.51. Wizualizacja tylnej strefy pojazdu z systemem aerodynamicznym w wariancie nr 4.



Rys. 5.52. Wizualizacja tylnej strefy pojazdu z systemem aerodynamicznym w wariancie nr 5.



Rys. 5.53. Wizualizacja tylnej strefy pojazdu z systemem aerodynamicznym w wariancie nr 6.

Tab. 5.9. Konfiguracje przyjęte do weryfikacji na modelu pojazdu referencyjnego.

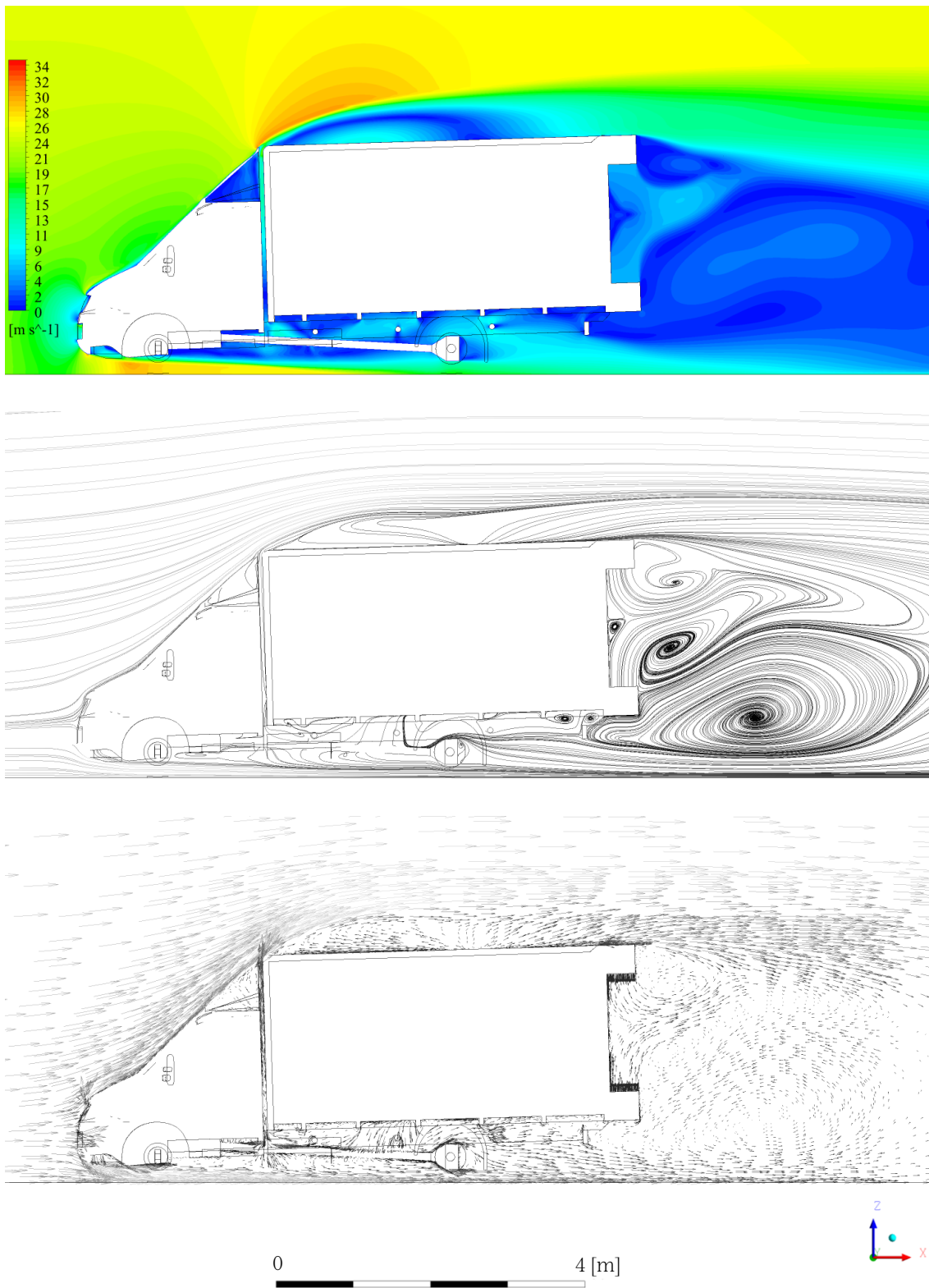
<i>Wariant</i>	n_{SP} [-]	h_{SP} [mm]	h_{PS} [mm]	v_s [m/s]	w_s [mm]
1	1	2245	1512	5,18	366,50
2	2	1122,5	750,6	5,35	185,97
3	4	561,3	375,4	5,35	92,93
4	8	280,6	187,6	5,35	46,52
5	16	140,3	93,5	4,81	23,39
6	32	70,2	53,5	5,93	8,36

Prędkości strumieni podane w tab. 5.9. stanowią wartości względem poruszającego się pojazdu. Dla przykładu wariant nr 1 odpowiada symulacji opływu pojazdu poruszającego się z prędkością 90 km/h, w którego tylnej strefie wyrzucane są strumienie spiętrzające z prędkością względem pojazdu wynoszącą 5,18 m/s. Wloty powietrza zostały skierowane równoległe do tylnej powierzchni zabudowy pojazdu. Ciśnienie strumieni spiętrzających na wlotach prędkościowych ustawiono na 0 Pa względem otoczenia, a intensywność turbulencji strumieni na 5%.

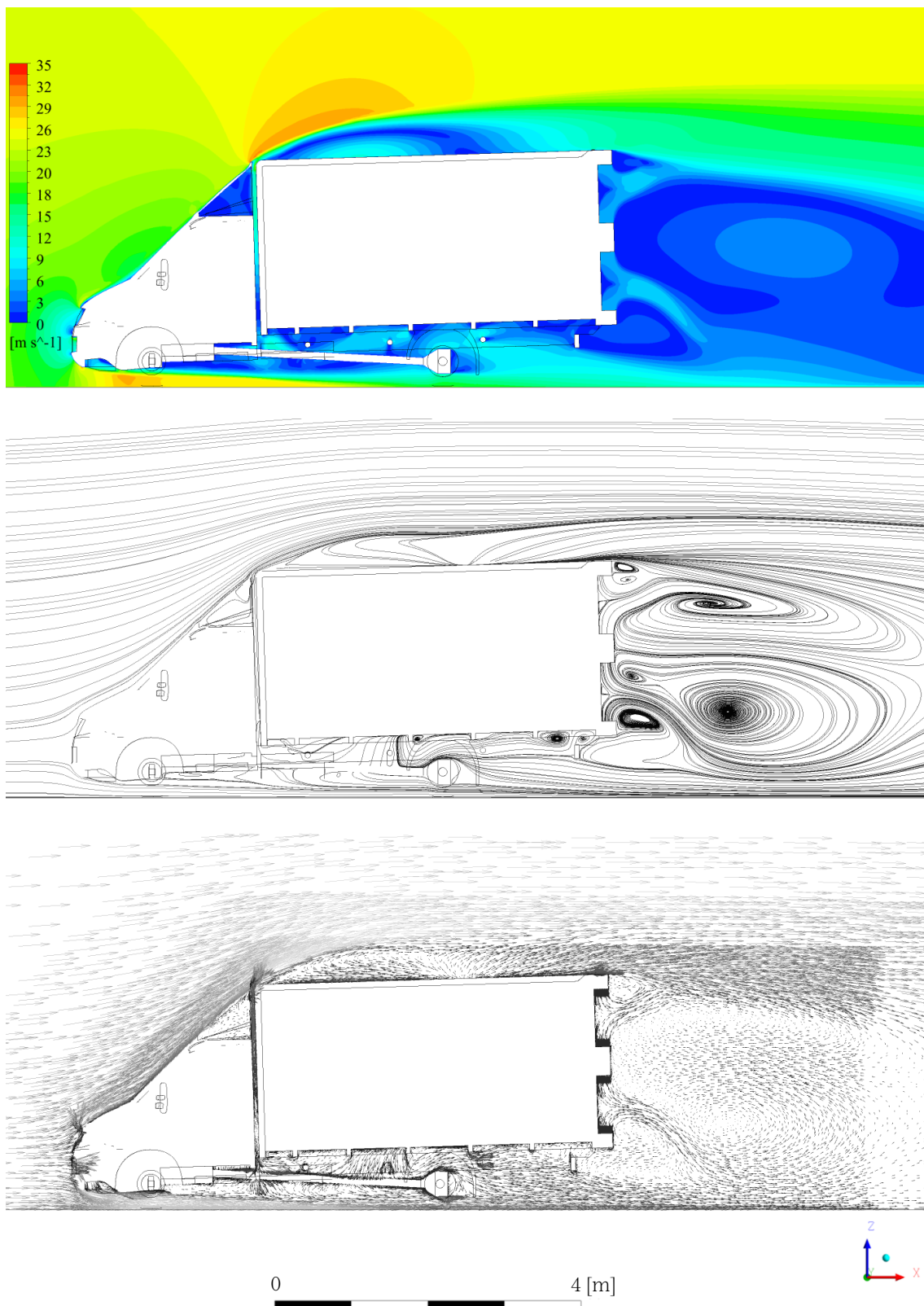
Modele stanowią wstępne symulacje, które mają na celu ogólną weryfikację idei wytwarzania bariery powietrznej. Obliczenia wykonano dla konfiguracji uproszczonej, która nie obejmuje pełnej konstrukcji kierownic powietrza, konstrukcji kanałów przepływowych systemu, układu filtracji oraz nie uwzględnia pobierania powietrza zasilającego system aerodynamiczny z otoczenia pojazdu. Jest to wariant czysto teoretyczny, który odpowiada sytuacji, w której powietrze zasilające jest transportowane na pojeździe. Ponieważ miejsce i sposób pobierania powietrza zasilającego będzie mieć krytyczny wpływ na moc niezbędną do rozpędzenia powietrza do prędkości pojazdu, a tym samym ostateczny bilans energetyczny technologii, szczegółowa identyfikacja optymalnego miejsca poboru powietrza lub sposobu zasilania systemu stanowić będzie obszar osobnych analiz projektowych.

5.5.3 Wyniki

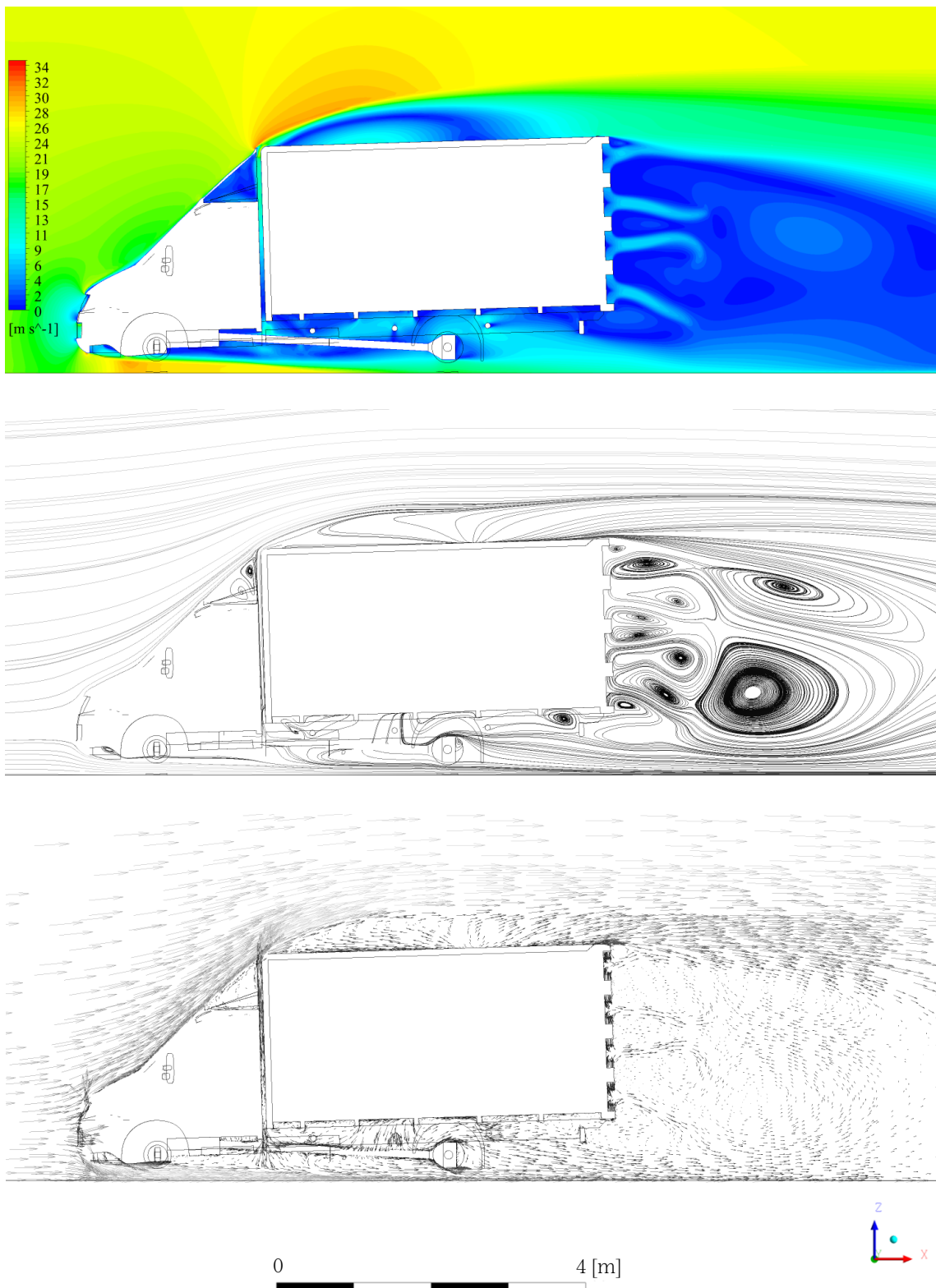
Wyniki przedstawiono graficznie w postaci wizualizacji rozkładów ciśnienia na powierzchniach sekcjach spiętrzających, rozkładów prędkości i odpowiadających im linii prądu oraz wektorów prędkości na rys. 5.54–5.71. Wartości oporu aerodynamicznego dla każdego z obliczonych wariantów wraz z podziałem na składowe ciśnieniowe i lepkościowe przedstawiono w tab. 5.10–5.16.



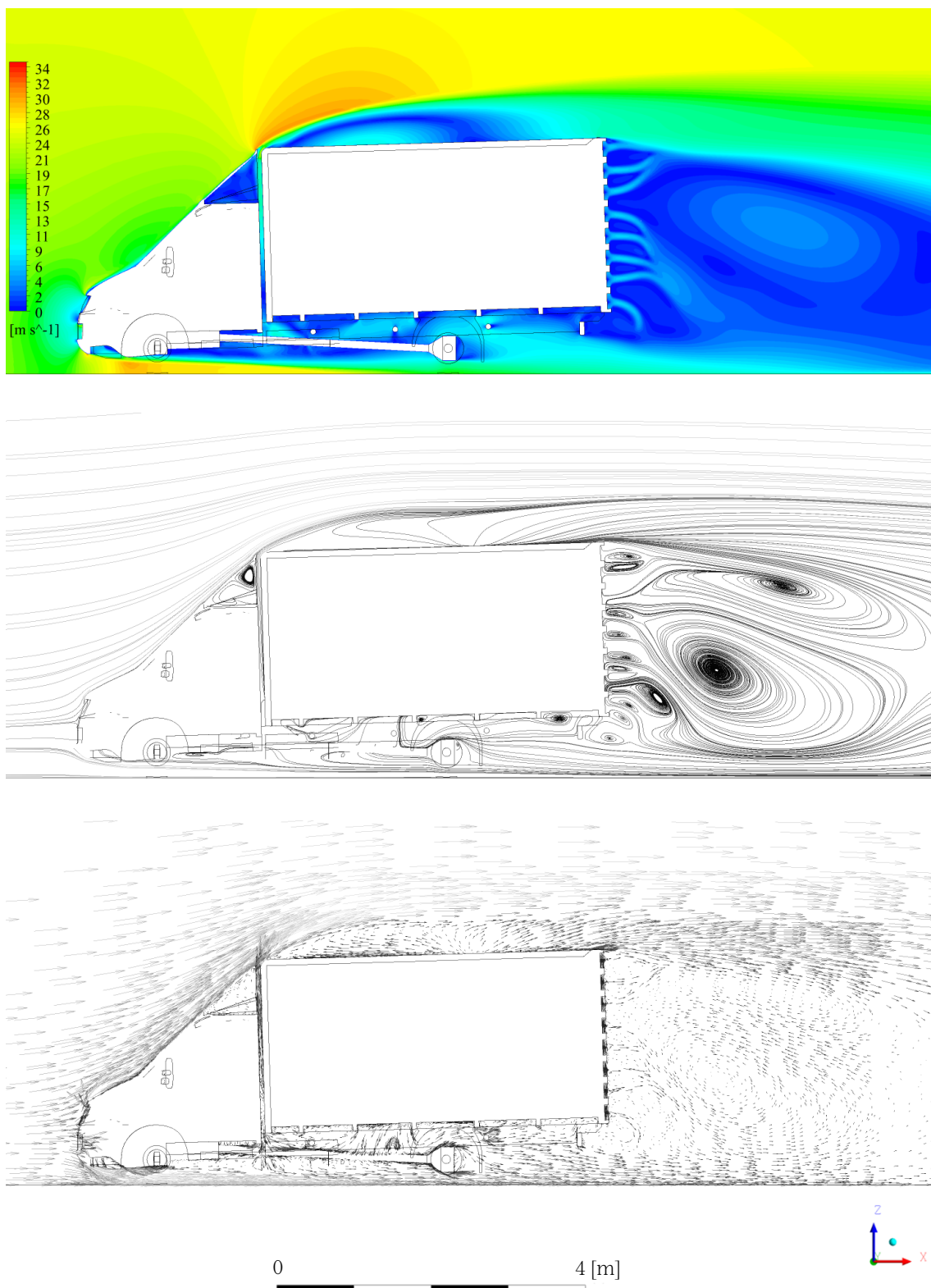
Rys. 5.54. Rozkłady prędkości na powierzchni cięcia w płaszczyźnie xz dla $y=0$ (góra) z odpowiadającymi im liniami prądu (środek) oraz wektorami (dół).



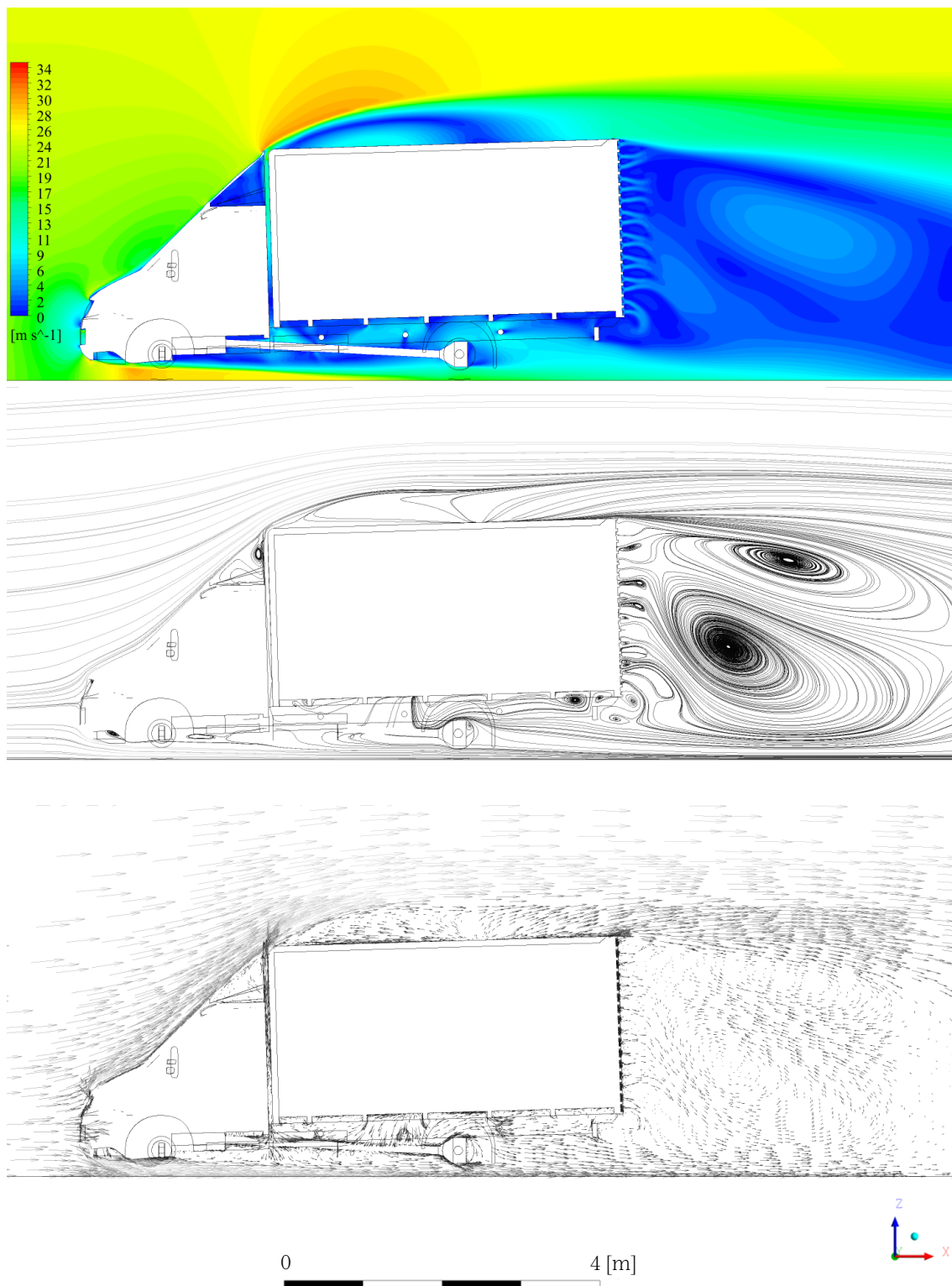
Rys. 5.55. Rozkłady prędkości na powierzchni cięcia w płaszczyźnie xz dla $y=0$ (górze) z odpowiadającymi im liniami prądu (środek) oraz wektorami (dół).



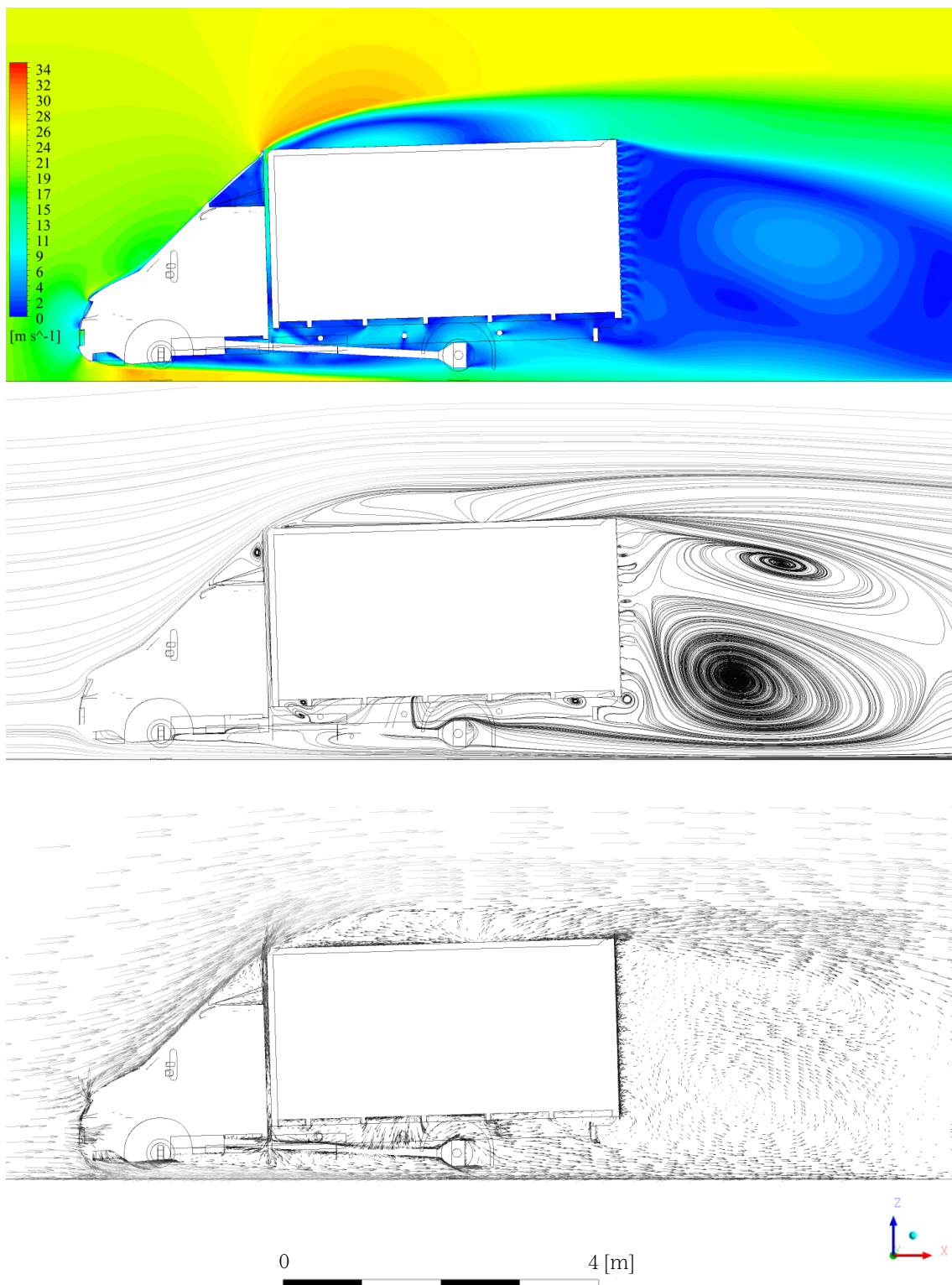
Rys. 5.56. Rozkłady prędkości na powierzchni cięcia w płaszczyźnie xz dla $y=0$ (góra) z odpowiadającymi im liniami prądu (środek) oraz wektorami (dół).



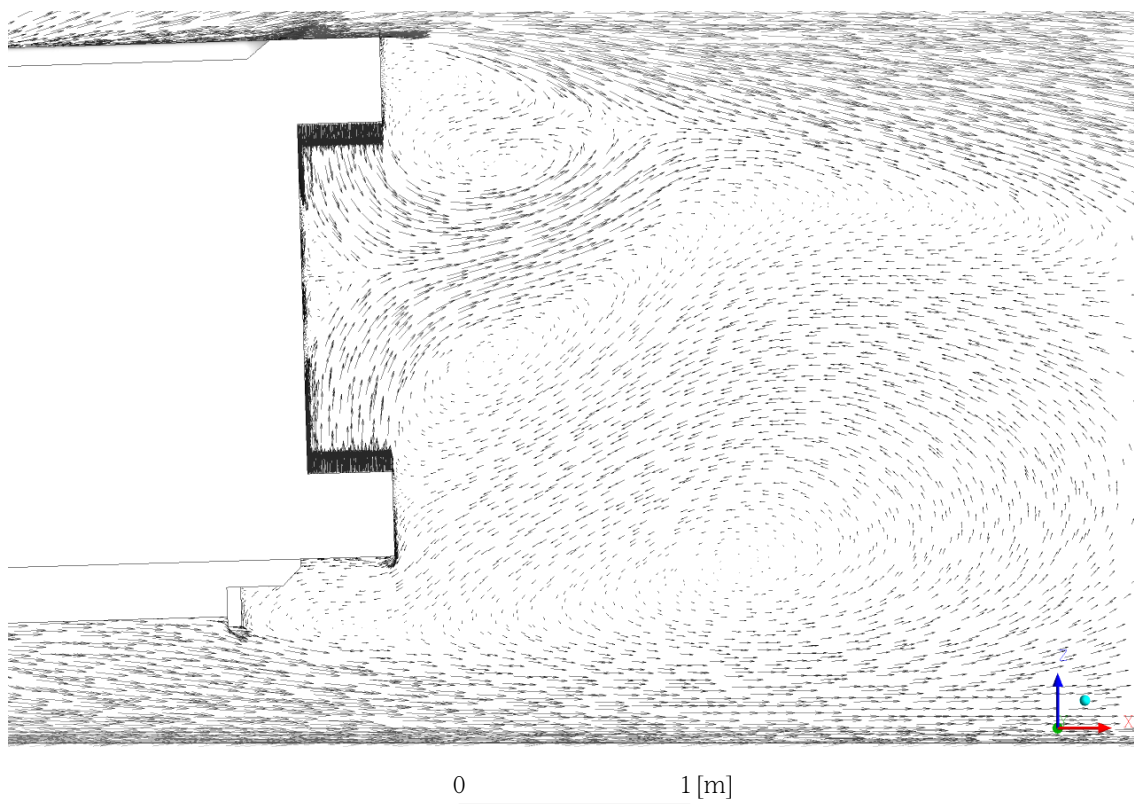
Rys. 5.57. Rozkłady prędkości na powierzchni cięcia w płaszczyźnie xz dla $y=0$ (góra) z odpowiadającymi im liniami prądu (środek) oraz wektorami (dół).



Rys. 5.58. Rozkłady prędkości na powierzchni cięcia w płaszczyźnie xz dla $y=0$ (góra) z odpowiadającymi im liniami prądu (środek) oraz wektorami (dół).



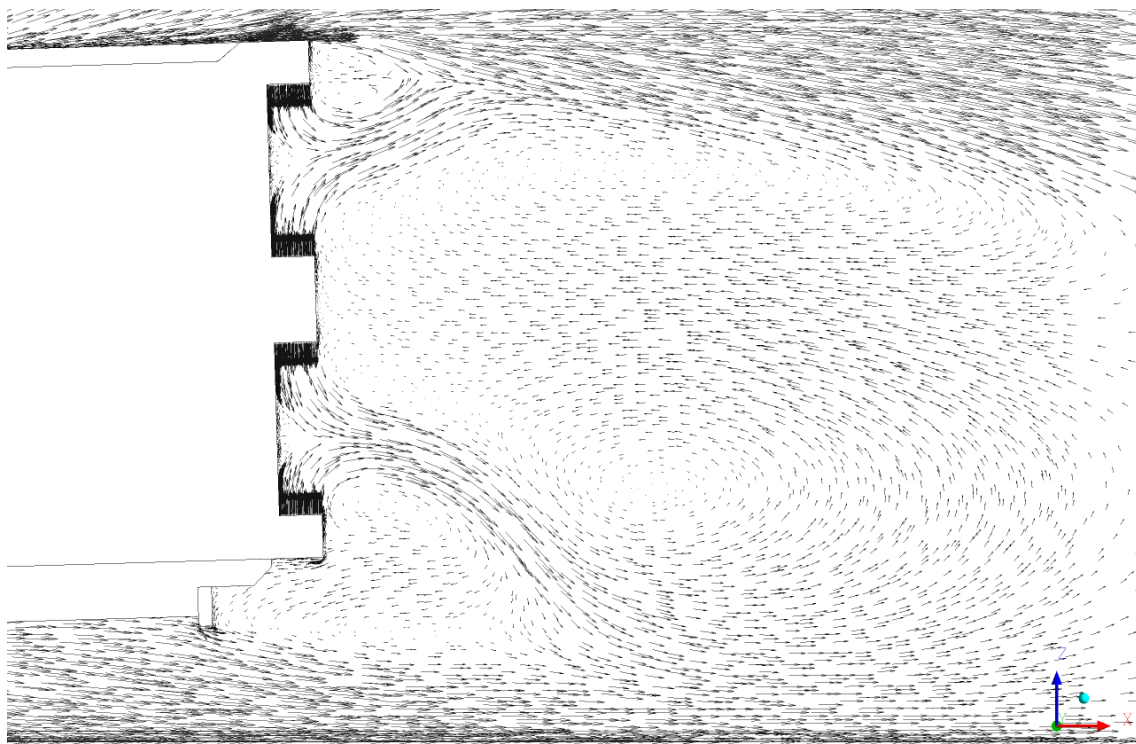
Rys. 5.59. Rozkłady prędkości na powierzchni cięcia w płaszczyźnie xz dla $y=0$ (góra) z odpowiadającymi im liniami prądu (środek) oraz wektorami (dół).



Rys. 5.60. Porównanie rozkładów prędkości na płaszczyznę xz dla $y=0$ pomiędzy modelem referencyjnym, a pojazdem z wariantami systemu aerodynamicznego od 5 do 8.

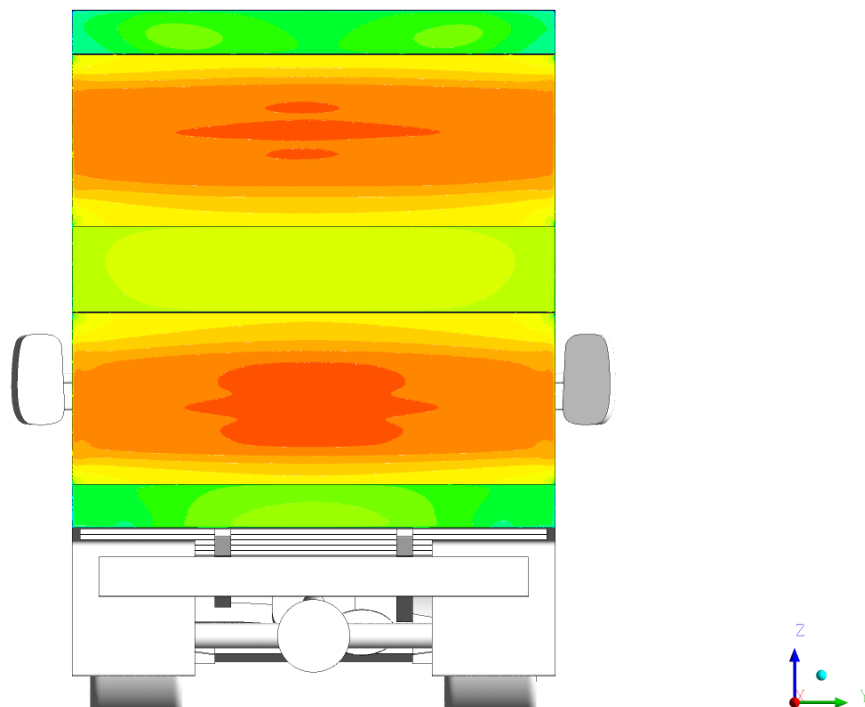


Rys. 5.61. Rozkłady ciśnienia na powierzchniach śpiętrzenia i powierzchniach kierownic powietrza dla wariantu systemu aerodynamicznego nr 1.



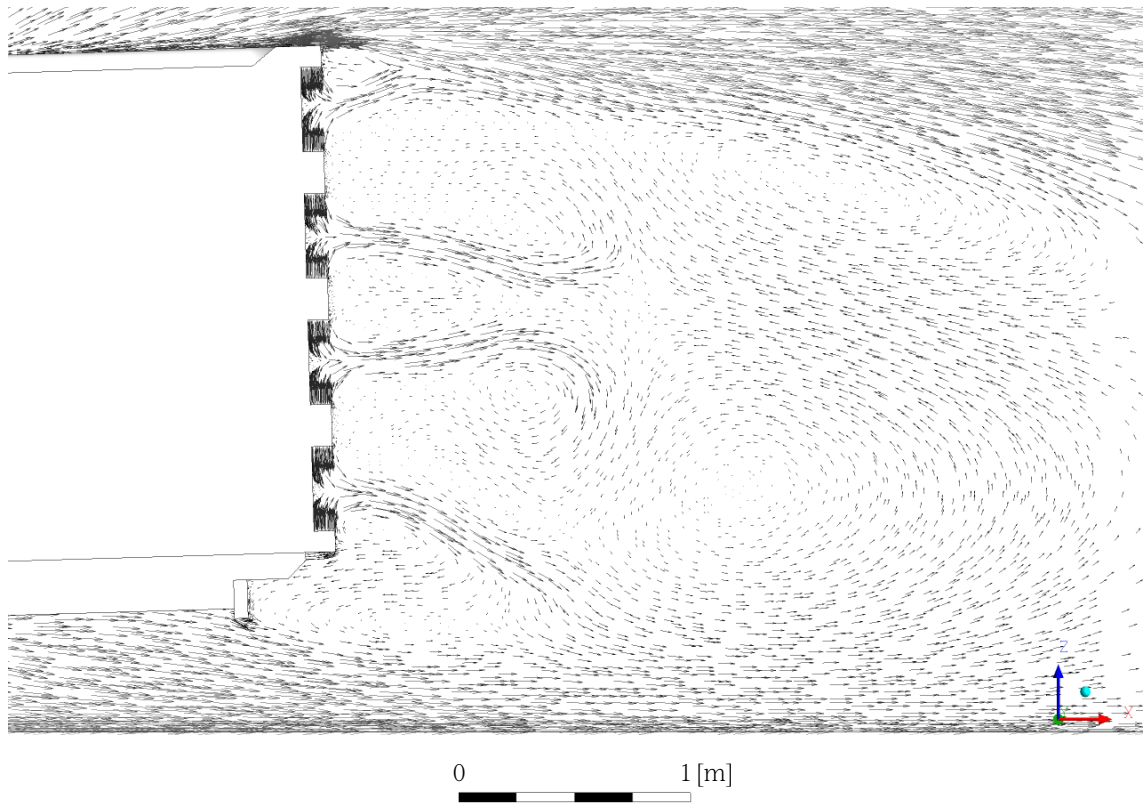
0 1 [m]

Rys. 5.62. Porównanie rozkładów prędkości na płaszczyznę xz dla $y = 0$ pomiędzy modelem referencyjnym, a pojazdem z wariantami systemu aerodynamicznego od 5 do 8.

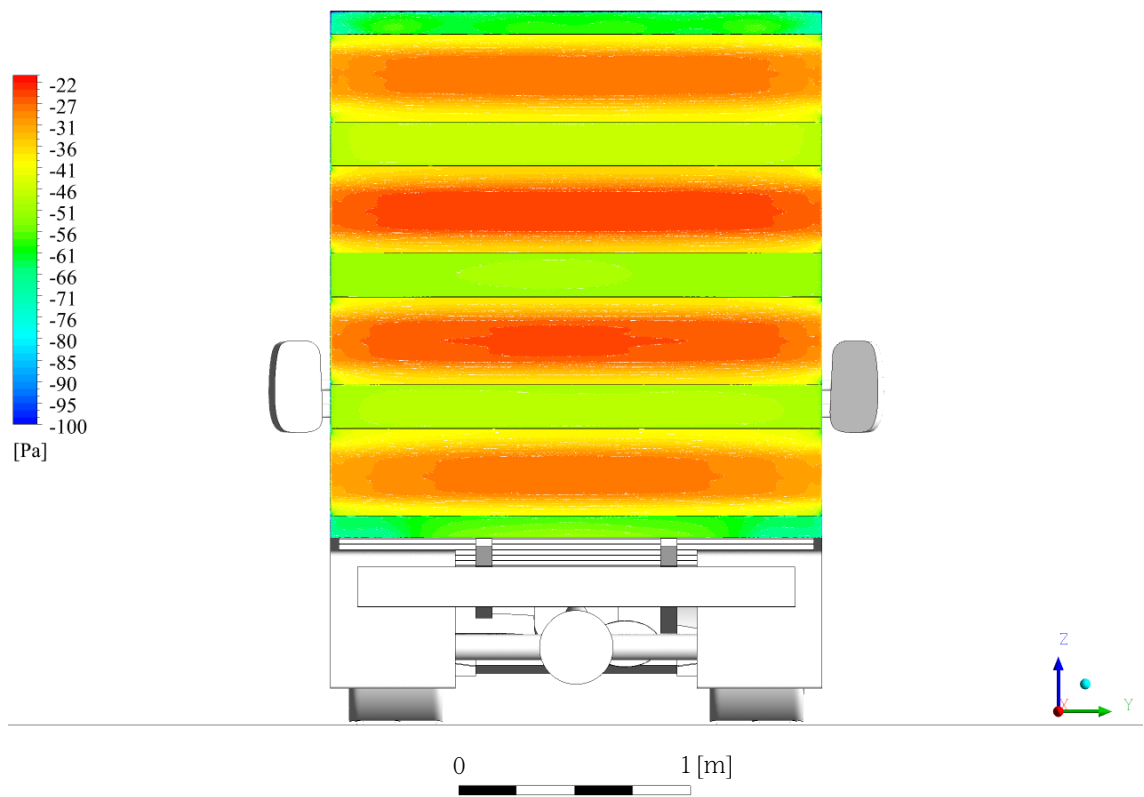


0 1 [m]

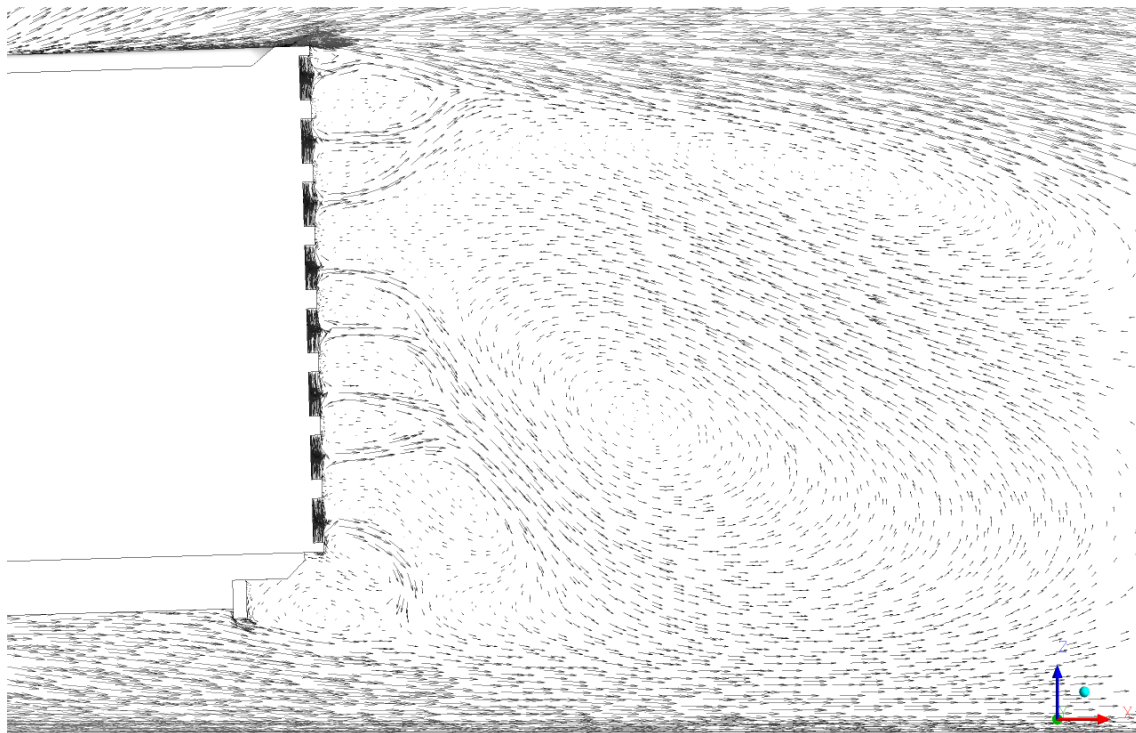
Rys. 5.63. Rozkłady ciśnienia na powierzchniach siętrzenia i powierzchni kierownic powietrza dla wariantu systemu aerodynamicznego nr 2.



Rys. 5.64. Porównanie rozkładów prędkości na płaszczyznę xz dla $y = 0$ pomiędzy modelem referencyjnym, a pojazdem z wariantami systemu aerodynamicznego od 5 do 8.

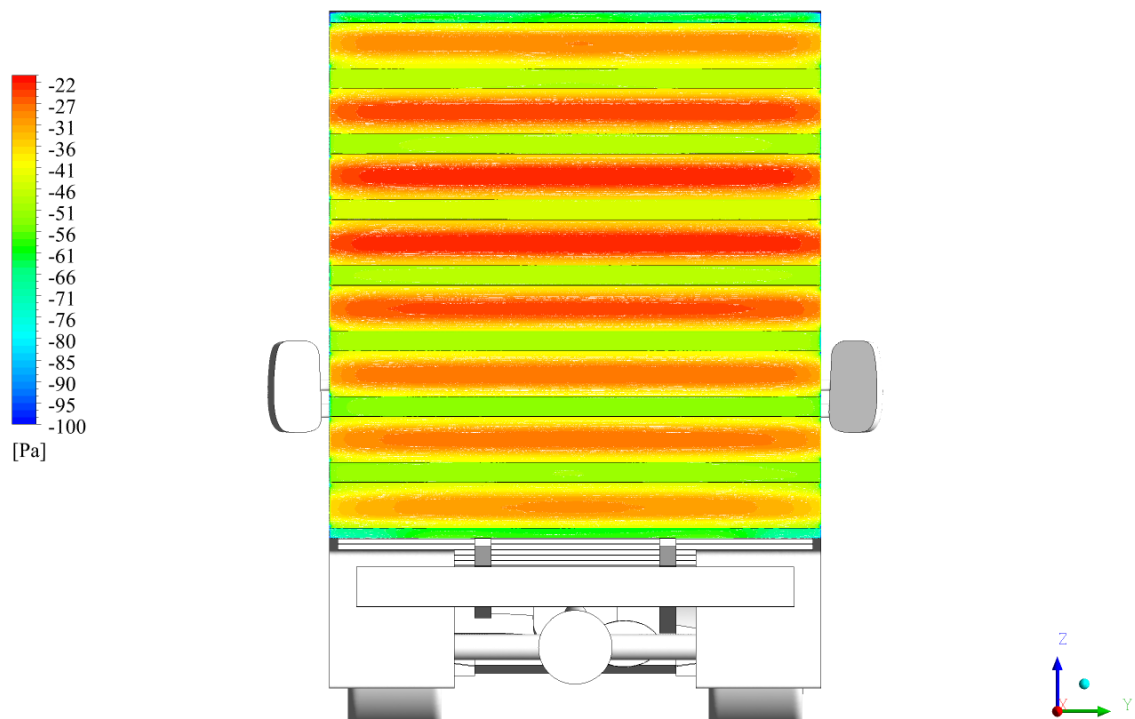


Rys. 5.65. Rozkłady ciśnienia na powierzchniach spiętrzenia i powierzchniach kierownic powietrza dla wariantu systemu aerodynamicznego nr 3.



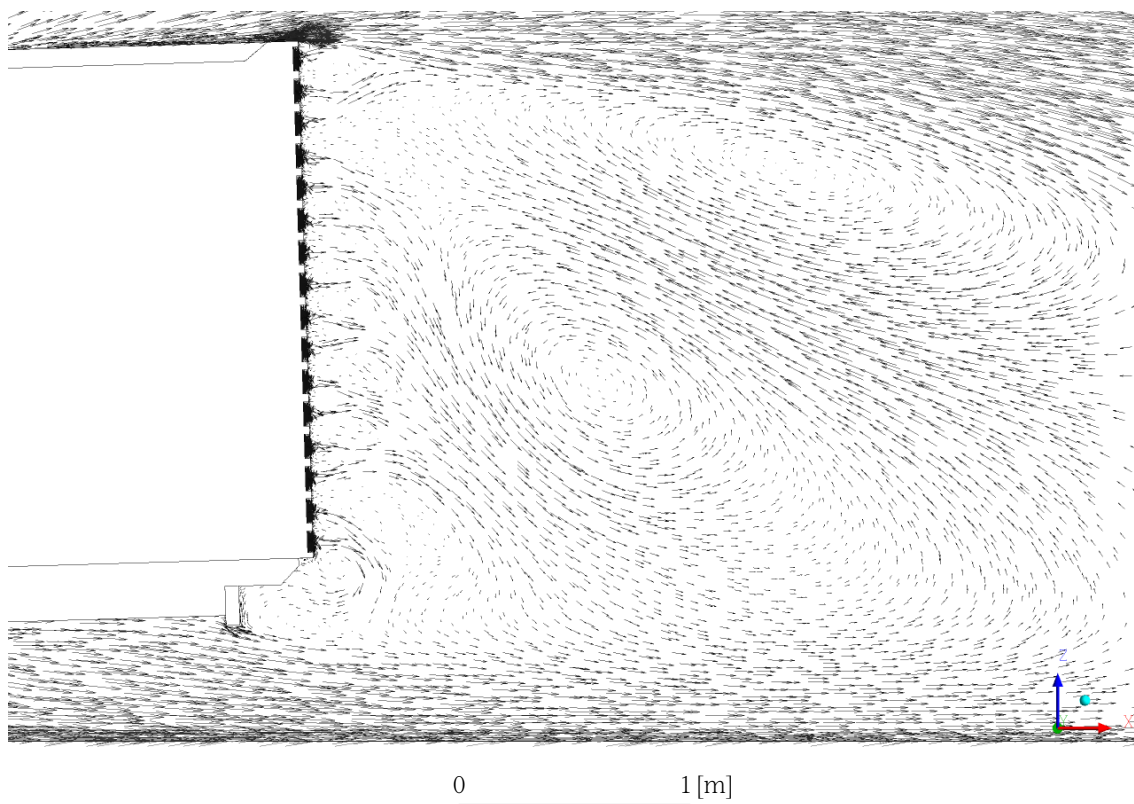
0 1 [m]

Rys. 5.66. Porównanie rozkładów prędkości na płaszczyznę xz dla $y = 0$ pomiędzy modelem referencyjnym, a pojazdem z wariantami systemu aerodynamicznego od 5 do 8.

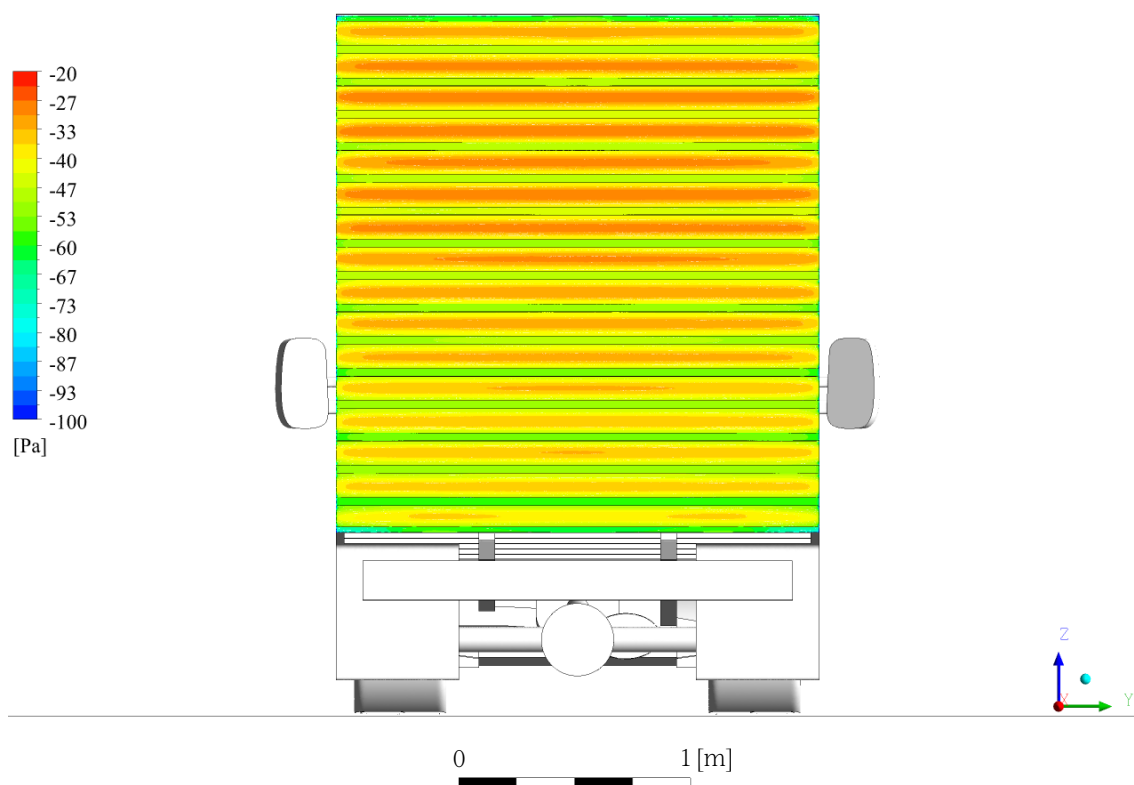


0 1 [m]

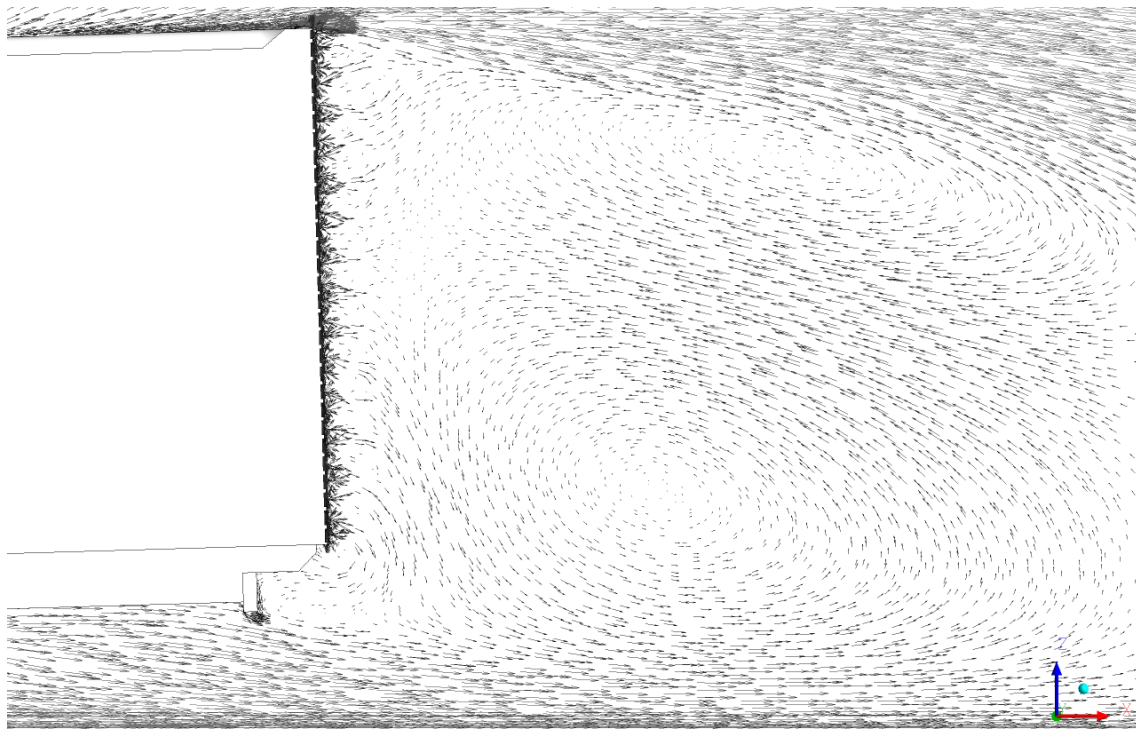
Rys. 5.67. Rozkłady ciśnienia na powierzchniach śpiętrzenia i powierzchniach kierownic powietrza dla wariantu systemu aerodynamicznego nr 4.



Rys. 5.68. Porównanie rozkładów prędkości na płaszczyźnie xz dla $y = 0$ pomiędzy modelem referencyjnym, a pojazdem z wariantami systemu aerodynamicznego od 5 do 8.

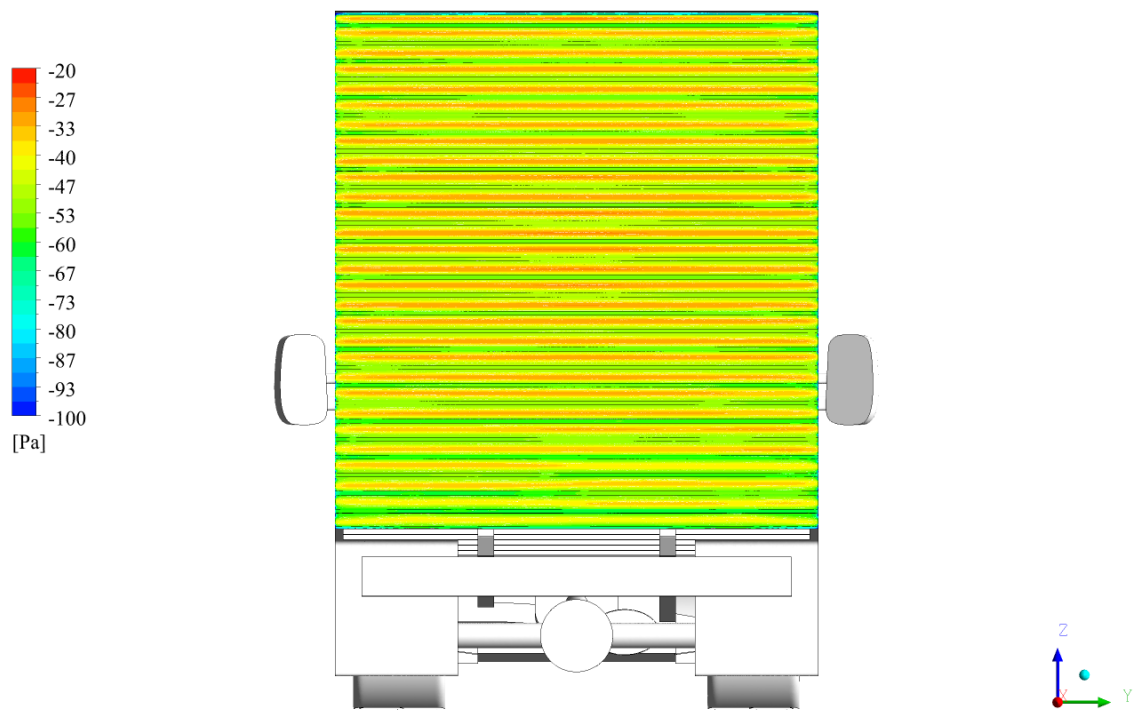


Rys. 5.69. Rozkłady ciśnienia na powierzchniach spiętrzenia i powierzchniach kierownic powietrza dla wariantu systemu aerodynamicznego nr 5.



0 1 [m]

Rys. 5.70. Porównanie rozkładów prędkości na płaszczyznę xz dla $y = 0$ pomiędzy modelem referencyjnym, a pojazdem z wariantami systemu aerodynamicznego od 5 do 8.



0 1 [m]

Rys. 5.71. Rozkłady ciśnienia na powierzchniach spiętrzenia i powierzchniach kierownic powietrza dla wariantu systemu aerodynamicznego nr 6.

Tab. 5.10. Wartości oporu aerodynamicznego pojazdu i jego strefy tylnej dla różnych wariantów systemu aerodynamicznego z odniesieniem do modelu referencyjnego i teoretycznej siły ciągu strumieni spiętrzających.

<i>Wariant</i>	F_{aero}^{SA} [N]	Różnica F_{aero} [N]	F_t^{SA} [N]	Różnica F_t [N]	T_s'' [N]
1	768,7	83,0	200,1	76,4	50,6
2	751,1	100,6	180,1	96,4	54,8
3	746,3	105,4	179,7	96,8	54,8
4	749,5	102,2	177,7	98,8	54,8
5	754,9	96,8	190,4	86,1	44,6
6	770,8	80,9	210,3	66,2	48,4

Tab. 5.11. Składowe siły oporu aerodynamicznego wybranych stref pojazdu dla wariantu nr 1.

Strefa	Opór ciśnieniowy [N]	Opór lepkościowy [N]	Łączny opór [N]
Kabina	668,2	13,5	681,7
Lusterka	46,2	0,9	47,0
Podwozie	51,5	0,9	52,4
Koła	62,4	8,5	70,9
Zabudowa bez strefy tylnej	-313,0	29,4	-283,6
Powierzchnie spiętrzenia	116,5	0,0	116,5
Powierzchnie kierownic	83,6	0,0	83,6
Suma	715,4	53,3	768,6

Tab. 5.12. Składowe siły oporu aerodynamicznego wybranych stref pojazdu dla wariantu nr 2.

Strefa	Opór ciśnieniowy [N]	Opór lepkościowy [N]	Łączny opór [N]
Kabina	674,2	13,5	687,7
Lusterka	46,3	0,9	47,1
Podwozie	52,7	0,9	53,6
Koła	63,2	8,5	71,8
Zabudowa bez strefy tylnej	-318,0	28,9	-289,1
Powierzchnie spiętrzenia	98,4	0,0	98,4
Powierzchnie kierownic	81,7	0,0	81,7
Suma	698,4	52,7	751,1

Tab. 5.13. Składowe siły oporu aerodynamicznego wybranych stref pojazdu dla wariantu nr 3.

Strefa	Opór ciśnieniowy [N]	Opór lepkościowy [N]	Łączny opór [N]
Kabina	679,65	13,5	687,7
Lusterka	46,16	0,9	47,1
Podwozie	50,71	0,9	53,6
Koła	62,58	8,5	71,8
Zabudowa bez strefy tylnej	-323,98	28,9	-289,1
Powierzchnie spiętrzenia	98,26	0,0	98,4
Powierzchnie kierownic	81,46315	0,0	81,7
Suma	694,85	52,7	751,1

Tab. 5.14. Składowe siły oporu aerodynamicznego wybranych stref pojazdu dla wariantu nr 4.

Strefa	Opór ciśnieniowy [N]	Opór lepkościowy [N]	Łączny opór [N]
Kabina	669,1	13,4	682,5
Lusterka	46,1	0,9	47,0
Podwozie	53,0	1,0	53,9
Koła	63,9	8,6	72,4
Zabudowa bez strefy tylnej	-312,3	28,3	-284,0
Powierzchnie spiętrzenia	105,3	0,0	105,3
Powierzchnie kierownic	72,4	0,0	72,4
Suma	697,4	52,2	749,5

Tab. 5.15. Składowe siły oporu aerodynamicznego wybranych stref pojazdu dla wariantu nr 5.

Strefa	Opór ciśnieniowy [N]	Opór lepkościowy [N]	Łączny opór [N]
Kabina	671,7	13,5	685,2
Lusterka	46,3	0,9	47,2
Podwozie	51,0	0,9	51,9
Koła	62,4	8,5	70,9
Zabudowa bez strefy tylnej	-319,1	28,4	-290,7
Powierzchnie spiętrzenia	130,2	0,0	130,2
Powierzchnie kierownic	60,2	0,0	60,2
Suma	702,8	52,2	754,9

Tab. 5.16. Składowe siły oporu aerodynamicznego wybranych stref pojazdu dla wariantu nr 5.

Strefa	Opór ciśnieniowy [N]	Opór lepkościowy [N]	Łączny opór [N]
Kabina	668,4	13,5	681,8
Lusterka	46,1	0,9	47,0
Podwozie	50,0	0,8	50,8
Koła	61,3	8,4	69,8
Zabudowa bez strefy tylnej	-317,6	28,7	-288,9
Powierzchnie spiętrzenia	154,2	0,0	154,2
Powierzchnie kierownic	56,1	0,0	56,1
Suma	718,5	52,3	770,8

W opływie pojazdu wyposażonego w system spiętrzający, niezależnie od przyjętego wariantu obliczeniowego, widoczne są pewne wspólne wzorce przepływów. Zastosowanie systemu aerodynamicznego zmienia rozkład prędkości wokół pojazdu, linii prądu przepływu, rozkłady ciśnienia w tylnej strefie oraz sposób kształtowania się wirów w przestrzeni za pojazdem. Dla każdej konfiguracji, strumienie spiętrzające po zderzeniu łączą się w jeden strumień odpływający, który następnie wchodzi w interakcję z wirami zawracającymi. Dla konfiguracji 4-6 dodatkowo widoczna jest silna interferencja pomiędzy strumieniami odpływającymi, które łączą się w grupy przed

zderzeniem z wirami zawracającymi za pojazdem. Rozkłady ciśnienia na powierzchniach spiętrzenia przyjmują największe wartości w połowie ich wysokości, co odpowiada połowie odległości pomiędzy wylotami strumieni. Dla każdego z wariantów następuje w tylnej strefie całkowita zmiana rozkładów pól ciśnień, charakteru tworzenia się wirów wstecznych i oddalenie ich rdzeni od pojazdu. Dla każdego z wariantów wartość o jaką system aerodynamiczny ogranicza opór pojazdu jest większa od teoretycznej siły odrzutu strumieni spiętrzających.

W wariantcie nr 1, kierunek strumienia odpływającego jest zaburzany przez dominujący główny wir wsteczny powietrza ze strefy podwoziowej. W rozkładach ciśnienia na powierzchni spiętrzenia widać znaczącą dywersyfikację. Największe ciśnienie panuje w środkowej wysokości tej powierzchni, lecz nie na jej pełnej szerokości. W rozkładach w strefie środkowej widoczne są trzy osobne obszary skoków ciśnienia. Istnieje znacząca różnica w rozkładach ciśnienia pomiędzy powierzchniami górnej i dolnej kierownicy powietrza. Główny wir wsteczny po interferencji ze strumieniem odpływającym nie zaburza strumieni spiętrzających przy powierzchni spiętrzenia, o czym świadczą niemalże symetryczne rozkłady ciśnienia na jej powierzchni. Po interferencji ze strumieniem odpływającym, kierunek wiru wstecznego zostaje zmieniony i skierowany w dolną kierownicę powietrza gdzie w wyniku zderzenia lokalnie podwyższa ciśnienie.

W wariantcie nr 2 wir wsteczny ze strefy podwoziowej również powoduje zmianę kierunku strumieni odpływających. Strumienie z górnej powierzchni spiętrzenia kierowane są do góry, zaś z dolnej do dołu. Zarówno strumienie górne, jak i dolne wchodzi w interakcje z wirami zawracającymi. Strumienie odpływające z górnych kierownic powietrza łączą się z warstwami ścinającymi powstałymi przy opływie dachu zabudowy. Strumienie dolne wchodzi w interakcję z głównym wir wstecznym, gdzie łączą się z nim i powracają uderzając w powierzchnie środkowych kierownic powietrza, znacząco zmieniając na nich rozkłady ciśnienia. Główna linia powrotu wirów znajduje się niemalże w płaszczyźnie symetrii zabudowy. Dominujący pozostaje

wir tworzony przez powietrze ze strefy podwoziowej, co widoczne jest również w rozkładach ciśnienia pomiędzy górną a dolną powierzchnią spiętrzenia. Na powierzchni górnej widoczne są zbieżne rozkłady jak dla wariantu pierwszego, z widocznymi trzema wąskimi obszarami gwałtownych skoków ciśnienia, podczas gdy na dolnej powierzchni widoczny jest jeden znacznie większy obszar o największym ciśnieniu. Zarówno dla górnej, jak i dolnej powierzchni spiętrzenia, szerokość obszarów największych ciśnień jest podobna i ograniczona do środkowej części powierzchni.

W wariancie nr 3 widoczna jest zmiana w interferencji strumieni odpływających z wirami zawracającymi. W liniach prądu prędkości uwidacznia się zdecydowane odsunięcie wirów zawracających od tyłu pojazdu, zarówno górnego, jak i dolnego. Widać zjawisko polegające na tłumieniu przez strumienie odpływające wirów zawracających, które już nie docierają do powierzchni kierownic powietrza. Największe wartości ciśnienia uzyskiwane są na dwóch środkowych powierzchniach spiętrzenia, przy czym nie są już obecne gwałtowne skoki ciśnienia, a rozkłady są równomierne. Obszary największego ciśnienia są równomiernie rozpięte na całej szerokości powierzchni spiętrzenia. Na powierzchniach kierownic panują względnie jednolite rozkłady ciśnienia, o wartościach znacznie mniejszych niż na powierzchniach spiętrzenia. To oznacza, że aby uzupełnić strefę pustą za tymi powierzchniami, przestrzeń ta wypełniają składowe strumienie odpływających, a nie jak w wariantach 1 i 2 powietrze niesione przez wiry wsteczne.

W wariancie nr 4 przebiegi ciśnień na powierzchniach spiętrzenia i kierownicach mają podobny charakter względem wariantu nr 3. Rozkłady są niemalże jednolicie rozciągnięte po pełnej szerokości sekcji spiętrzających. Strumienie kontrolują powracający wir wsteczny, ale nie tak skutecznie jak w wariancie nr 3. Rdzeń wiru znajduje się znacznie bliżej tylnej strefy pojazdu i wpływa na kierunek odpływu strumieni odpływających z sekcji spiętrzających. Z górnych trzech sekcji strumienie odpływające łączone są w jeden skonsolidowany, który kierowany jest do góry,

natomiast pozostałe cztery strumienie kierowane są do dołu, co zasila wir wsteczny. Ten jednak nie dostaje się w obszar znajdujący się bezpośrednio przy sekcjach spiętrzających, mimo to wpływa na rozkłady ciśnienia na czterech sekcjach spiętrzających, na których panuje w wyniku tłumienia największe ciśnienie.

W wariacie nr 5 główny wir wsteczny znajduje się znacznie bliżej tylnej strefy i większość strumieni odpływających zostaje skierowana do dołu. Rozkłady ciśnienia są równomiernie rozciągnięte na powierzchniach spiętrzenia poza powierzchnią znajdującą się najniżej, na której występuje rozdzielenie i wydzielenie dwóch symetrycznych obszarów skoków ciśnienia. Dla tej konfiguracji kształt wirów wstecznych przyjmuje postać zbliżoną do opływu pojazdu bez systemu. Maksymalne wartości dla ciśnienia osiągane na powierzchniach spiętrzenia są znacząco mniejsze od tych uzyskiwanych w wariantach 3 i 4.

W wariacie nr 6 strumienie odpływające są tłumione przez główny wir zawracający tuż za tylną strefą. Przebiegi wektorowe i linie prądów prędkości są bliskie opływu pojazdu referencyjnego bez systemu. W tym wariacie maksymalne ciśnienia osiągane na powierzchniach spiętrzenia są najmniejsze spośród wszystkich konfiguracji.

Największe ograniczenie oporu tylnej strefy pojazdu uzyskano w wariacie nr 4, przy czym w skali całkowitego oporu pojazdu dominujący jest wariant nr 3. Dla każdego z wariantów widoczna jest rozbieżność pomiędzy ograniczeniem oporu tylnej strefy a ograniczeniem całkowitego oporu pojazdu. Dla każdego z wariantów ograniczenie oporu całego pojazdu jest większe niż wynikałoby to z ograniczenia oporu strefy tylnej. Świadczy to o silnej interferencji pomiędzy opływami każdej ze stref pojazdu na ogólny charakter opływu pojazdu jako całości. Modyfikacja strefy tylnej wskazuje na znaczący wpływ również na strefę podwoziową i pozostałe ściany zabudowy.

Ograniczenie oporu pojazdu jest największe dla wariantu nr 3, gdzie przy ograniczeniu oporu tylnej strefy o 35,1% następuje ograniczenie całkowitego oporu aerodynamicznego pojazdu o 12,4%, co stanowi blisko dwu i półkrotnie

większą wartość względem najbardziej efektywnych technologii pasywnych dostępnych na rynku. Jednocześnie, ograniczenie oporu pojazdu o 105,4 N jest wartością blisko dwukrotnie większa od odpowiadającej temu wariantowi siły ciągu wszystkich strumieni spiętrzających wynoszącej 54,8 N. Potwierdza to koncepcję strumieni spiętrzających nie tylko jako efektywnego sposobu wytwarzania siły, ale jeszcze bardziej efektywnej bariery powietrznej.

5.6 Wstępna identyfikacja sposobu dostarczania powietrza zasilającego

Teoretyczne zapotrzebowanie na moc niezbędną do przyśpieszania powietrza zasilającego system aerodynamiczny, z pominięciem wszelkich strat przepływowych w systemie i sprawności urządzeń tłoczących, jest sumą mocy niezbędnej do przyśpieszania powietrza od prędkości otoczenia do prędkości pojazdu oraz mocy wymaganej do zmiany kierunku przepływu i jego dodatkowego przyśpieszenia względem pojazdu:

$$P'_s = \frac{1}{2}m''_s v_p^2 + \frac{1}{2}m''_s v_s^2 \quad (5.13)$$

Dla wariantu nr 3, łączna wymagana moc wynosi 3344,5 W, z czego 3198,1 W stanowi koszt rozpędzania powietrza do prędkości pojazdu, a jedynie 146,5 W koszt dodatkowego rozpędzania powietrza na pojeździe. Ponieważ koszt rozpędzania powietrza do prędkości pojazdu jest decydujący w ogólnym bilansie energetycznym, sposób pobierania powietrza z otoczenia odgrywać będzie kluczowe znaczenie pod kątem praktycznej aplikacji systemu. Aby spełnić warunek opłacalności energetycznej, przejmowanie powietrza powinno zatem zostać zrealizowane w sposób wywołujący jako efekt uboczny dodatkowe ograniczenie oporu aerodynamicznego pozostałych stref pojazdu. Oznacza to, że moc strat wynikających z konieczności rozpędzania powietrza powinna bilansować się z zyskiem spowodowanym przez to pobieranie w postaci ograniczania mocy oporów innej sekcji pojazdu. W celu wyznaczenia wartości siły, o jaką przejmowane powietrze powinno obniżyć opór aerodynamiczny pojazdu, można wykorzystać równanie 5.2 i przekształcić je do postaci:

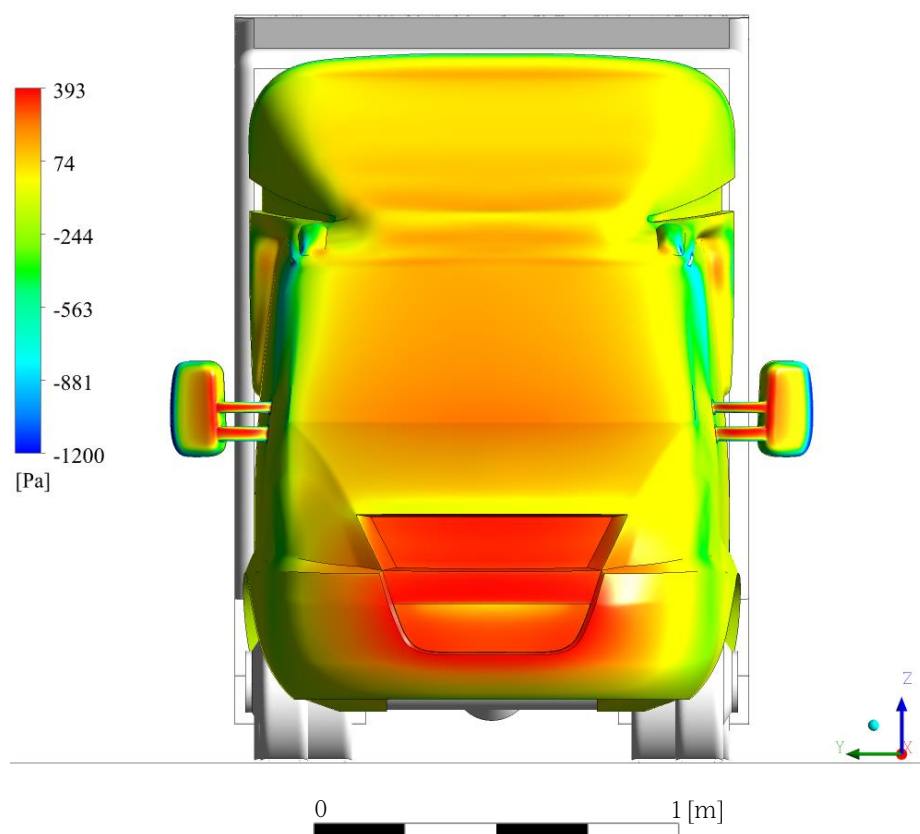
$$F_{aero} = \frac{\frac{1}{2}m''_s v_p^2}{v_p} = \frac{1}{2}m''_s v_p \quad (5.14)$$

Podstawiając do powyższego równania dane dla wariantu nr 3 i uwzględniając rzeczywisty przepływ masowy przez kierownice powietrza na poziomie 10,24 kg/s wartość siły do zbilansowania wynosi 128 N. Zestawiając tą wartość z danymi z tab. 5.2.

jednoznacznie widać, że proponowana we wstępnej koncepcji systemu strefa podwoziowa generuje opór w wysokości jedynie 52 N. Oznacza to, że koncepcja systemu opierająca się na założeniu poboru powietrza z tej strefy dla wymaganego w wariantcie nr 3 przepływu powietrza jest niewystarczająca. Dla takiej konfiguracji strumienie zasilające musiałyby nie tylko bilansować całkowity opór podwozia ale dodatkowo wytwarzać w tej strefie znaczącą siłę dopędzającą pojazd. Analizując składowe oporu dla poszczególnych stref pojazdu referencyjnego zasadne wydaje się pobieranie powietrza ze strefy czołowej, na którą działa głównie opór ciśnieniowy spowodowany spiętrzeniem powietrza. Zgodnie z równaniem ciągłości teoretyczna powierzchnia takiego wlotu powietrza dla wariantu nr 3 powinna wynosić:

$$A = \frac{m''_s}{\rho v_p} = \frac{10,24}{1,2255 \cdot 25} = 0,3 \text{ m}^2 \quad (5.15)$$

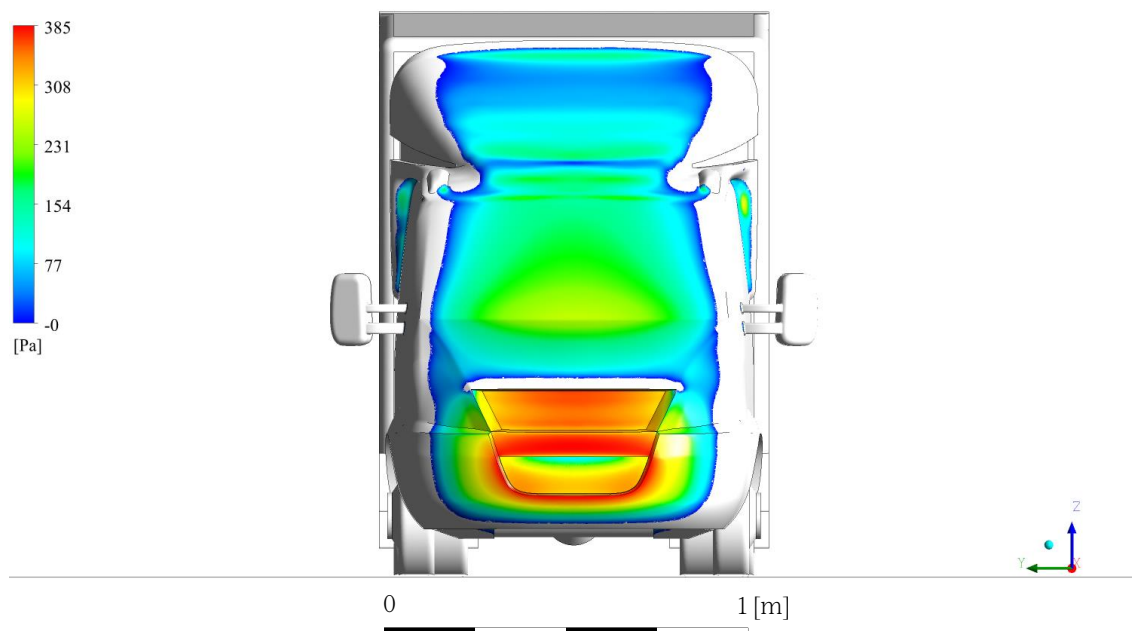
W rzeczywistości powietrze przed pojazdem ulega spiętrzeniu co skutkuje zmianami w polach prędkości i dywersyfikacją rozkładów ciśnienia.



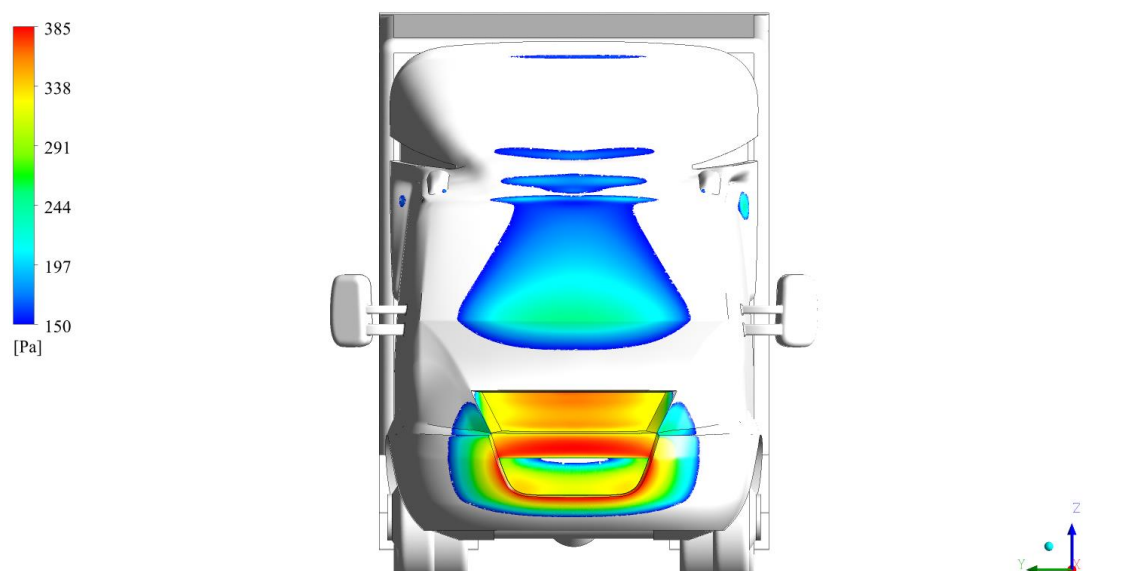
Rys. 5.72. Rozkłady ciśnienia statycznego na powierzchniach strefy czołowej pojazdu.

W celu wstępnego oszacowania wymaganej powierzchni czołowej, z której należy usunąć opór, aby zbilansować koszt zasilania systemu aerodynamicznego wyznaczono

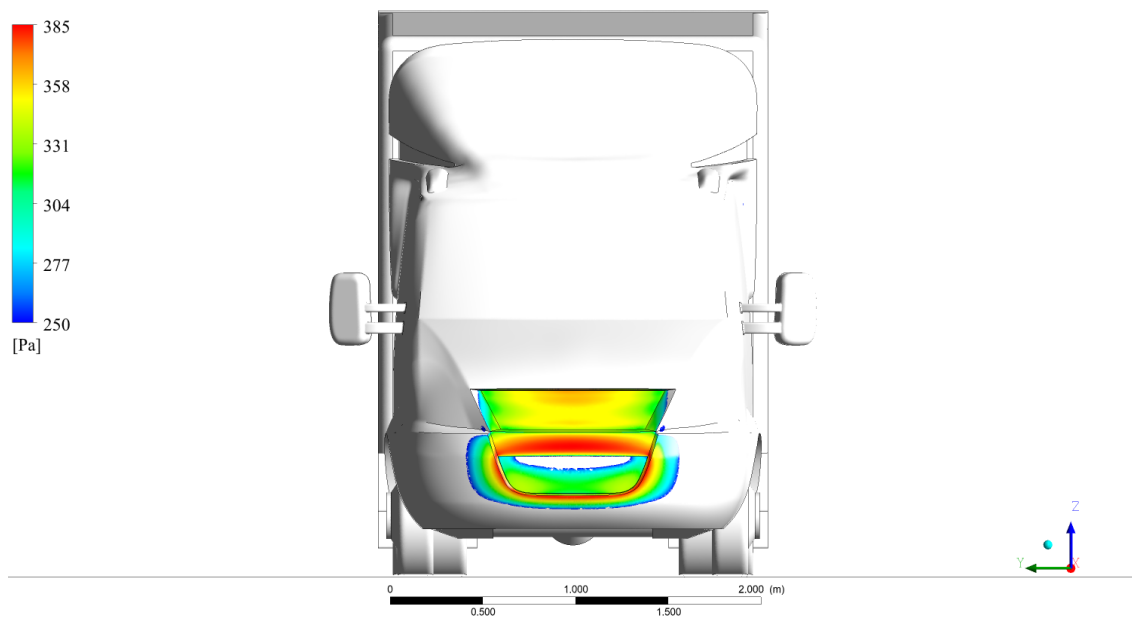
izopowierzchnie o zdefiniowanych czterech zakresach ciśnienia, a następnie na ich podstawie wyznaczono wartości odpowiadających na te powierzchnie sił.



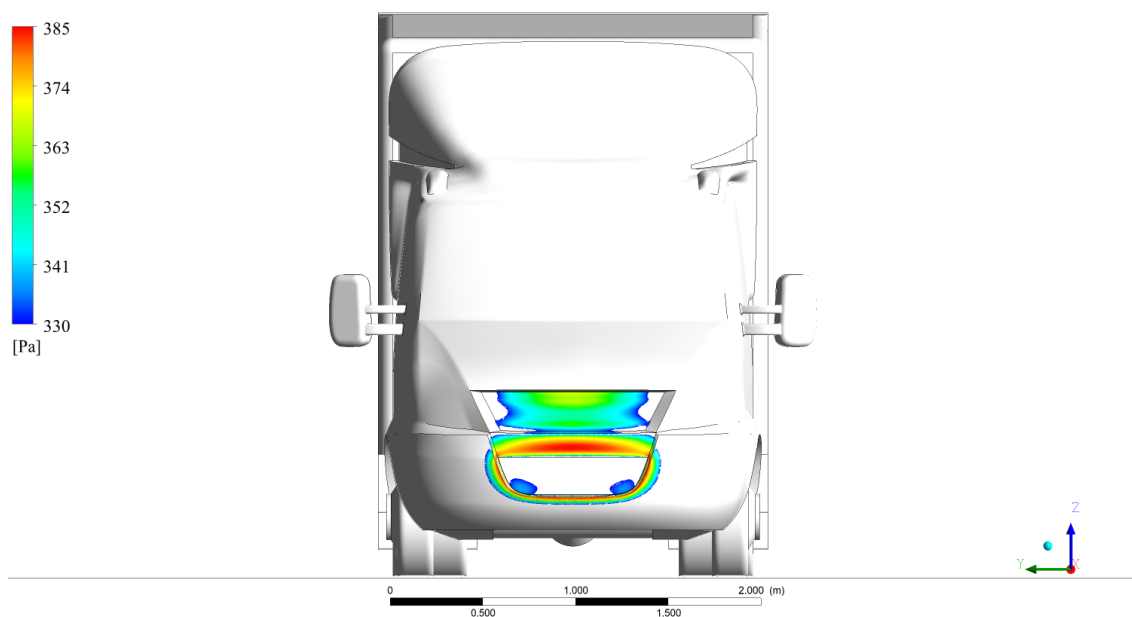
Rys. 5.73. Pełny obszar działania nadeśnięcia na strefę czołową pojazdu. Powierzchnia 5,9 m², siła oporu 594,6 N.



Rys. 5.74. Obszar nadeśnięcia w strefie czołowej pojazdu ograniczony do zakresu 150-385 Pa. Powierzchnia 2,47 m², siła oporu 439,5 N.



Rys. 5.75. Obszar nadciśnienia w strefie czołowej pojazdu ograniczony do zakresu 250-385 Pa. Powierzchnia 0,80 m², siła oporu 225 N.



Rys. 5.76. Obszar nadciśnienia w strefie czołowej pojazdu ograniczony do zakresu 330-385 Pa. Powierzchnia 0,44 m², siła oporu 128 N.

Aby zapewnić bilansowanie kosztu energetycznego przyspieszania powietrza zasilającego system aerodynamiczny do prędkości pojazdu, zgodnie z rysunkiem 5.76, wystarczy zastąpić powierzchnię 0,44 m² strefy czołowej o największym spiętrzeniu

wlotem powietrza. Jeśli implementacja wlotu w pełni zbilansuje koszt przyspieszania powietrza do prędkości pojazdu, dodatkowym kosztem energetycznym w wysokości jedynie 146,5 W możliwe będzie ograniczenie siły oporu aerodynamicznego pojazdu o 105,4 N, co odpowiada mocy 2635 W. Czysto teoretyczny zysk wynosi 2488,5 W, natomiast rzeczywisty zysk energetyczny będzie pomniejszony o straty przepływowe i sprawność urządzeń tłoczących.

Właściwe zaprojektowanie i implementacja wlotów powietrza może znacznie poprawić efektywność aerodynamiczną pojazdu, obniżając opór i potencjalnie zwiększając wydajność systemu. Aby osiągnąć pożądane efekty aerodynamiczne, konieczne jest opracowanie skutecznych metod integracji wlotów powietrza z elementami konstrukcyjnymi pojazdu. Dokładny sposób pobierania powietrza i dobór powierzchni wlotu będzie więc obejmować badania nad geometrią wlotów, optymalizacją przepływu powietrza oraz integracją systemów z istniejącymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi pojazdów. Wymagania te stanowią ambitne wyzwania badawcze otwierające obszar dla przyszłych odkryć.

Podsumowanie wyników i wnioski do dalszych prac

W niniejszej pracy zaprezentowano koncepcję systemu aktywnej aerodynamiki, w którym zastosowano strumienie powietrza spiętrzające się na tylnej ścianie pojazdu ciężarowego. Strumienie te wytwarzają dodatkową barierę powietrzną, co znacząco redukuje opór aerodynamiczny pojazdu. Choć nie określono dokładnego rozwiązania technicznego dotyczącego pobierania powietrza z otoczenia, wskazano metodę zasilania systemu, która zapewnia jego opłacalność energetyczną.

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące główne spostrzeżenia:

1. Wariant nr 3 (wysokość sekcji spiętrzającej 561,3 mm, szerokość strumieni spiętrzających 92,93 mm) spowodował największe ograniczenie oporu tylnej strefy o 35,1%, co przełożyło się na redukcję całkowitego oporu aerodynamicznego pojazdu o 12,4%.
2. Skuteczność ograniczania oporu aerodynamicznego (wyrażana jako wytworzony nadmiar siły parcia) za pomocą zderzających się strumieni była blisko dwukrotnie większa niż sumaryczna siła ciągu strumieni powietrza wykorzystanych do jej wytworzenia.
3. Przyjęte do weryfikacji różnorodne warianty geometryczne zapewniały zróżnicowane wzorce rozkładu przepływu i ciśnienia, co pozwoliło na różnorodne kształtowanie się wirów wstecznych i umożliwiło znalezienie wersji zapewniającej skuteczność redukcji oporu aerodynamicznego.

4. Wariant nr 3 wykazał tłumienie wirów zawracających przez strumienie odpływające, co skutkowało bardziej równomiernym rozkładem ciśnienia na powierzchniach spiętrzenia.
5. Analiza rozkładu ciśnienia na powierzchniach spiętrzenia wskazuje, że największe wartości ciśnienia występują w połowie wysokości tych powierzchni.
6. Badania dotyczące wpływu parametrów wejściowych (v_s i w_s) na parametr wyjściowy (F_{PS}/T_s') wskazały na ich potencjał optymalizacyjny względem skuteczności ograniczania oporu aerodynamicznego.
7. Identyfikacja najlepszego miejsca poboru powietrza zasilającego oraz sposób jego transportu posiada krytyczny wpływ na bilans energetyczny systemu.

Uzyskane wyniki pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Teza naukowa, mówiąca o możliwości aktywnego sterowania przepływem powietrza w celu znaczącego zmniejszenia oporu aerodynamicznego i mocy napędowej pojazdu ciężarowego, została potwierdzona. Wariant nr 3 osiągnął redukcję całkowitego oporu aerodynamicznego o 12,4%, co jest znaczącym dowodem na skuteczność proponowanego systemu aktywnej aerodynamiki.
2. Cel naukowy polegający na zidentyfikowaniu najbardziej efektywnego sposobu ograniczenia oporu aerodynamicznego przy użyciu systemu spiętrzających strumieni powietrza został osiągnięty. Wyniki badań wskazują, że możliwe jest praktyczne zastosowanie tej technologii w pojazdach użytkowych, co otwiera nowe perspektywy w dziedzinie aerodynamiki.
3. Wykorzystanie komputerowej mechaniki płynów (CFD) jako narzędzia badawczego pozwoliło na precyzyjne modelowanie i optymalizację systemu aktywnej aerodynamiki, co znacząco przyczyniło się do osiągnięcia celów badawczych bez ponoszenia nadmiarowych wydatków.
4. Zastosowanie koncepcji zderzających się strumieni powietrza umożliwia powstanie siły przewyższającej teoretyczną pierwotną siłę ciągu wytwarzającą te strumienie.
5. Badania empiryczne potwierdziły teoretyczne założenia dotyczące efektywności zderzających się strumieni powietrza w ograniczaniu oporu aerodynamicznego. Użycie zderzających się strumieni powietrza jako sposobu zmniejszania oporu aerodynamicznego pojazdu zwiększa przewagę siły spiętrzenia nad siłą odrzutu.

Efektywność usuwania oporu za pomocą bariery powietrznej była blisko dwukrotnie większa niż teoretyczna siła ciągu strumieni powietrza wykorzystanych do jej wytworzenia.

6. Badania pozwoliły na identyfikację kluczowych czynników wpływających na efektywność systemu, takich jak geometria sekcji spiętrzających, prędkość strumieni powietrza oraz sposób pobierania powietrza z otoczenia.
7. Warianty z różnymi konfiguracjami geometrycznymi sekcji spiętrzających wykazały, że odpowiednie ukształtowanie powierzchni spiętrzenia i kierownic powietrza ma największe znaczenie dla efektywności ograniczania oporu aerodynamicznego.
8. Pobieranie powietrza do zasilania systemu powinno odbywać się w taki sposób, aby zmniejszać oporu aerodynamiczny w pozostałych strefach pojazdu, w szczególności w strefie czołowej, gdzie następuje zwykle największe spiętrzenie powietrza. Przeprowadzone badania i obliczenia wykazały, że pobieranie powietrza z tej strefy jest teoretycznie możliwe i korzystne, jednakże techniczny sposób realizacji tego procesu wymaga dalszych prac inżynierskich.
9. Badania pokazują, że opracowana technologia może być praktycznie zastosowana w pojazdach użytkowych, otwierając nowe perspektywy w dziedzinie ich aerodynamiki. Kontynuacja badań może znacząco poprawić efektywność energetyczną pojazdów użytkowych, zredukować emisję CO₂ oraz obniżyć koszty eksploatacji, co jest istotne w kontekście globalnych dążeń do zrównoważonego rozwoju i ochrony środowiska.

Wnioski do dalszych prac:

1. Wskazane jest przeprowadzenie badań nad różnymi konstrukcjami powierzchni spiętrzenia w zależności od ich kształtu geometrycznego, na przykład w postaci zakrzywionych powierzchni.
2. W celu ograniczenia oporu strefy nieaktywnej tworzonej przez powierzchnie kierownic powietrza, a tym samym dodatkowego zwiększenia efektywności systemu, warto zbadać konstrukcje kierownic kaskadowych, w których zewnętrzna powierzchnia przekształcona jest na dodatkową, mniejszą powierzchnię spiętrzenia.

3. Interesujący kierunek badań stanowią konfiguracje, w których kierownice powietrza nie przechodzą bezpośrednio w powierzchnię spiętrzenia, zaś wylot strumieni spiętrzenia jest oddalony od powierzchni spiętrzenia.
4. Należy rozważyć badania systemu dla różnych prędkości pojazdu oraz dla różnych warunków atmosferycznych, szczególnie dla zróżnicowanych wariantów prędkości i kierunku wiatru bocznego.

Literatura

- [1] Parlament Europejski i Rada Unii Europejskiej, "Rozporządzenie (UE) 2019/1242 z dnia 20 czerwca 2019 r. określające normy emisji CO₂ dla nowych pojazdów ciężkich oraz zmieniające rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 595/2009 i (UE) 2018/956 oraz dyrektywę Rady 96/53/WE," 2019. [Online]. Dostępne pod: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1242>. [Dostęp dnia: 21 lipca 2023 r.].
- [2] ACEA, "Truck makers react to final CO₂ deal setting first-ever EU standards for heavy-duty vehicles," 2019. [Online]. Dostępne pod: <https://www.acea.auto/press-release/truck-makers-react-to-final-co2-deal-setting-first-ever-eu-standards-for-heavy-duty-vehicles>. [Dostęp dnia: 21 lipca 2023 r.].
- [3] Parlament Europejski i Rada Unii Europejskiej, "Wniosek rozporządzenia zmieniającego rozporządzenie (UE) 2019/1242 w odniesieniu do wzmocnienia norm emisji CO₂ dla nowych pojazdów ciężkich oraz włączenia obowiązków sprawozdawczych, a także uchylające rozporządzenie (UE) 2018/956," 2023. [Online]. Dostępne pod: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:4a3b2136-ad3e-11ed-8912-01aa75ed71a1.0011.02/DOC_1&format=PDF. [Dostęp dnia: 21 lipca 2023 r.].
- [4] ACEA, "CO₂ targets unachievable without enabling conditions, warn European truck and bus manufacturers," 2023. [Online]. Dostępne pod: <https://www.acea.auto/press-release/co2-targets-unachievable-without-enabling-conditions-warn-european-truck-and-bus-manufacturers/>. [Dostęp dnia: 21 lipca 2023 r.].
- [5] "Regulations for Emissions from Vehicles and Engines Proposed Rule: Greenhouse Gas Emissions Standards for Heavy-Duty Vehicles – Phase 3," U.S. Environmental Protection Agency. [Online]. Dostępne pod: <https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/proposed-rule-greenhouse-gas-emissions-standards-heavy>. [Dostęp dnia: 7 grudnia 2023 r.].
- [6] "Heavy-duty Vehicle and Engine Greenhouse Gas Emission Regulations (SOR/2013-24)," Government of Canada. [Online]. Dostępne: <https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/regulations/sor-2013-24/page-3.html#h-800914>. [Dostęp dnia: 7 grudnia 2023 r.].

- [7] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, "Reducing Fuel Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Medium- and Heavy-Duty Vehicles, Phase Two: Final Report," Washington, DC: The National Academies Press, 2020. DOI: 10.17226/25542. [Online]. Dostępne pod: <https://nap.nationalacademies.org/catalog/25542/reducing-fuel-consumption-and-greenhouse-gas-emissions-of-medium-and-heavy-duty-vehicles-phase-two>. [Dostęp dnia: 8 grudnia 2023 r].
- [8] Truck and Bus Aerodynamics and Fuel Economy Committee, "Guidelines for Aerodynamic Assessment of Medium and Heavy Commercial Ground Vehicles Using Computational Fluid Dynamics," SAE International, J2966_202106, 2021. [Online]. Dostępne pod: https://doi.org/10.4271/J2966_202106. [Dostęp dnia: 20 lipca 2023 r.].
- [9] T. C. Schuetz, "Aerodynamics of Road Vehicles, Fifth Edition," R-430. Warrendale, PA: SAE International, 2015.
- [10] W. H. Hucho and G. Sovran, "Aerodynamics of Road Vehicles," Annual Review of Fluid Mechanics, vol. 25, pp. 485-537, 1993. [Online]. Dostępne pod: <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.fl.25.010193.002413>. [Dostęp dnia: 27 listopada 2023 r.].
- [11] J. Katz, "New Directions in Race Car Aerodynamics: Designing for Speed," Robert Bentley Publishers, USA, 1995.
- [12] T. Y. Obidi, "Theory and Applications of Aerodynamics for Ground Vehicles," R-392. Warrendale, PA: SAE International, 2014.
- [13] R. H. Barnard, "Road Vehicle Aerodynamic Design: An Introduction," 3rd ed. St. Albans, Hertfordshire: MechAero Publishing, 2009.
- [14] M. Hilgers, "Commercial Vehicle Technology: Entire Vehicle," 2nd ed. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2023. DOI: 10.1007/978-3-662-67070-5.
- [15] W. H. Hucho, "Aerodynamika samochodu. Od mechaniki przepływu do budowy pojazdu," Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1988.
- [16] R. Wood, "Operationally-Practical & Aerodynamically-Robust Heavy Truck Trailer Drag Reduction Technology," SAE Int. J. Commer. Veh., vol. 1, pp. 237-247, 2009.
- [17] K. R. Cooper, "Bluff-body aerodynamics as applied to vehicles," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 49(1-3), pp. 1-21, 1993. DOI: 10.1016/0167-6105(93)90003-7

- [18] S. Windsor, "Real World Drag Coefficient – Is It Wind Averaged Drag?" 2014. DOI: 10.1533/9780081002452.1.3. [Online]. Dostępne pod: https://www.researchgate.net/publication/286001833_Real_World_Drag_Coefficient_-Is_It_wind_Averaged_Drag. [Dostęp dnia: 15 lipca 2023 r.].
- [19] J. Howell, D. Forbes, and M. Passmore, "A drag coefficient for application to the WLTP driving cycle," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 231, no. 9, pp. 1274-1286, 2017. DOI: 10.1177/0954407017704784.
- [20] J. C. Hilliard and G. S. Springer, "Fuel Economy in Road Vehicles Powered by Spark Ignition Engines," 1st ed. New York, NY: Springer, 1984. DOI: 10.1007/978-1-4899-2277-9.
- [21] M. J. Nunney, "Light and Heavy Vehicle Technology," 4th ed. London: Routledge, 2006. DOI: 10.4324/9780080465753.
- [22] O. Delgado, F. Rodriguez, and R. Muncrief, "Fuel efficiency technology in European heavy-duty vehicles: Baseline and potential for the 2020–2030 timeframe," *The International Council on Clean Transportation (ICCT)*, 2017. [Online]. Dostępne pod: https://theicct.org/sites/default/files/publications/EU-HDV-Tech-Potential_ICCT-white-paper_14072017_vF.pdf. [15 lipca 2023 r.].
- [23] Insurance Institute for Highway Safety, "Maximum posted speed limits," Insurance Institute for Highway Safety, Highway Loss Data Institute, 501(c)(3) organizations. [Online]. Dostępne pod: <https://www.iihs.org/topics/speed/speed-limit-laws>. [Dostęp dnia: 21 lipca 2023 r.].
- [24] Ministerstwo Klimatu i Środowiska, "Rozporządzenie w sprawie metodyki obliczania emisji gazów cieplarnianych, określenia wskaźników ich emisji oraz wartości opałowej dla poszczególnych paliw i wartości energetycznej energii elektrycznej," *Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej*, poz. 1494, Warszawa, 15 lipca 2022 r. [Online]. Dostępne pod: <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20220001494/O/D20221494.pdf>. [18 września 2023 r.].
- [25] U.S. Department of Transportation, Bureau of Transportation Statistics, "Average Fuel Efficiency of U.S. Light Duty Vehicles," [Online]. Dostępne pod: <https://www.bts.gov/content/average-fuel-efficiency-us-light-duty-vehicles>. [Dostęp dnia: 19 września 2023 r.].
- [26] J. Katz, "Aerodynamics of race cars," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 38, 2006. DOI: 10.1146/annurev.fluid.38.050304.092016. [Online]. Dostępne pod: <https://www.researchgate.net/profile/Joseph-Katz->

8/publication/228616843_Aerodynamics_of_race_cars/links/0deec539af10bd749f00000/Aerodynamics-of-race-cars.pdf. [Dostęp dnia: 8 lutego 2023 r.].

- [27] J. W. Elsner, "Turbulencja przepływów," Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1987.
- [28] T. Castelain, M. Michard, M. Szmigiel, D. Chacaton, and D. Juvé, "Identification of flow classes in the wake of a simplified truck model depending on the underbody velocity," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 175, pp. 352-363, 2018, ISSN 0167-6105, DOI: 10.1016/j.jweia.2018.02.004.
- [29] R. Wood, "Reynolds Number Impact on Commercial Vehicle Aerodynamics and Performance," *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, vol. 8, no. 2, pp. 590-667, 2015, DOI: 10.4271/2015-01-2859.
- [30] P. W. Bearman, "Review—Bluff Body Flows Applicable to Vehicle Aerodynamics," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 102, no. 3, p. 265, 1980, DOI: 10.1115/1.3240679.
- [31] R. M. Wood, "A discussion of a heavy truck advanced aerodynamic trailer system," in *Proc. 9th Int. Symp. Heavy Veh. Weights Dimens.*, University Park, PA, 2006.
- [32] NASA Glen Research Center, "Similarity Parameters." [Online]. Dostępne pod: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/airsim.html>. [Dostęp dnia: 1 września 2023 r.].
- [33] K. Stewartson, "D'Alembert's Paradox," *SIAM Review* 23, no. 3 (1981): 308-43. [Online]. Dostępne pod: <http://www.jstor.org/stable/2030284>. [Dostęp dnia: 6 września 2023 r.].
- [34] J. F. Wendt, J. D. Jr, J. Degroote, G. Degrez, E. Dick, R. Grundmann, i J. Vierendeels, "Computational Fluid Dynamics: An Introduction," 2009, DOI: 10.1007/978-3-540-85056-4.
- [35] T. A. Talay, "Introduction to the Aerodynamics of Flight," Langley Research Center, Scientific and Technical Information Office, National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C., 1975.
- [36] E. L. Houghton, P. W. Carpenter, S. H. Collicott, and D. T. Valentine, "Aerodynamics for Engineering Students," 7th ed., Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.
- [37] S. Hoerner, "Fluid-Dynamic Drag," revised ed., Hoerner Fluid Dynamics, Bricktown, New Jersey, 1965.

- [38] K. Jeżowiecka-Kabsch i H. Szewczyk, "Mechanika Płynów," Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2001.
- [39] N. Zaks, "Podstawy aerodynamiki doświadczalnej," Warszawa: Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej, 1957.
- [40] H. Sturm, G. Dumstorff, P. Busche, D. Westermann, and W. Lang, "Boundary Layer Separation and Reattachment Detection on Airfoils by Thermal Flow Sensors," *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 12, pp. 14292-306, 2012, doi: 10.3390/s121114292.
- [41] F. Smith, B. Scheichl, and A. Kluwick, "On turbulent separation," *Journal of Engineering Mathematics*, vol. 68, pp. 373-400, 2010, doi: 10.1007/s10665-010-9413-9.
- [42] H. Schlichting (Deceased) and K. Gersten, "Boundary-Layer Theory", 9th ed. Springer, Berlin, 2017. DOI: 10.1007/978-3-662-52919-5.
- [43] D. M. Driver, H. L. Seegmiller, and J. G. Marvin, "Time-dependent behavior of a reattaching shear layer," *AIAA Journal*, vol. 25, no. 7, pp. 914–919, 1987, doi: 10.2514/3.9722.
- [44] A. Prasad and C. H. K. Williamson, "The instability of the shear layer separating from a bluff body," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 333, pp. 375–402, 1997, doi: 10.1017/s0022112096004326.
- [45] G. Sovran, T. Morel, and W. T. Mason, Jr., Eds., *Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles*. New York - London: Plenum Press, 1978. "Proceedings of the Symposium on Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles held at the General Motors Research Laboratories, Warren, Michigan, September 27-28, 1976.
- [46] G. Pavia, M. Passmore, and C. Sardu, "Evolution of the bi-stable wake of a square-back automotive shape," *Exp Fluids*, vol. 59, no. 20, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00348-017-2473-0>.
- [47] S. Ahmed, G. Ramm, and G. Faitin, "Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake," Technical report, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, PA, 1984.
- [48] E.G. Duell, A. George, "Experimental study of a ground vehicle body unsteady near wake," SAE technical paper, 1999.
- [49] B. Khalighi, S. Zhang, C. Koromilas, S. Balkanyi, L.P. Bernal, G. Iaccarino, P. Moin, "Experimental and computational study of unsteady wake flow behind a bluff body with a drag reduction device," SAE technical paper, 2001.

- [50] M. Grandemange, O. Cadot, A. Courbois, V. Herbert, D. Ricot, T. Ruiz, and R. Vigneron, "A study of wake effects on the drag of Ahmed's squareback model at the industrial scale," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 145, pp. 282–291, 2015.
- [51] O. Evstafyeva, A. Morgans, and L. Dalla Longa, "Simulation and feedback control of the Ahmed body flow exhibiting symmetry breaking behaviour," *J. Fluid Mech.*, vol. 817, R2, pp. 1–12, 2017
- [52] C. Chovet, M. Feingesicht, B. Plumjeau, M. Lippert, L. Keirsbulck, F. Kerhervé, and J.-M. Foucaut, "Sliding mode control applied to a square-back Ahmed body," *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 2019. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2019.07.010.
- [53] K. H. Lo and K. Kontis, "Flow around an articulated lorry model," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 82, pp. 58-74, 2017. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2016.11.003.
- [54] M. Urquhart, M. Varney, S. Sebben, et al., "Drag reduction mechanisms on a generic square-back vehicle using an optimised yaw-insensitive base cavity," *Exp Fluids*, vol. 62, 241, 2021, <https://doi.org/10.1007/s00348-021-03334-0>.
- [55] E. Joubert, T. Harms, and G. Venter, "Computational simulation of the turbulent flow around a surface mounted rectangular prism," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 142, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.03.019>.
- [56] S. Krajnović and L. Davidson, "Numerical Study of the Flow Around a Bus-Shaped Body," *ASME. J. Fluids Eng.*, vol. 125, no. 3, pp. 500–509, May 2003, <https://doi.org/10.1115/1.1567305>.
- [57] M. Rouméas, P. Gilliéron, and A. Kourta, "Analysis and control of the near-wake flow over a square-back geometry," *Computers & Fluids*, vol. 38, no. 1, pp. 60-70, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2008.01.009>.
- [58] A. Perry, M. Almond, M. Passmore, and R. Littlewood, "The Study of a Bi-Stable Wake Region of a Generic Squareback Vehicle using Tomographic PIV," *SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst.*, vol. 9, no. 2, pp. 743-753, 2016, <https://doi.org/10.4271/2016-01-1610>, SAE 2016 World Congress and Exhibition.
- [59] A. Sciacchitano, Danièle, and Doi, "Investigation of the Ahmed body cross-wind flow topology by robotic volumetric PIV," Delft University of Technology, 2019.

- [60] A. Altaf, A. Omar, and W. Asrar, "Passive drag reduction of square back road vehicles," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 134, pp. 30–43, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.08.006>.
- [61] H. Choi, J. Lee, and H. Park, "Aerodynamics of Heavy Vehicles," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 46, 2013, <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-011212-140616>.
- [62] K. H. Lo and K. Kontis, "Flow characteristics over a tractor-trailer model with and without vane-type vortex generator installed," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 159, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.10.009>.
- [63] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, "Twenty-First Symposium on Naval Hydrodynamics," Washington, DC: The National Academies Press, 1997, <https://doi.org/10.17226/5870>.
- [64] United States Environmental Protection Agency, "SmartWay Verified List of Aerodynamic Devices," [Online]. Dostępne pod: <https://www.epa.gov/verified-diesel-tech/smartway-verified-list-aerodynamic-devices>. [Dostęp dnia: 15 stycznia 2024 r.].
- [65] J. Patten, B. McAuliffe, W. Mayda, and B. Tanguay, "Review of Aerodynamic Drag Reduction Devices for Heavy Trucks and Buses," Technical Report CSTT-HVC-TR-205, National Research Council Canada, Centre for Surface Transportation Technology, 11 maja 2012. [Online]. Dostępne pod: https://tc.canada.ca/sites/default/files/migrated/aerodynamics_report_may_2012.pdf. [Dostęp dnia: 16 stycznia 2024 r.].
- [66] R. Mihelic, D. Schaller, M. Roeth, et al., "Confidence Report: Trailer Aerodynamic Devices," North American Council for Freight Efficiency, 26 lutego 2016. [Online]. Dostępne pod: https://nacfe.org/wp-content/uploads/2018/02/TE_Trailer_Aero_CR_FINALFINAL.pdf. [Dostęp dnia: 15 stycznia 2024 r.].
- [67] North American Council for Freight Efficiency, "CONFIDENCE REPORT: Trailer Aerodynamic Devices," 2020. [Online]. Dostępne pod: <https://nacfe.org/wp-content/uploads/2020/09/FullAeroTrailerConfidenceReport2020.pdf>. [Dostęp dnia: 7 września 2023 r.].
- [68] K. Cooper and S. Watkins, "The Unsteady Wind Environment of Road Vehicles, Part One: A Review of the On-road Turbulent Wind Environment," *SAE Technical Papers*, 2007, doi: 10.4271/2007-01-1236.
- [69] S. Watkins and K. Cooper, "The Unsteady Wind Environment of Road Vehicles, Part Two: Effects on Vehicle Development and Simulation of Turbulence," *SAE Technical Papers*, 2007, doi: 10.4271/2007-01-1237.

- [70] WABCO, "AERODYNAMIC REAR TRAILER FAIRINGS," [Online]. Dostępne pod: https://www.zf.com/products/media/automotive/cv/literature_downloads_wna/trailer_solutions/aerodynamics_sales_publications/SP18039_web.pdf. [Dostęp dnia: 2 lutego 2023 r.].
- [71] "Lotem strzały Truck & Van 12/2012 (21)," Truck & Van, 2012. [Online]. Dostępne pod: https://truck-van.pl/online/TruckVan_2012_12m.pdf. [Dostęp dnia: 1 września 2023 r.].
- [72] "Transporte y tecnología: llega la electromovilidad," Encamion, [Online]. Dostępne pod: <https://encamion.com/transporte-y-tecnologia-llega-la-electromovilidad/>. [Dostęp dnia: 1 września 2023 r.].
- [73] VOLVO, "Nowy koncepcyjny samochód ciężarowy Volvo Trucks zużywa o ponad 30% mniej paliwa," 2016. [Online]. Dostępne pod: <https://www.volvotrucks.pl/pl-pl/news/press-releases/2016/may/pressrelease-160531.html>. [Dostęp dnia: 1 września 2023 r.].
- [74] Volvo Trucks, "SUPERTRUCK 2 VOLVO," [Online]. Dostępne pod: <https://www.volvotrucks.us/innovation/supertruck2/>. [Dostęp dnia: 1 września 2023 r.].
- [75] POMMIER, "AIRWIN: AERODYNAMICZNE DEFLEKTORY TYLNE," [Online]. Dostępne pod: <https://www.pommier.eu/pl/plaktualnosci/airwin-aerodynamiczne-deflektory-tylne>. [Dostęp dnia: 4 września 2023 r.].
- [76] TRANSTEX, "EDGE ELITE AERO™ ADVANTAGE," [Online]. Dostępne pod: <https://transtex-lle.com/products/edge-topkit-2/>. [Dostęp dnia: 4 września 2023 r.].
- [77] DON-BUR, "Teardrop Trailer Case Studies," [Online]. Dostępne pod: <https://donbur.co.uk/faqs/aerodynamics/teardrop-trailer-case-studies.html>. [Dostęp dnia: 1 września 2023 r.].
- [78] Schmitz Cargobull, "Fahrzeuge der Schmitz Cargobull EcoGeneration sind förderungswürdig," [Online]. Dostępne pod: <https://www.cargobull.com/de/presse/2021/ecogenerationfoerderungswuerdig#Download>. [Dostęp dnia: 1 września 2023 r.].
- [79] M. Busch, "Vortex Generators: Band-Aids or Magic? - AVweb Features Article," dostępne online: https://engineering.purdue.edu/~andrisan/Courses/AAE190_Fall_2001/twnvgs.pdf. [Dostęp dnia: 2 września 2023 r.].
- [80] A. M. Kuethe, "Effect of Streamwise Vortices on Wake Properties Associated with Sound Generation," Journal of Aircraft, vol. 9, pp. 715-719, 1972.

- [81] J. Lin, "Review of research on low-profile vortex generators to control boundary-layer separation," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 38, pp. 389-420, 2002, [https://doi.org/10.1016/S0376-0421\(02\)00010-6](https://doi.org/10.1016/S0376-0421(02)00010-6).
- [82] J. Leuschen and K.R. Cooper, "Full-Scale Wind Tunnel Tests of Production and Prototype, Second-Generation Aerodynamic Drag-Reducing Devices for Tractor-Trailers," SAE Technical Paper 06CV-222, SAE International, 2006.
- [83] R. Arias, "Sistema Aerodinámico AIRTAB de Knorr Bremse Ibérica para camiones que reduce el consumo de combustible," *Transporte Profesional*, [Online]. Dostępne pod: <https://www.transporteprofesional.es/industria-auxiliar/componentes-recambios-camion/sistema-aerodinamico-airtab-de-knorr-bremse-para-vehiculos-industriales-que-reduce-consumo-de-combustible>. [Dostęp dnia: 1 marca 2024 r.].
- [84] S. Hausberger, "Bodies and trailers – development of CO₂ emissions determination procedure. Procedure no: CLIMA/C.4/SER/OC/2018/0005, Task 2. Identification and evaluation of the possible methodology options," 18 Mar. 2019. [Online]. Dostępne pod: <https://climate.ec.europa.eu/system/files/2020-01> [Dostęp dnia: 12 września 2023 r.].
- [85] N. v. Dijk, "The application of atmospheric boundary layer to evaluate truck aerodynamics in CFD," presented at the STAR Global Conference, Berlin, March 2017.
- [86] B. Bhatnagar, "A Study of Reynolds Number Effects on Production Class 8 Tractor-Trailer Combinations," Chicago, 2011.
- [87] K. S. B. S. J. Ortega, "Investigation of Tractor Base Bleeding for Heavy Vehicle Aerodynamic Drag Reduction," in *The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses, and Trains*, Lawrence Livermore National Laboratory, 2007.
- [88] M. Ö. A. Cavit Çinar, "Aerodynamic optimization study for roof spoiler and side extender parts of Ford heavy duty truck using CFD tools," Lisbon, Portugal, June 2010.
- [89] M. Ö. A. Cavit Çinar, "Aerodynamic Optimization Study for Ford cargo H476 Truck," 2010.
- [90] M. Ganis, "Aero-thermal development of the Neoplan CityLiner CFD methodology at MAN Truck and Bus AG," Nantwich, UK, June 2015.
- [91] P. Elofsson, "Development of the new Scania truck range," London, UK, 2016.

- [92] P. Elofsson, "Recent development in truck aerodynamics," Nantwich, UK, 2015.
- [93] G. Mercier, "Computational Truck Aerodynamics," Manchester, UK, 2017.
- [94] A. Tenstam, "The Volvo Concept Truck," Manchester, UK, 2017.
- [95] N. M. Murad, "Computational Fluid Dynamics (CFD) of Vehicle Aerodynamics and Associated Acoustics," PhD diss., Swinburne University of Technology, Melbourne, Australia, 2009.
- [96] D. E. Aljure Osorio, "Aerodynamic Analysis of Complex Geometries Using CFD," PhD diss., Universitat Politècnica de Catalunya, Terrassa, Spain, 2017.
- [97] D. E. Manosalvas-Kjono, "Aerodynamic Design of Active Flow Control Systems Aimed Towards Drag Reduction in Heavy Vehicles," PhD diss., Stanford University, Stanford, CA, 2018.
- [98] J. Törnell, "Aerodynamics of vehicle platooning," Doctoral dissertation, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2023.
- [99] A.J. Fuller, "The aerodynamics of Formula One car cooling ducts," Doctoral dissertation, University of Cambridge, 2004.
- [100] I. Bayraktar, "External Aerodynamics of Heavy Ground Vehicles: Computations and Wind Tunnel Testing," Doctor of Philosophy (PhD), Dissertation, Mechanical & Aerospace Engineering, Old Dominion University, 2002.
- [101] J. Marklund, "Under-body and Diffuser Flows of Passenger Vehicles," PhD dissertation, Chalmers University of Technology, 2013.
- [102] J. Osth, "Unsteady Numerical Simulations and Reduced-Order Modelling of Flows around Vehicles," Doctoral dissertation, Department of Applied Mechanics, Division of Fluid Dynamics, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2014.
- [103] H. Martini, "Perspectives of Aerodynamic Drag and Cooling Airflow for Heavy-Duty Trucks - Reconsidering European Total-Length Legislation," Doctoral dissertation, Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2016.
- [104] G. Minelli, "Active Flow Control for Reducing Drag on Trucks: from Concept to Full Scale Testing," Doctoral dissertation, Department of Mechanics and Maritime Sciences, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2017.
- [105] T. Hobeika, "Wheel Modelling and Cooling Flow Effects on Car Aerodynamics," Doctoral dissertation, Department of Mechanics and Maritime Sciences, Division

of Vehicle Engineering and Autonomous Systems, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2018.

- [106] M. Urquhart, "Vehicle wakes in side wind," Doctoral dissertation, Department of Mechanics and Maritime Sciences, Division of Vehicle Engineering and Autonomous Systems, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2021.
- [107] J. D. Wojciak, "Quantitative Analysis of Vehicle Aerodynamics during Crosswind Gusts," Doctoral dissertation, Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungsmechanik, Technische Universität München, Munich, Germany, 2012.
- [108] R. Futrzynski, "Effect of drag reducing plasma actuators using LES," Doctoral dissertation, Department of Engineering Mechanics, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2017.
- [109] S. Krajnovic, "Large-Eddy Simulations for Computing the Flow Around Vehicles," Doctoral dissertation, Department of Thermo and Fluid Dynamics, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2002.
- [110] O. Delgado, F. Rodriguez, and N. Zacharof, "Comparison of Aerodynamic Drag Determination Procedures for HDV CO₂ Certification," International Council on Clean Transportation (ICCT), 2019. [Online]. Dostępne pod: https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_aero_drag_briefing_2019_0814.pdf. [Dostęp dnia: 1 sierpnia 2023 r.].
- [111] Environmental Protection Agency (EPA) and National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), Department of Transportation (DOT), "Final Rule for Phase 2 Greenhouse Gas Emissions Standards and Fuel Efficiency Standards for Medium- and Heavy-Duty Engines and Vehicles," 2016.
- [112] Environmental Protection Agency, "Improvements for Heavy-Duty Engine and Vehicle Test Procedures, and other Technical Amendments," EPA-HQ-OAR-2019-0307-0099, 2021. Dostępne: <https://www.regulations.gov/document/EPA-HQ-OAR-2019-0307-0099>. [Dostęp dnia: 14 sierpnia 2023 r.].
- [113] Environmental Protection Agency, "Improvements for Heavy-Duty Engine and Vehicle Test Procedures," EPA-HQ-OAR-2019-0307-0107, 2022. Dostępne: <https://www.regulations.gov/document/EPA-HQ-OAR-2019-0307-0107>. [Dostęp dnia: 14 sierpnia 2023 r.].
- [114] U.S. Government Publishing Office, "40 CFR § 1037.532 - Using computational fluid dynamics to calculate drag area (CdA)," 2018. Dostępne: <https://www.govinfo.gov/app/details/CFR-2018-title40-vol36/CFR-2018-title40-vol36-sec1037-532>. [Dostęp dnia: 14 sierpnia 2023 r.].

- [115] Minister of Justice, "Heavy-duty Vehicle and Engine Greenhouse Gas Emission Regulations, SOR/2013-24," Dostępne: <http://laws-lois.justice.gc.ca>. [Dostęp dnia: 15 sierpnia 2023 r.].
- [116] Komisja Europejska, "ROZPORZĄDZENIE KOMISJI (UE) 2017/2400 w sprawie wykonania rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 595/2009 w odniesieniu do określania emisji CO₂ i zużycia paliwa przez pojazdy ciężkie i zmieniające dyrektywę Parlamentu Europejskiego i Rady 2007/46/WE oraz rozporządzenie Komisji (UE) nr 582/2011," 12 grudnia 2017.
- [117] M. Soler, "Bodies and trailers – development of CO₂ emissions determination procedure Procedure no: CLIMA/C.4/SER/OC/2018/0005 Task 4: Feasibility analysis including simulations and/or measurements," 2019.
- [118] X. Urgell, "Bodies and trailers – development of CO₂ emissions determination procedure Procedure no: CLIMA/C.4/SER/OC/2018/0005 Task 3: Detailed assessment and implementation plans for the most suitable and feasible methodology options," 2019.
- [119] Komisja Europejska, "Rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) 2022/1362 w sprawie wykonania rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 595/2009 w odniesieniu do parametrów przyczep do pojazdów ciężarowych," 2022. Dostępne: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX%3A32022R1362>. [Dostęp dnia: 19 sierpnia 2023 r.].
- [120] A. Gascón Vallbona, "Support for aerodynamic modelling of heavy-duty trailers," Procedure no: 090203/2022/882079/SER/CLIMA B3, "Determination of standard values for the DA-vol semitrailers and the DB, DB-vol, DC and DC-vol trailers," 2023.
- [121] X. He and L.-S. Luo, "Theory of the lattice Boltzmann method: From the Boltzmann equation to the lattice Boltzmann equation," PHYSICAL REVIEW E, vol. 56, pp. 6811-6817, 1997, doi: 10.1103/PhysRevE.56.6811.
- [122] H. Kudela, "Matematyczne wprowadzenie do mechaniki płynów," Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2020.
- [123] R. Gryboś, "Podstawy Mechaniki Płynów," Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1998.
- [124] J. Tu, G.H. Yeoh, and C. Liu, "Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach," Butterworth-Heinemann, London, 2008.

- [125] H.K. Versteeg and W. Malalasekera, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method," Pearson Education Limited, 2007.
- [126] J.H. Ferziger and M. Perić, "Computational Methods for Fluid Dynamics," Springer, 2002.
- [127] P.J. Roache, "Verification and Validation in Computational Science and Engineering," Hermosa Publishers, 1998.
- [128] A.G. Prinn, "A Review of Finite Element Methods for Room Acoustics," *Acoustics*, vol. 5, no. 2, pp. 367-395, 2023, <https://doi.org/10.3390/acoustics5020022>.
- [129] W. Graebel, "Engineering Fluid Mechanics," 1st ed., CRC Press, 2001.
- [130] D.F. Young, B.R. Munson, T.H. Okiishi, W.W. Huebsch, "A Brief Introduction to Fluid Mechanics," John Wiley & Sons, 2010.
- [131] G. Stokes, "On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums," *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 1851.
- [132] J. Tu, G.H. Yeoh, and C. Liu, "Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach," 3rd ed., Elsevier, 2018.
- [133] J.C. Tannehill, D.A. Anderson, and R.H. Pletcher, "Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer," 2nd ed., Taylor & Francis, 1997.
- [134] C.R. Maliska, "Fundamentals of Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method," Springer, 2023.
- [135] J. Anderson, "Computational Fluid Dynamics: The Basics With Applications," 1st ed., New York: McGraw-Hill, 1995, Print.
- [136] T. Cebeci, J.R. Shao, F. Kafyeke, E. Laurendeau, "Computational Fluid Dynamics for Engineers," Springer, Berlin Heidelberg, 2007.
- [137] F.M. White and H. Xue, "Fluid Mechanics," 9th ed., New York: McGraw Hill LLC, 2021
- [138] NASA, "Navier-Stokes Equations." [Online]. Dostępne pod: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/nseqs.html>. [Dostęp dnia: wpisz datę dostępu].
- [139] P.G. Tucker, "Advanced Computational Fluid and Aerodynamics," part of Cambridge Aerospace Series, Cambridge University Press, 2016.
- [140] T. Kajishima and K. Taira, "Computational Fluid Dynamics: Incompressible Turbulent Flows," Springer Cham, 2017, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-45304-0>.

- [141] D.C. Wilcox, "Formulation of the k- ω Turbulence Model Revisited," *AIAA Journal*, vol. 46, no. 11, pp. 2823–2838, 2008.
- [142] R.B. Bird, W.E. Stewart, and E.N. Lightfoot, "Transport Phenomena," 2nd ed., John Wiley & Sons, 2001
- [143] Bogusławski A., Drobniak S., Tylińczak A.: "Turbulencja – od losowości do determinizmu." Instytut Maszyn Ciepłych, Politechnika Częstochowska, 2008.
- [144] Peter Davidson, "Turbulence: An Introduction for Scientists and Engineers," 2nd ed., Oxford University Press, 2015.
- [145] Götten, Falk; Finger, D.; Marino, Matthew; Bil, Cees; Havermann, Marc; Braun, Carsten.
"A review of guidelines and best practices for subsonic aerodynamic simulations using RANS CFD," 2019.
- [146] F. R. Menter, "Zonal Two Equation k- ω Turbulence Models for Aerodynamic Flows," American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Reston, 1993.
- [147] F.R. Menter, "Eddy Viscosity Transport Equations and Their Relation to the k- ϵ Model," *ASME Journal of Fluids Engineering*, 1997.
- [148] J. Lee, H. Choi, "Large Eddy Simulation of Flow Over a Three-Dimensional Model Vehicle," *Proceedings of the 6th International Symposium on Turbulence, Shear Flow Phenomena*, Vol. 1, edited by N. Kasagi, J.K. Eaton, R. Friedrich, J.A.C. Humphrey, A.V. Johansson, H.J. Sung, pp. 735–739, 2009.
- [149] S. Ferrari, R. Rossi, A. Di Bernardino, "A Review of Laboratory and Numerical Techniques to Simulate Turbulent Flows," *Energies*, vol. 15, no. 20, 7580, 2022, <https://doi.org/10.3390/en15207580>.
- [150] D. Wilcox, "Turbulence Modeling for CFD," La Cañada, Calif: DCW Industries, 1998.
- [151] K.D. Squires, "Detached-Eddy Simulation: Current Status and Perspectives," w: R. Friedrich, B.J. Geurts, O. Métais (eds), "Direct and Large-Eddy Simulation V," ERCOFTAC Series, vol. 9, Springer, Dordrecht, 2004. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2313-2_49
- [152] C., H., Moeng., Peter, P., Sullivan. (2015). "NUMERICAL MODELS | Large-Eddy Simulation." doi: 10.1016/B978-0-12-382225-3.00201-2
- [153] S. Ghosal and P. Moin, "The basic equations for the large eddy simulation of turbulent flows in complex geometry," *Journal of Computational Physics*, vol. 118, no. 1, pp. 24-37, 1995.

- [154] D.C. Montgomery, "Design and Analysis of Experiments," 9th ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2017.
- [155] S. Bhattacharya, "Central Composite Design for Response Surface Methodology and Its Application in Pharmacy," 2021, doi: 10.5772/intechopen.95835.
- [156] ANSYS, Inc., "DesignXplorer User's Guide," Release 2021 R2, 2021.
- [157] Deb, K., "Multi-objective Optimization using Evolutionary Algorithms," John Wiley & Sons, 2001.
- [158] Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M., "Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments," 4th ed., Wiley, Hoboken, New Jersey, 2016.
- [159] Coello, C., Veldhuizen, D., & Lamont, G., "Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems," 2nd ed., Springer, 2007, doi: 10.1007/978-0-387-36797-2.
- [160] Ansys, Inc., "ANSYS Fluent Mosaic Technology Automatically Combines Disparate Meshes with Polyhedral Elements for Fast, Accurate Flow Resolution," Ansys White Paper, 2020. [Online]. Available: <https://www.ansys.com/content/dam/resource-center/white-paper/ansys-fluent-mosaic-technology-wp.pdf>

Załącznik A

Zestawienie wyników symulacji dla wariantu $h_{SP} = 2245$ mm.

Tab. A.1. Punkty DOE dla wariantu $h_{SP} = 2245$ mm.

<i>Lp.</i>	v_s [m/s]	w_s [mm]	m'_s [kg/s]	F_{PS} [N]	T'_s [N]	F_{PS}/T'_s [-]	P'_s [W]
1	18,70	224,45	21,59	416,23	403,82	1,03	3775,72
2	3,40	224,45	3,93	13,76	13,35	1,03	22,69
3	34,00	224,45	39,26	1375,29	1334,94	1,03	22694,04
4	18,70	74,80	7,20	130,32	134,58	0,97	1258,29
5	18,70	374,10	35,99	827,39	673,06	1,23	6293,15
6	3,40	74,80	1,31	4,24	4,45	0,95	7,56
7	34,00	74,80	13,08	432,68	444,88	0,97	7562,99
8	3,40	374,10	6,54	27,43	22,25	1,23	37,83
9	34,00	374,10	65,44	2731,97	2225,00	1,23	37825,08

Tab. A.2. Punkty weryfikacyjne dla wariantu $h_{SP} = 2245$ mm.

<i>Lp.</i>	v_s [m/s]	w_s [mm]	m'_s [kg/s]	F_{PS} [N]	T'_s [N]	F_{PS}/T'_s [-]	P'_s [W]
1	22,63	373,43	43,48	1208,18	984,16	1,23	11137,07
2	26,21	335,75	45,27	1381,00	1186,32	1,16	15544,26
3	14,99	300,28	23,16	387,00	347,25	1,11	2603,05
4	7,23	299,01	11,13	89,67	80,47	1,11	290,99
5	22,53	299,14	34,68	868,98	781,52	1,11	8805,34
6	29,65	297,57	45,40	1493,35	1346,36	1,11	19962,85
7	33,19	250,46	42,77	1496,57	1419,67	1,05	23560,56
8	7,05	225,77	8,19	59,62	57,73	1,03	203,49
9	14,85	225,57	17,23	263,98	255,79	1,03	1898,71
10	22,63	223,85	26,06	607,31	589,60	1,03	6670,27
11	9,06	206,31	9,62	88,67	87,23	1,02	395,35
12	18,54	188,24	17,95	334,59	332,80	1,01	3084,62
13	26,42	185,48	25,21	668,74	666,07	1,00	8798,45
14	30,30	151,45	23,61	709,13	715,54	0,99	10841,70
15	22,44	149,58	17,27	383,58	387,53	0,99	4348,06
16	26,49	112,69	15,36	399,46	406,96	0,98	5390,89
17	19,08	116,35	11,42	213,89	218,04	0,98	2080,60
18	12,49	120,58	7,75	94,85	96,78	0,98	604,37
19	9,42	119,74	5,80	53,49	54,68	0,98	257,55
20	22,35	75,02	8,63	187,11	192,87	0,97	2155,72

Tab. A.3. Punkty doskonalenia powierzchni odpowiedzi dla wariantu $h_{SP} = 2245$ mm.

$Lp.$	v_s [m/s]	w_s [mm]	m'_s [kg/s]	F_{PS} [N]	T'_s [N]	F_{PS}/T'_s [-]	P'_s [W]
1	7,22	374,10	13,91	123,73	100,47	1,23	362,95
2	11,05	374,10	21,27	289,20	235,01	1,23	1298,41
3	14,87	374,10	28,63	523,77	425,88	1,23	3167,46
4	22,53	374,10	43,36	1200,08	976,59	1,23	10999,04
5	26,35	374,10	50,72	1641,77	1336,43	1,23	17607,78
6	30,18	374,10	58,08	2152,47	1752,63	1,23	26443,58
7	32,09	374,10	61,76	2433,63	1981,79	1,23	31795,77
8	5,31	355,39	9,71	61,89	51,61	1,20	137,08
9	9,14	355,39	16,71	182,95	152,66	1,20	697,47
10	12,96	355,40	23,70	367,93	307,23	1,20	1991,24
11	16,79	355,39	30,70	616,77	515,31	1,20	4325,39
12	20,61	355,40	37,69	929,47	776,90	1,20	8007,01
13	24,44	355,39	44,68	1305,98	1092,00	1,20	13343,01
14	28,30	353,21	51,43	1734,82	1455,42	1,19	20594,14
15	31,40	350,46	56,62	2110,29	1777,65	1,19	27907,75
16	34,00	343,08	60,02	2397,57	2040,53	1,17	34688,98
17	3,40	336,69	5,89	23,43	20,02	1,17	34,04
18	7,22	336,69	12,52	105,68	90,42	1,17	326,64
19	11,05	336,69	19,14	247,00	211,51	1,17	1168,60
20	14,87	336,69	25,77	447,30	383,29	1,17	2850,67
21	18,70	336,69	32,39	706,58	605,76	1,17	5663,86
22	22,53	336,69	39,02	1024,79	878,92	1,17	9898,86
23	26,16	334,88	45,08	1371,24	1179,33	1,16	15427,26
24	29,76	329,36	50,43	1732,06	1500,90	1,15	22334,20
25	32,17	327,57	54,22	2008,13	1744,55	1,15	28063,84
26	5,31	317,98	8,69	52,68	46,17	1,14	122,64
27	9,14	317,98	14,95	155,75	136,60	1,14	624,07
28	12,96	317,98	21,21	313,20	274,90	1,14	1781,68
29	16,79	317,98	27,46	525,01	461,07	1,14	3870,11
30	20,61	317,98	33,72	791,15	695,11	1,14	7163,99
31	24,44	316,16	39,75	1102,63	971,42	1,14	11869,60
32	34,00	312,07	54,59	2094,69	1856,05	1,13	31552,88
33	3,40	299,27	5,24	19,86	17,80	1,12	30,26
34	7,22	299,27	11,12	89,60	80,38	1,11	290,36
35	11,05	299,28	17,01	209,40	188,01	1,11	1038,76
36	14,87	299,28	22,90	379,22	340,70	1,11	2533,95
37	18,70	299,28	28,79	599,03	538,44	1,11	5034,44
38	30,98	299,96	47,81	1647,88	1481,43	1,11	22949,19
39	22,53	299,27	34,68	868,81	781,24	1,11	8798,79
40	26,35	299,28	40,57	1188,54	1069,10	1,11	14085,47
41	28,62	284,18	41,85	1308,18	1197,63	1,09	17137,93
42	9,14	280,57	13,19	131,42	120,53	1,09	550,71
43	16,79	280,57	24,23	443,06	406,82	1,09	3414,70
44	20,61	280,57	29,75	667,65	613,32	1,09	6321,08
45	34,00	279,18	48,84	1802,97	1660,46	1,09	28227,83

46	24,76	277,37	35,34	949,05	875,19	1,08	10836,74
47	30,83	268,26	42,55	1408,02	1311,77	1,07	20220,30
48	3,40	261,86	4,58	16,65	15,57	1,07	26,48
49	7,22	261,86	9,73	75,17	70,33	1,07	254,05
50	11,11	262,42	15,00	178,01	166,56	1,07	924,97
51	14,87	261,86	20,04	318,26	298,11	1,07	2217,17
52	18,70	261,86	25,19	502,79	471,13	1,07	4405,08
53	22,53	261,86	30,35	729,27	683,58	1,07	7698,82
54	27,00	261,86	36,38	1047,79	982,44	1,07	13264,77
55	33,20	251,82	43,02	1507,72	1428,34	1,06	23712,92
56	5,31	243,16	6,65	37,04	35,31	1,05	93,79
57	16,79	243,16	21,00	369,48	352,57	1,05	2959,42
58	20,61	243,16	25,79	556,87	531,53	1,05	5478,12
59	24,44	243,17	30,57	782,66	747,21	1,05	9130,42
60	30,18	230,84	35,84	1120,25	1081,43	1,04	16316,15
61	7,23	224,45	8,34	62,18	60,28	1,03	217,77
62	11,05	224,45	12,76	145,41	141,01	1,03	779,06
63	14,88	224,45	17,18	263,42	255,52	1,03	1900,42
64	22,52	224,45	26,01	603,83	585,91	1,03	6598,82
65	26,35	224,45	30,43	826,22	801,81	1,03	10563,86
66	31,76	208,94	34,14	1104,54	1084,40	1,02	17220,74
67	9,14	205,75	9,67	89,82	88,39	1,02	403,82
68	12,96	205,75	13,72	180,74	177,87	1,02	1152,80
69	16,79	205,74	17,77	303,13	298,32	1,02	2504,04
70	20,61	205,74	21,82	457,00	449,75	1,02	4635,30
71	24,44	205,74	25,87	642,35	632,17	1,02	7724,33
72	28,26	205,77	29,92	859,38	845,76	1,02	11952,49
73	34,00	187,04	32,72	1118,11	1112,44	1,01	18911,45
74	30,18	187,04	29,04	880,64	876,22	1,01	13220,05
75	26,35	187,04	25,36	671,47	668,16	1,00	8803,04
76	22,53	187,04	21,68	490,63	488,26	1,00	5499,04
77	18,70	187,04	18,00	338,10	336,51	1,00	3146,44
78	14,88	187,04	14,31	213,89	212,93	1,00	1583,67
79	11,05	187,04	10,63	118,01	117,50	1,00	649,21
80	7,22	187,04	6,95	50,43	50,23	1,00	181,47
81	3,40	187,04	3,27	11,14	11,12	1,00	18,91
82	32,09	168,33	27,79	888,67	891,72	1,00	14306,53
83	28,26	168,33	24,48	689,29	691,80	1,00	9776,09
84	24,44	168,33	21,16	515,23	517,22	1,00	6319,81
85	20,61	168,33	17,85	366,46	367,98	1,00	3792,53
86	16,78	168,28	14,53	242,78	243,87	1,00	2046,40
87	9,10	167,96	7,86	71,13	71,55	0,99	325,50
88	5,32	168,28	4,60	24,31	24,48	0,99	65,10
89	34,00	149,63	26,17	881,85	889,93	0,99	15128,87
90	30,18	149,63	23,23	694,37	700,96	0,99	10575,77
91	26,35	149,63	20,29	529,32	534,52	0,99	7042,47
92	22,53	149,62	17,34	386,63	390,60	0,99	4399,16
93	18,70	149,62	14,40	266,33	269,20	0,99	2517,06

94	14,88	149,33	11,43	168,05	170,00	0,99	1264,40
95	11,05	149,63	8,51	92,85	94,00	0,99	519,33
96	32,09	130,92	21,61	684,00	693,54	0,99	11127,02
97	7,22	148,88	5,53	39,43	39,98	0,99	144,44
98	28,26	130,91	19,04	530,38	538,01	0,99	7602,73
99	24,44	130,91	16,46	396,35	402,26	0,99	4915,33
100	3,40	149,63	2,62	8,75	8,90	0,98	15,13
101	34,00	112,21	19,63	655,74	667,40	0,98	11345,78
102	30,18	112,21	17,42	516,23	525,68	0,98	7931,26
103	26,09	109,66	14,72	376,68	384,03	0,98	5009,57
104	19,03	115,44	11,30	210,97	215,10	0,98	2046,66
105	22,53	112,21	13,00	287,27	292,92	0,98	3299,07
106	12,45	121,26	7,77	94,80	96,72	0,98	602,09
107	9,34	124,05	5,96	54,54	55,67	0,98	259,98
108	15,54	112,21	8,97	136,41	139,34	0,98	1082,34
109	32,09	95,68	15,80	496,02	506,83	0,98	8131,32
110	28,25	93,68	13,61	375,78	384,51	0,98	5430,24
111	4,50	127,55	2,95	12,98	13,28	0,98	29,89
112	24,18	93,51	11,63	274,58	281,20	0,98	3399,32
113	20,61	93,51	9,92	199,42	204,40	0,98	2106,62
114	13,47	97,74	6,77	88,84	91,18	0,97	613,91
115	6,46	112,21	3,73	23,47	24,09	0,97	77,81
116	16,58	89,14	7,60	122,63	126,03	0,97	1044,66
117	30,18	74,80	11,61	340,52	350,42	0,97	5286,90
118	10,96	93,34	5,26	56,05	57,70	0,97	316,23
119	8,48	97,45	4,25	34,99	36,03	0,97	152,71
120	26,35	74,80	10,14	259,42	267,21	0,97	3520,49
121	22,53	74,80	8,67	189,36	195,26	0,97	2199,14
122	3,40	105,48	1,85	6,07	6,27	0,97	10,66
123	14,46	74,80	5,56	77,71	80,42	0,97	581,21
124	7,48	74,80	2,88	20,71	21,56	0,96	80,66
125	5,44	74,80	2,09	10,91	11,40	0,96	31,01

Załącznik B

Zestawienie wyników symulacji dla wariantu $h_{SP}= 1122,5$ mm.

Tab. B.1. Punkty DOE dla wariantu $h_{SP}= 1122,5$ mm.

<i>Lp.</i>	v_s [m/s]	w_s [mm]	m'_s [kg/s]	F_{PS} [N]	T'_s [N]	F_{PS}/T'_s [-]	P'_s [W]
1	18,70	112,25	10,80	208,12	201,96	1,03	1888,28
2	3,40	112,25	1,96	6,89	6,68	1,03	11,35
3	34,00	112,25	19,64	687,70	667,62	1,03	11349,55
4	18,70	37,40	3,60	65,07	67,29	0,97	629,15
5	18,70	187,10	18,00	413,77	336,62	1,23	3147,41
6	3,40	37,40	0,65	2,11	2,22	0,95	3,78
7	34,00	37,40	6,54	216,13	222,44	0,97	3781,50
8	3,40	187,10	3,27	13,74	11,13	1,23	18,92
9	34,00	187,10	32,73	1366,29	1112,80	1,23	18917,59

Tab. B.2. Punkty weryfikacyjne dla wariantu $h_{SP}= 1122,5$ mm.

<i>Lp.</i>	v_s [m/s]	w_s [mm]	m'_s [kg/s]	F_{PS} [N]	T'_s [N]	F_{PS}/T'_s [-]	P'_s [W]
1	22,63	186,76	21,75	604,20	492,21	1,23	5570,02
2	5,31	178,02	4,87	31,03	25,85	1,20	68,65
3	16,78	177,96	15,37	308,87	257,89	1,20	2164,07
4	26,27	167,89	22,69	693,82	595,97	1,16	7827,11
5	14,99	150,18	11,58	193,59	173,67	1,11	1301,85
6	22,53	149,61	17,35	434,70	390,86	1,11	4403,77
7	20,65	140,32	14,90	335,05	307,72	1,09	3176,58
8	11,04	130,71	7,43	87,53	82,01	1,07	452,81
9	24,43	121,69	15,29	391,41	373,55	1,05	4562,30
10	14,85	112,81	8,62	131,99	127,92	1,03	949,57
11	30,14	112,57	17,46	542,42	526,26	1,03	7931,80
12	13,01	103,27	6,91	91,38	89,92	1,02	584,89
13	32,00	103,05	16,97	551,72	543,06	1,02	8690,05
14	20,57	102,80	10,88	227,18	223,69	1,02	2300,12
15	18,54	94,14	8,98	167,19	166,43	1,00	1542,62
16	26,42	92,76	12,61	334,23	333,10	1,00	4400,10
17	31,51	80,99	13,13	411,06	413,76	0,99	6519,12
18	23,88	81,38	10,00	237,06	238,70	0,99	2849,65
19	21,11	81,33	8,83	185,20	186,54	0,99	1969,36
20	14,68	38,29	2,89	40,97	42,43	0,97	311,38

Tab. B.3. Punkty doskonalenia powierzchni odpowiedzi dla wariantu $h_{SP}=1122,5$ mm.

$Lp.$	v_s [m/s]	w_s [mm]	m'_s [kg/s]	F_{PS} [N]	T'_s [N]	F_{PS}/T'_s [-]	P'_s [W]
1	7,22	187,10	6,95	61,84	50,25	1,23	181,51
2	11,05	187,10	10,64	144,57	117,54	1,23	649,42
3	14,88	187,10	14,32	261,94	213,01	1,23	1584,28
4	22,53	187,10	21,68	600,14	488,42	1,23	5500,81
5	26,35	187,10	25,37	821,03	668,38	1,23	8805,84
6	30,18	187,10	29,05	1076,43	876,52	1,23	13224,61
7	5,31	177,74	4,86	30,96	25,81	1,20	68,55
8	9,14	177,74	8,36	91,45	76,36	1,20	348,85
9	12,96	177,74	11,85	183,99	153,67	1,20	995,97
10	16,79	177,74	15,35	308,49	257,73	1,20	2163,34
11	20,61	177,74	18,85	464,89	388,55	1,20	4004,48
12	24,44	177,74	22,35	653,21	546,13	1,20	6672,99
13	28,26	177,74	25,85	873,46	730,48	1,20	10322,67
14	32,09	177,74	29,34	1125,59	941,59	1,20	15106,74
15	34,00	177,75	31,09	1263,59	1057,16	1,20	17971,73
16	3,40	168,39	2,95	11,74	10,02	1,17	17,03
17	7,23	168,39	6,26	52,83	45,23	1,17	163,38
18	11,05	168,39	9,57	123,50	105,79	1,17	584,50
19	14,88	168,39	12,89	223,75	191,71	1,17	1425,87
20	18,70	168,39	16,20	353,44	302,96	1,17	2832,75
21	22,53	168,39	19,51	512,61	439,57	1,17	4950,71
22	26,35	168,39	22,83	701,25	601,53	1,17	7925,23
23	30,17	168,39	26,14	919,35	788,84	1,17	11901,70
24	34,00	168,39	29,46	1166,88	1001,51	1,17	17025,62
25	5,31	159,03	4,35	26,35	23,09	1,14	61,34
26	12,96	159,03	10,61	156,64	137,48	1,14	891,08
27	16,79	159,03	13,74	262,62	230,60	1,14	1935,60
28	20,61	159,03	16,87	395,76	347,64	1,14	3582,94
29	24,44	159,03	20,00	556,06	488,63	1,14	5970,51
30	28,26	159,03	23,12	743,51	653,57	1,14	9235,78
31	32,09	159,03	26,25	958,11	842,45	1,14	13516,01
32	3,40	149,68	2,62	9,95	8,90	1,12	15,13
33	7,23	149,68	5,56	44,78	40,20	1,11	145,22
34	11,05	149,67	8,51	104,70	94,03	1,11	519,50
35	14,87	149,68	11,45	189,69	170,39	1,11	1267,29
36	18,70	149,68	14,40	299,66	269,29	1,11	2517,88
37	22,53	149,68	17,35	434,62	390,72	1,11	4400,51
38	26,35	149,68	20,29	594,57	534,68	1,11	7044,45
39	30,18	149,68	23,24	779,50	701,19	1,11	10579,15
40	34,00	149,68	26,18	989,39	890,21	1,11	15133,65
41	5,31	140,32	3,84	22,23	20,37	1,09	54,12
42	12,96	140,32	9,36	132,18	121,30	1,09	786,21
43	9,14	140,32	6,60	65,68	60,28	1,09	275,38
44	16,79	140,32	12,12	221,61	203,46	1,09	1707,78
45	20,61	140,32	14,88	333,97	306,73	1,09	3161,20

46	24,44	140,32	17,64	469,29	431,14	1,09	5267,98
47	32,09	140,32	23,17	808,68	743,32	1,09	11925,75
48	3,40	130,96	2,29	8,34	7,79	1,07	13,24
49	11,05	130,96	7,45	87,85	82,27	1,07	454,56
50	7,23	130,96	4,87	37,56	35,17	1,07	127,06
51	14,88	130,96	10,02	159,19	149,09	1,07	1108,86
52	18,70	130,96	12,60	251,49	235,62	1,07	2203,09
53	22,53	130,96	15,18	364,79	341,87	1,07	3850,34
54	26,35	130,96	17,75	499,08	467,85	1,07	6163,94
55	30,18	130,96	20,33	654,35	613,53	1,07	9256,68
56	34,00	130,96	22,91	830,57	778,91	1,07	13241,55
57	5,31	121,61	3,32	18,52	17,66	1,05	46,90
58	12,96	121,61	8,11	110,21	105,12	1,05	681,30
59	16,79	121,61	10,50	184,80	176,32	1,05	1480,01
60	20,61	121,61	12,90	278,55	265,83	1,05	2739,74
61	24,44	121,61	15,29	391,45	373,65	1,05	4565,58
62	28,26	121,61	17,68	523,48	499,77	1,05	7062,48
63	32,09	120,90	19,96	669,79	640,50	1,05	10276,68
64	14,87	112,25	8,59	131,70	127,78	1,03	950,37
65	11,05	112,25	6,38	72,67	70,51	1,03	389,59
66	22,53	112,25	13,01	301,93	293,03	1,03	3300,23
67	26,35	112,25	15,22	413,14	401,00	1,03	5283,26
68	30,18	112,26	17,43	541,83	525,96	1,03	7935,82
69	7,22	112,25	4,17	31,05	30,15	1,03	108,90
70	28,26	102,90	14,96	429,54	422,88	1,02	5975,95
71	32,09	102,89	16,99	553,64	545,06	1,02	8744,88
72	24,44	102,89	12,94	321,12	316,15	1,02	3862,93
73	12,96	102,89	6,86	90,35	88,95	1,02	576,50
74	9,14	102,89	4,84	44,87	44,20	1,02	201,93
75	16,88	102,45	8,90	152,43	150,17	1,02	1267,33
76	20,07	100,26	10,36	210,39	207,88	1,01	2086,55
77	5,07	100,63	2,62	13,45	13,30	1,01	33,69
78	34,00	93,54	16,36	558,86	556,32	1,00	9457,41
79	30,18	93,54	14,52	440,15	438,20	1,00	6611,31
80	26,35	93,54	12,68	335,60	334,15	1,00	4402,40
81	22,53	93,54	10,84	245,20	244,18	1,00	2750,03
82	14,87	93,54	7,16	106,89	106,48	1,00	791,96
83	11,05	93,54	5,32	58,95	58,76	1,00	324,65
84	3,40	93,54	1,64	5,57	5,56	1,00	9,46
85	7,22	93,54	3,48	25,17	25,12	1,00	90,75
86	18,09	90,54	8,43	152,52	152,41	1,00	1378,40
87	28,70	82,04	12,11	345,61	347,68	0,99	4989,08
88	24,01	82,09	10,14	241,92	243,45	0,99	2922,51
89	31,47	81,15	13,14	410,80	413,44	0,99	6505,16
90	21,25	81,09	8,86	186,92	188,30	0,99	2000,23
91	5,31	84,18	2,30	12,11	12,22	0,99	32,47
92	34,00	74,82	13,09	440,56	445,02	0,99	7565,37
93	26,35	74,82	10,14	264,42	267,29	0,99	3521,56

94	18,70	74,82	7,20	133,03	134,62	0,99	1258,67
95	14,87	74,82	5,73	84,11	85,18	0,99	633,51
96	30,17	68,76	10,68	317,82	322,13	0,99	4860,17
97	11,05	74,82	4,25	46,36	47,01	0,99	259,70
98	22,52	68,63	7,95	176,54	179,16	0,99	2017,76
99	32,51	65,47	10,95	350,70	355,91	0,99	5784,70
100	7,22	74,82	2,78	19,78	20,10	0,98	72,59
101	20,22	65,97	6,86	136,54	138,80	0,98	1403,45
102	16,93	64,78	5,64	93,84	95,51	0,98	808,44
103	28,92	58,93	8,77	249,02	253,55	0,98	3666,21
104	3,40	74,83	1,31	4,37	4,45	0,98	7,57
105	34,00	56,11	9,82	327,61	333,73	0,98	5673,37
106	12,96	65,47	4,37	55,55	56,60	0,98	366,81
107	24,11	58,78	7,29	172,54	175,83	0,98	2119,88
108	26,62	56,11	7,68	200,58	204,56	0,98	2722,58
109	9,14	65,47	3,08	27,54	28,12	0,98	128,49
110	18,98	56,11	5,48	101,82	104,03	0,98	987,40
111	30,17	49,09	7,62	224,94	229,98	0,98	3469,88
112	14,88	56,11	4,29	62,43	63,88	0,98	475,08
113	32,67	46,76	7,86	250,87	256,76	0,98	4194,20
114	27,97	47,44	6,83	186,50	190,94	0,98	2670,28
115	24,93	47,63	6,11	148,76	152,31	0,98	1898,59
116	22,53	48,92	5,67	124,69	127,72	0,98	1438,45
117	5,31	65,47	1,79	9,28	9,51	0,98	25,25
118	11,05	56,11	3,19	34,38	35,25	0,98	194,75
119	16,79	46,75	4,04	65,95	67,79	0,97	569,03
120	7,22	56,11	2,09	14,65	15,07	0,97	54,44
121	31,34	37,40	6,03	183,53	189,00	0,97	2961,75
122	12,96	46,76	3,12	39,24	40,42	0,97	261,96
123	28,85	37,40	5,55	155,38	160,11	0,97	2309,18
124	26,35	37,40	5,07	129,57	133,61	0,97	1760,27
125	23,71	37,40	4,56	104,83	108,19	0,97	1282,66
126	21,21	37,40	4,08	83,76	86,53	0,97	917,47
127	9,14	46,76	2,20	19,43	20,08	0,97	91,76
128	3,40	56,11	0,98	3,23	3,34	0,97	5,67
129	14,88	37,40	2,86	41,08	42,58	0,96	316,66
130	5,79	46,76	1,39	7,77	8,07	0,96	23,36
131	11,05	37,40	2,13	22,60	23,50	0,96	129,81
132	3,40	46,76	0,82	2,66	2,78	0,96	4,73
133	7,23	37,40	1,39	9,61	10,04	0,96	36,29
134	5,31	37,40	1,02	5,18	5,43	0,95	14,43

Załącznik C

Zestawienie wyników symulacji dla wariantu $h_{SP} = 561,3$ mm.

Tab. C.1. Punkty DOE dla wariantu $h_{SP} = 561,3$ mm.

<i>Lp.</i>	v_s [m/s]	w_s [mm]	m'_s [kg/s]	F_{PS} [N]	T'_s [N]	F_{PS}/T'_s [-]	P'_s [W]
1	18,70	56,10	5,40	104,08	100,93	1,03	943,72
2	3,40	56,10	0,98	3,44	3,34	1,03	5,67
3	34,00	56,10	9,81	344,03	333,66	1,03	5672,24
4	18,70	18,70	1,80	32,30	33,64	0,96	314,57
5	18,70	93,50	9,00	207,15	168,22	1,23	1572,87
6	3,40	18,70	0,33	1,02	1,11	0,91	1,89
7	34,00	18,70	3,27	107,53	111,22	0,97	1890,75
8	3,40	93,50	1,64	6,96	5,56	1,25	9,45
9	34,00	93,50	16,36	684,36	556,10	1,23	9453,74

Tab. C.2. Punkty weryfikacyjne dla wariantu $h_{SP} = 561,3$ mm.

<i>Lp.</i>	v_s [m/s]	w_s [mm]	m'_s [kg/s]	F_{PS} [N]	T'_s [N]	F_{PS}/T'_s [-]	P'_s [W]
1	20,99	88,43	9,55	239,82	200,50	239,82	2104,59
2	26,33	84,69	11,47	353,88	302,04	353,88	3976,10
3	7,23	74,73	2,78	22,49	20,11	22,49	72,73
4	14,99	75,05	5,79	96,87	86,79	96,87	650,60
5	22,29	73,66	8,45	208,64	188,25	208,64	2097,80
6	26,35	65,38	8,86	249,57	233,63	249,57	3078,53
7	7,05	56,43	2,05	14,92	14,43	14,92	50,86
8	14,85	56,38	4,31	65,99	63,93	65,99	474,57
9	30,14	56,26	8,73	271,35	263,01	271,35	3964,13
10	22,63	55,95	6,51	151,89	147,37	151,89	1667,20
11	9,06	51,57	2,41	22,17	21,80	22,17	98,82
12	18,54	47,05	4,49	83,51	83,18	83,51	771,00
13	26,42	46,36	6,30	167,04	166,48	167,04	2199,17
14	30,30	37,86	5,90	176,85	178,86	176,85	2709,97
15	22,46	36,09	4,17	92,30	93,65	92,30	1051,67
16	14,83	37,33	2,85	41,64	42,25	41,64	313,32
17	7,05	37,37	1,36	9,40	9,56	9,40	33,72
18	16,99	23,91	2,09	34,40	35,52	34,40	301,70
19	20,97	22,38	2,41	49,04	50,65	49,04	531,12
20	23,84	18,73	2,30	52,73	54,75	52,73	652,49

Tab. C.3. Punkty doskonalenia powierzchni odpowiedzi dla wariantu $h_{SP} = 561,3$ mm.

$Lp.$	v_s [m/s]	w_s [mm]	m'_s [kg/s]	F_{PS} [N]	T'_s [N]	F_{PS}/T'_s [-]	P'_s [W]
1	5,31	93,50	2,56	16,82	13,58	1,24	36,06
2	7,22	93,50	3,48	31,03	25,11	1,24	90,71
3	11,05	93,50	5,32	72,43	58,74	1,23	324,52
4	14,87	93,50	7,16	131,13	106,44	1,23	791,65
5	23,29	93,50	11,20	321,21	260,90	1,23	3037,89
6	27,88	93,50	13,41	460,17	373,82	1,23	5210,36
7	30,94	93,50	14,88	566,75	460,45	1,23	7122,77
8	9,14	88,83	4,18	45,86	38,16	1,20	174,32
9	12,96	88,83	5,92	92,14	76,79	1,20	497,67
10	16,79	88,82	7,67	154,46	128,83	1,20	1081,53
11	32,47	88,83	14,84	577,27	481,80	1,20	7821,77
12	21,15	88,39	9,62	243,28	203,43	1,20	2151,29
13	28,57	87,51	12,87	437,35	367,61	1,19	5252,21
14	23,93	87,30	10,75	305,71	257,24	1,19	3077,99
15	3,40	84,15	1,47	5,94	5,00	1,19	8,51
16	7,23	84,15	3,13	26,51	22,60	1,17	81,64
17	26,31	84,64	11,46	353,10	301,47	1,17	3965,99
18	11,05	84,15	4,78	61,87	52,86	1,17	292,07
19	14,87	84,15	6,44	111,99	95,80	1,17	712,48
20	18,72	84,15	8,10	177,23	151,66	1,17	1419,27
21	34,00	84,15	14,72	584,45	500,50	1,17	8508,43
22	30,17	82,66	12,83	448,73	387,22	1,16	5842,20
23	22,53	81,91	9,49	246,87	213,81	1,15	2408,05
24	5,31	79,47	2,17	13,25	11,54	1,15	30,65
25	24,85	79,69	10,19	289,01	253,21	1,14	3146,37
26	16,80	79,49	6,87	131,62	115,37	1,14	968,88
27	32,34	79,48	13,23	487,59	427,77	1,14	6917,97
28	20,61	78,35	8,31	194,22	171,28	1,13	1765,18
29	28,52	77,97	11,44	369,30	326,36	1,13	4654,20
30	3,40	74,80	1,31	5,02	4,45	1,13	7,56
31	7,22	74,80	2,78	22,47	20,09	1,12	72,57
32	11,05	74,80	4,25	52,44	46,99	1,12	259,62
33	14,88	74,80	5,72	94,93	85,15	1,11	633,33
34	18,70	74,80	7,20	149,99	134,58	1,11	1258,31
35	26,35	74,80	10,14	297,73	267,21	1,11	3520,49
36	34,00	74,80	13,08	495,51	444,88	1,11	7563,03
37	30,48	74,05	11,61	392,92	353,97	1,11	5394,46
38	22,07	73,68	8,36	204,58	184,58	1,11	2036,46
39	28,29	70,18	10,21	315,12	288,93	1,09	4086,42
40	16,79	70,13	6,06	110,89	101,68	1,09	853,48
41	24,43	70,13	8,82	234,91	215,44	1,09	2632,10
42	32,09	69,38	11,45	399,28	367,52	1,09	5896,47
43	3,40	65,45	1,14	4,19	3,89	1,08	6,62
44	7,22	65,45	2,43	18,84	17,58	1,07	63,50
45	11,05	65,45	3,72	43,98	41,12	1,07	227,17

46	18,70	65,45	6,30	125,84	117,76	1,07	1101,03
47	14,88	65,45	5,01	79,62	74,51	1,07	554,17
48	26,35	65,45	8,87	249,84	233,81	1,07	3080,42
49	22,53	65,45	7,59	182,56	170,86	1,07	1924,27
50	30,18	65,45	10,16	327,57	306,61	1,07	4626,05
51	34,00	65,45	11,45	415,80	389,27	1,07	6617,64
52	16,79	60,78	5,25	92,43	88,12	1,05	739,67
53	20,61	60,78	6,45	139,33	132,85	1,05	1369,23
54	24,44	60,77	7,64	195,84	186,73	1,05	2281,66
55	28,26	60,77	8,84	261,93	249,77	1,05	3529,51
56	32,09	60,77	10,03	337,56	321,95	1,05	5165,22
57	7,22	56,10	2,09	15,56	15,07	1,03	54,43
58	11,05	56,10	3,19	36,36	35,24	1,03	194,71
59	26,35	56,10	7,61	206,68	200,41	1,03	2640,34
60	14,87	56,10	4,29	65,86	63,87	1,03	475,00
61	22,53	56,10	6,50	151,02	146,45	1,03	1649,35
62	30,18	56,10	8,71	271,00	262,81	1,03	3965,17
63	16,79	51,43	4,44	75,78	74,56	1,02	625,88
64	12,96	51,43	3,43	45,17	44,46	1,02	288,13
65	34,00	46,75	8,18	279,35	278,05	1,00	4726,87
66	30,18	46,75	7,26	220,01	219,01	1,00	3304,30
67	26,35	46,75	6,34	167,75	167,00	1,00	2200,26
68	22,52	46,75	5,42	122,53	122,04	1,00	1374,43
69	18,70	46,75	4,50	84,42	84,11	1,00	786,43
70	14,88	46,75	3,58	53,41	53,22	1,00	395,84
71	11,05	46,75	2,66	29,46	29,37	1,00	162,26
72	7,22	46,75	1,74	12,59	12,55	1,00	45,35
73	32,07	42,04	6,94	221,43	222,50	1,00	3568,11
74	28,28	42,04	6,12	172,08	172,95	0,99	2445,26
75	24,05	41,48	5,13	122,62	123,40	0,99	1483,70
76	16,79	42,08	3,63	60,61	61,01	0,99	512,07
77	20,86	41,48	4,45	92,19	92,83	0,99	968,06
78	3,40	46,75	0,82	2,75	2,78	0,99	4,73
79	34,00	37,40	6,54	219,93	222,44	0,99	3781,49
80	30,17	37,32	5,79	172,80	174,85	0,99	2638,08
81	26,35	37,40	5,07	131,99	133,60	0,99	1760,21
82	18,70	37,40	3,60	66,37	67,29	0,99	629,13
83	22,52	36,21	4,20	93,16	94,51	0,99	1064,47
84	14,87	37,40	2,86	41,96	42,58	0,99	316,66
85	11,05	37,40	2,13	23,13	23,50	0,98	129,81
86	28,25	33,24	4,83	134,18	136,49	0,98	1927,82
87	7,22	37,40	1,39	9,87	10,04	0,98	36,29
88	32,59	32,17	5,39	172,79	175,82	0,98	2865,25
89	3,40	37,40	0,65	2,18	2,22	0,98	3,78
90	24,67	32,14	4,08	98,78	100,64	0,98	1241,53
91	17,03	32,13	2,82	46,95	47,95	0,98	408,28
92	12,96	32,73	2,18	27,68	28,29	0,98	183,35
93	30,66	28,05	4,43	132,75	135,70	0,98	2080,47

94	34,00	26,93	4,71	156,62	160,18	0,98	2723,11
95	26,82	28,08	3,88	101,61	103,94	0,98	1393,94
96	23,01	26,86	3,18	71,37	73,18	0,98	842,06
97	19,19	28,05	2,77	51,81	53,14	0,97	509,81
98	32,12	23,32	3,85	120,53	123,82	0,97	1988,72
99	14,87	28,05	2,15	31,08	31,93	0,97	237,48
100	28,74	23,93	3,54	98,93	101,66	0,97	1460,69
101	11,05	28,05	1,59	17,11	17,62	0,97	97,36
102	17,03	23,97	2,10	34,66	35,78	0,97	304,66
103	7,23	28,05	1,04	7,29	7,53	0,97	27,22
104	21,29	21,41	2,34	48,26	49,93	0,97	531,46
105	30,66	18,70	2,95	87,38	90,46	0,97	1386,99
106	27,33	18,70	2,63	69,31	71,85	0,96	981,72
107	23,88	18,70	2,30	52,85	54,87	0,96	655,11
108	9,14	23,37	1,10	9,65	10,04	0,96	45,88
109	3,40	28,05	0,49	1,60	1,67	0,96	2,84
110	14,88	18,70	1,43	20,38	21,29	0,96	158,33
111	11,05	18,70	1,06	11,20	11,75	0,95	64,91
112	7,22	18,70	0,70	4,73	5,02	0,94	18,14
113	5,31	23,37	0,64	3,11	3,39	0,92	9,02
114	5,31	18,70	0,51	2,40	2,72	0,89	7,21

Załącznik D

Zestawienie wyników symulacji dla wariantu $h_{SP}= 280,6$ mm.

Tab. D.1. Punkty DOE dla wariantu $h_{SP}= 280,6$ mm.

<i>Lp.</i>	v_s [m/s]	w_s [mm]	m'_s [kg/s]	F_{PS} [N]	T'_s [N]	F_{PS}/T'_s [-]	P'_s [W]
1	18,70	28,10	2,70	52,13	50,56	1,03	472,70
2	3,40	28,10	0,49	1,75	1,67	1,05	2,84
3	34,00	28,10	4,92	172,32	167,13	1,03	2841,18
4	18,70	9,40	0,90	16,06	16,91	0,95	158,13
5	18,70	46,80	4,50	103,87	84,20	1,23	787,27
6	3,40	9,40	0,16	0,49	0,56	0,87	0,95
7	34,00	9,40	1,64	53,51	55,91	0,96	950,43
8	3,40	46,80	0,82	3,42	2,78	1,23	4,73
9	34,00	46,80	8,19	342,77	278,35	1,23	4731,93

Tab. D.2. Punkty weryfikacyjne dla wariantu $h_{SP}= 280,6$ mm.

<i>Lp.</i>	v_s [m/s]	w_s [mm]	m'_s [kg/s]	F_{PS} [N]	T'_s [N]	F_{PS}/T'_s [-]	P'_s [W]
1	12,87	44,32	2,94	45,40	37,79	1,20	243,24
2	5,28	39,84	1,08	6,61	5,71	1,16	15,08
3	12,93	40,05	2,66	39,55	34,45	1,15	222,74
4	16,81	39,74	3,44	65,97	57,74	1,14	485,14
5	12,87	35,06	2,32	32,66	29,86	1,09	192,09
6	20,65	35,11	3,73	84,07	77,00	1,09	794,89
7	24,61	35,11	4,45	119,41	109,43	1,09	1346,63
8	16,95	34,96	3,05	56,35	51,65	1,09	437,62
9	9,20	30,38	1,44	13,91	13,22	1,05	60,78
10	16,91	30,53	2,66	47,16	44,90	1,05	379,50
11	24,43	30,46	3,83	98,06	93,50	1,05	1141,92
12	12,78	25,97	1,71	22,17	21,81	1,02	139,30
13	16,58	25,80	2,20	37,07	36,51	1,02	302,76
14	20,57	25,74	2,72	56,83	56,01	1,01	575,90
15	20,68	21,13	2,25	46,10	46,51	0,99	480,95
16	28,22	20,86	3,03	84,63	85,44	0,99	1205,37
17	23,75	20,23	2,47	58,01	58,72	0,99	697,47
18	28,24	16,48	2,39	66,12	67,62	0,98	954,90
19	24,31	16,56	2,07	49,15	50,35	0,98	611,94
20	24,45	11,84	1,49	35,07	36,41	0,96	445,07

Tab. D.3. Punkty doskonalenia powierzchni odpowiedzi dla wariantu $h_{SP}=280,6$ mm.

$Lp.$	v_s [m/s]	w_s [mm]	m'_s [kg/s]	F_{PS} [N]	T'_s [N]	F_{PS}/T'_s [-]	P'_s [W]
1	5,28	46,80	1,27	8,38	6,71	1,25	17,72
2	7,22	46,80	1,74	15,63	12,57	1,24	45,40
3	11,05	46,80	2,66	36,38	29,40	1,24	162,43
4	14,87	46,80	3,58	65,79	53,28	1,23	396,25
5	16,79	46,80	4,04	83,75	67,86	1,23	569,60
6	22,53	46,80	5,42	150,61	122,17	1,23	1375,93
7	24,27	46,80	5,84	174,79	141,82	1,23	1720,91
8	26,35	46,80	6,34	206,01	167,18	1,23	2202,63
9	28,19	46,80	6,79	235,79	191,38	1,23	2697,82
10	30,18	46,80	7,27	270,06	219,24	1,23	3307,86
11	32,68	46,80	7,87	316,78	257,23	1,23	4203,64
12	5,31	44,46	1,22	7,85	6,46	1,22	17,15
13	9,14	45,04	2,12	23,51	19,35	1,22	88,38
14	33,36	45,45	7,80	315,55	260,26	1,21	4341,03
15	32,09	45,37	7,49	291,12	240,33	1,21	3855,75
16	20,77	44,46	4,75	118,44	98,65	1,20	1024,33
17	30,32	44,46	6,93	252,12	210,24	1,20	3186,75
18	25,03	44,11	5,68	169,95	142,19	1,20	1779,45
19	34,00	44,11	7,72	313,28	262,34	1,19	4459,72
20	27,75	43,84	6,26	206,91	173,70	1,19	2410,24
21	3,40	42,13	0,74	2,96	2,51	1,18	4,26
22	7,22	42,13	1,57	13,36	11,31	1,18	40,87
23	32,09	42,90	7,08	267,87	227,28	1,18	3646,41
24	11,05	42,13	2,39	31,08	26,46	1,17	146,21
25	14,88	42,13	3,22	56,21	47,96	1,17	356,69
26	18,70	42,12	4,05	88,74	75,79	1,17	708,65
27	22,52	42,13	4,88	128,66	109,96	1,17	1238,47
28	30,18	42,13	6,54	230,70	197,35	1,17	2977,49
29	9,09	41,46	1,94	20,58	17,61	1,17	79,99
30	34,00	42,13	7,37	292,81	250,54	1,17	4259,26
31	28,47	41,95	6,15	204,20	174,99	1,17	2491,48
32	27,36	41,57	5,85	186,12	160,12	1,16	2190,48
33	25,77	41,42	5,49	164,28	141,53	1,16	1823,77
34	31,75	41,16	6,72	246,90	213,41	1,16	3387,53
35	30,49	40,22	6,31	220,45	192,39	1,15	2932,99
36	28,18	39,89	5,78	186,13	162,94	1,14	2295,49
37	20,61	39,79	4,22	99,34	86,98	1,14	896,44
38	32,76	39,85	6,72	251,18	220,07	1,14	3604,76
39	31,50	38,68	6,27	222,72	197,43	1,13	3109,32
40	29,48	38,50	5,84	193,88	172,15	1,13	2537,56
41	7,23	37,45	1,39	11,32	10,06	1,13	36,34
42	11,05	37,45	2,13	26,34	23,53	1,12	129,98
43	14,88	37,45	2,87	47,65	42,63	1,12	317,09
44	18,70	37,45	3,60	75,23	67,38	1,12	630,00
45	22,53	37,45	4,34	109,08	97,76	1,12	1101,05

46	26,35	37,45	5,08	149,19	133,78	1,12	1762,58
47	34,00	37,45	6,55	248,24	222,74	1,11	3786,55
48	3,40	37,45	0,66	2,47	2,23	1,11	3,79
49	30,18	36,55	5,67	189,26	171,24	1,11	2583,62
50	32,24	36,04	5,98	211,93	192,71	1,10	3106,42
51	11,05	14,07	1,99	24,04	21,99	1,09	121,48
52	27,97	35,16	5,06	154,45	141,53	1,09	1979,56
53	3,40	32,78	0,57	2,12	1,95	1,09	3,31
54	3,40	35,11	0,61	2,27	2,09	1,09	3,55
55	34,00	34,63	6,06	223,58	205,94	1,09	3500,93
56	7,22	32,77	1,22	9,48	8,80	1,08	31,80
57	11,05	32,77	1,86	22,08	20,59	1,07	113,76
58	14,87	32,77	2,51	39,94	37,31	1,07	277,50
59	18,70	32,77	3,15	63,07	58,96	1,07	551,31
60	22,52	32,77	3,80	91,46	85,56	1,07	963,59
61	26,44	32,78	4,46	125,93	117,84	1,07	1557,56
62	30,18	31,79	4,94	157,84	148,94	1,06	2247,16
63	34,00	31,50	5,51	198,12	187,37	1,06	3185,25
64	20,88	30,48	3,27	71,71	68,34	1,05	713,32
65	3,40	30,84	0,54	1,91	1,83	1,04	3,12
66	7,23	28,10	1,04	7,82	7,55	1,04	27,26
67	11,05	28,10	1,60	18,23	17,65	1,03	97,53
68	14,87	28,10	2,15	33,00	31,99	1,03	237,91
69	22,53	28,10	3,26	75,62	73,36	1,03	826,17
70	26,35	28,10	3,81	103,46	100,38	1,03	1322,55
71	29,77	27,61	4,23	129,32	125,92	1,03	1874,51
72	3,40	25,11	0,44	1,53	1,49	1,02	2,54
73	9,14	25,76	1,21	11,25	11,07	1,02	50,56
74	32,09	25,76	4,25	138,58	136,47	1,02	2189,58
75	24,44	25,76	3,24	80,33	79,16	1,01	967,23
76	7,22	23,42	0,87	6,33	6,29	1,01	22,73
77	34,00	23,43	4,10	139,74	139,32	1,00	2368,49
78	30,18	23,43	3,64	110,01	109,74	1,00	1655,70
79	11,05	23,42	1,33	14,75	14,72	1,00	81,30
80	26,35	23,43	3,18	83,85	83,68	1,00	1102,52
81	22,53	23,43	2,71	61,26	61,15	1,00	688,72
82	18,70	23,43	2,25	42,22	42,14	1,00	394,05
83	14,87	23,43	1,79	26,71	26,67	1,00	198,34
84	8,75	22,90	1,03	9,03	9,03	1,00	39,52
85	12,83	22,97	1,52	19,44	19,47	1,00	124,92
86	3,40	22,13	0,39	1,31	1,32	1,00	2,24
87	32,09	21,09	3,48	110,88	111,71	0,99	1792,24
88	7,73	21,15	0,84	6,43	6,50	0,99	25,10
89	9,31	21,09	1,01	9,31	9,41	0,99	43,81
90	10,80	21,07	1,17	12,51	12,64	0,99	68,22
91	13,99	21,24	1,53	21,13	21,40	0,99	149,70
92	5,63	21,60	0,63	3,48	3,53	0,99	9,93
93	12,10	20,20	1,26	15,02	15,23	0,99	92,14

94	34,00	18,75	3,28	109,86	111,52	0,99	1895,80
95	30,17	18,75	2,91	86,46	87,84	0,98	1325,24
96	26,35	18,75	2,54	65,86	66,98	0,98	882,47
97	16,14	19,25	1,60	25,37	25,80	0,98	208,22
98	8,57	19,51	0,86	7,25	7,38	0,98	31,63
99	18,70	18,75	1,80	33,13	33,73	0,98	315,42
100	5,31	18,96	0,52	2,70	2,75	0,98	7,31
101	13,57	18,86	1,32	17,54	17,87	0,98	121,23
102	11,05	18,75	1,07	11,56	11,78	0,98	65,08
103	7,22	18,75	0,70	4,93	5,04	0,98	18,19
104	21,57	17,59	1,95	41,23	42,12	0,98	454,35
105	3,40	18,75	0,33	1,09	1,12	0,98	1,90
106	34,00	16,41	2,87	95,54	97,61	0,98	1659,45
107	8,26	17,87	0,76	6,14	6,27	0,98	25,91
108	14,93	17,86	1,37	20,04	20,49	0,98	152,95
109	12,34	17,94	1,14	13,73	14,04	0,98	86,62
110	9,51	18,11	0,89	8,24	8,43	0,98	40,10
111	15,66	17,30	1,39	21,32	21,83	0,98	170,92
112	17,07	17,08	1,50	25,01	25,62	0,98	218,70
113	18,57	16,41	1,57	28,37	29,11	0,97	270,20
114	9,94	19,65	1,00	9,73	9,99	0,97	49,63
115	10,91	16,82	0,94	10,03	10,30	0,97	56,22
116	14,48	16,01	1,19	16,79	17,26	0,97	124,92
117	12,88	16,30	1,08	13,53	13,91	0,97	89,56
118	34,00	14,07	2,46	81,43	83,71	0,97	1423,10
119	20,37	15,39	1,61	31,96	32,87	0,97	334,84
120	6,44	17,42	0,58	3,62	3,72	0,97	11,98
121	16,03	15,62	1,29	20,07	20,65	0,97	165,52
122	30,18	14,08	2,19	64,08	65,94	0,97	994,83
123	8,68	16,41	0,73	6,18	6,37	0,97	27,65
124	9,89	15,90	0,81	7,76	7,99	0,97	39,51
125	26,35	14,07	1,91	48,81	50,28	0,97	662,44
126	32,09	12,91	2,13	66,26	68,37	0,97	1096,92
127	22,53	14,07	1,63	35,60	36,74	0,97	413,81
128	7,13	16,02	0,59	4,05	4,19	0,97	14,93
129	18,70	14,07	1,35	24,51	25,32	0,97	236,77
130	13,32	14,43	0,99	12,74	13,17	0,97	87,65
131	5,55	16,20	0,46	2,48	2,57	0,97	7,12
132	14,88	14,07	1,08	15,49	16,02	0,97	119,17
133	20,58	13,47	1,43	28,38	29,36	0,97	302,14
134	16,79	13,91	1,20	19,49	20,16	0,97	169,23
135	8,51	14,73	0,64	5,30	5,49	0,97	23,34
136	34,00	11,74	2,05	67,43	69,81	0,97	1186,77
137	28,26	11,74	1,71	46,51	48,24	0,96	681,65
138	13,97	13,42	0,96	12,98	13,47	0,96	94,05
139	7,22	14,07	0,52	3,64	3,78	0,96	13,66
140	6,24	14,96	0,48	2,88	2,99	0,96	9,34
141	19,33	12,27	1,22	22,68	23,60	0,96	228,15

142	16,07	11,74	0,97	14,96	15,60	0,96	125,31
143	17,89	11,42	1,05	18,02	18,80	0,96	168,17
144	8,61	13,03	0,58	4,76	4,97	0,96	21,38
145	13,23	12,50	0,85	10,78	11,25	0,96	74,43
146	14,49	11,32	0,84	11,70	12,23	0,96	88,60
147	32,03	9,40	1,55	47,45	49,61	0,96	794,34
148	30,18	9,40	1,46	42,09	44,04	0,96	664,40
149	9,50	11,97	0,59	5,31	5,56	0,96	26,40
150	28,26	9,40	1,37	36,89	38,63	0,95	545,90
151	26,35	9,40	1,27	32,04	33,58	0,95	442,42
152	10,62	11,30	0,62	6,25	6,56	0,95	34,82
153	22,53	9,40	1,09	23,37	24,54	0,95	276,38
154	16,73	9,61	0,83	13,13	13,84	0,95	115,77
155	11,68	10,64	0,64	7,08	7,47	0,95	43,59
156	12,87	10,61	0,70	8,57	9,04	0,95	58,17
157	9,14	10,51	0,49	4,28	4,52	0,95	20,64
158	14,88	9,40	0,72	10,13	10,70	0,95	79,59
159	5,13	14,33	0,38	1,83	1,94	0,95	4,97
160	11,05	9,40	0,53	5,54	5,91	0,94	32,63
161	7,23	9,40	0,35	2,36	2,52	0,93	9,12
162	7,66	11,31	0,45	3,17	3,41	0,93	13,05
163	3,40	14,07	0,25	0,78	0,84	0,93	1,42
164	5,31	9,40	0,26	1,26	1,37	0,93	3,63
165	5,94	12,34	0,38	2,02	2,24	0,90	6,65

Załącznik E

Zestawienie wyników symulacji dla wariantu $h_{SP}=140,3$ mm.

Tab. E.1. Punkty DOE dla wariantu $h_{SP}=140,3$ mm.

<i>Lp.</i>	v_s [m/s]	w_s [mm]	m'_s [kg/s]	F_{PS} [N]	T'_s [N]	F_{PS}/T'_s [-]	P'_s [W]
1	18,70	14,05	1,35	26,14	25,28	1,03	236,35
2	3,40	14,05	0,25	1,39	0,84	1,66	1,42
3	34,00	14,05	2,46	86,17	83,56	1,03	1420,59
4	18,70	4,70	0,45	7,60	8,46	0,90	79,06
5	18,70	23,40	2,25	52,35	42,10	1,24	393,64
6	3,40	4,70	0,08	0,78	0,28	2,80	0,48
7	34,00	4,70	0,82	26,46	27,95	0,95	475,21
8	3,40	23,40	0,41	2,31	1,39	1,66	2,37
9	34,00	23,40	4,09	172,01	139,17	1,24	2365,96

Tab. E.2. Punkty weryfikacyjne dla wariantu $h_{SP}=140,3$ mm.

<i>Lp.</i>	v_s [m/s]	w_s [mm]	m'_s [kg/s]	F_{PS} [N]	T'_s [N]	F_{PS}/T'_s [-]	P'_s [W]
1	7,23	18,71	0,70	5,73	5,03	1,14	18,21
2	10,80	7,08	0,39	3,95	4,25	0,93	22,94
3	11,04	16,36	0,93	11,05	10,26	1,08	56,66
4	14,85	14,12	1,08	16,51	16,01	1,03	118,85
5	14,87	16,48	1,26	20,30	18,76	1,08	139,48
6	14,87	23,35	1,79	33,15	26,58	1,25	197,61
7	14,90	9,33	0,72	10,23	10,67	0,96	79,48
8	14,93	11,63	0,89	13,20	13,34	0,99	99,57
9	18,73	7,05	0,68	11,96	12,72	0,94	119,12
10	19,48	21,15	2,12	48,78	41,29	1,18	402,21
11	22,38	11,69	1,35	30,16	30,14	1,00	337,33
12	22,53	18,88	2,19	55,45	49,30	1,12	555,27
13	22,55	6,95	0,81	17,31	18,17	0,95	204,95
14	22,58	16,35	1,90	46,01	42,90	1,07	484,37
15	26,71	11,68	1,60	42,87	42,86	1,00	572,47
16	27,12	21,09	2,94	93,77	79,80	1,18	1081,90
17	30,09	16,40	2,54	81,85	76,40	1,07	1149,52
18	30,14	4,74	0,73	20,98	22,15	0,95	333,82
19	30,14	14,09	2,19	67,99	65,87	1,03	992,79
20	30,23	18,75	2,92	98,67	88,17	1,12	1332,60

Tab. E.3. Punkty doskonalenia powierzchni odpowiedzi dla wariantu $h_{SP}=140,3$ mm.

$Lp.$	v_s [m/s]	w_s [mm]	m'_s [kg/s]	F_{PS} [N]	T'_s [N]	F_{PS}/T'_s [-]	P'_s [W]
1	3,40	18,72	0,33	1,90	1,11	1,71	1,89
2	3,40	9,38	0,16	1,01	0,56	1,80	0,95
3	3,40	21,06	0,37	2,15	1,25	1,71	2,13
4	3,40	11,71	0,20	1,32	0,70	1,90	1,18
5	3,40	16,39	0,29	1,66	0,97	1,70	1,66
6	3,40	7,08	0,12	0,90	0,42	2,15	0,72
7	3,40	10,54	0,18	1,09	0,63	1,73	1,07
8	3,40	5,63	0,10	0,84	0,34	2,51	0,57
9	3,40	12,98	0,23	1,35	0,77	1,74	1,31
10	4,30	19,89	0,44	2,74	1,89	1,45	4,07
11	4,57	15,22	0,36	2,33	1,64	1,42	3,74
12	4,58	5,89	0,14	0,95	0,64	1,48	1,46
13	4,92	8,36	0,21	1,40	1,04	1,35	2,56
14	5,22	4,70	0,13	0,75	0,66	1,13	1,72
15	5,31	18,01	0,49	3,38	2,61	1,29	6,95
16	5,31	22,23	0,61	4,21	3,23	1,30	8,57
17	5,31	12,43	0,34	2,34	1,80	1,30	4,79
18	5,31	14,05	0,38	2,68	2,04	1,32	5,42
19	5,80	10,54	0,31	2,25	1,82	1,23	5,28
20	6,38	7,97	0,26	1,91	1,67	1,14	5,32
21	6,39	19,89	0,65	4,97	4,18	1,19	13,35
22	6,59	15,22	0,52	3,89	3,40	1,14	11,19
23	6,84	7,04	0,25	1,85	1,69	1,09	5,80
24	7,05	4,70	0,17	1,10	1,20	0,92	4,23
25	7,22	11,71	0,44	3,49	3,15	1,11	11,36
26	7,22	23,40	0,87	7,84	6,28	1,25	22,70
27	7,22	16,39	0,61	4,85	4,40	1,10	15,90
28	7,22	18,72	0,70	5,72	5,03	1,14	18,17
29	7,22	21,06	0,78	6,71	5,66	1,19	20,44
30	7,23	9,36	0,35	2,76	2,51	1,10	9,08
31	7,23	14,05	0,52	4,10	3,77	1,09	13,63
32	8,87	5,50	0,25	2,07	2,23	0,93	9,88
33	8,92	6,79	0,31	2,70	2,78	0,97	12,38
34	8,95	8,08	0,37	3,28	3,33	0,98	14,90
35	9,14	17,56	0,83	8,30	7,54	1,10	34,46
36	9,14	15,22	0,72	6,87	6,54	1,05	29,87
37	9,14	13,08	0,61	5,69	5,62	1,01	25,66
38	9,14	23,40	1,10	12,58	10,05	1,25	45,93
39	9,14	22,23	1,05	11,63	9,55	1,22	43,63
40	9,14	10,54	0,50	4,49	4,53	0,99	20,70
41	9,34	19,89	0,96	10,33	8,93	1,16	41,70
42	10,70	4,70	0,26	2,48	2,77	0,90	14,80
43	10,85	5,87	0,33	3,28	3,55	0,92	19,27
44	11,05	7,03	0,40	4,08	4,41	0,92	24,38
45	11,05	9,37	0,53	5,59	5,89	0,95	32,54

46	11,05	18,72	1,06	13,30	11,76	1,13	64,99
47	11,05	21,06	1,20	15,71	13,23	1,19	73,11
48	11,05	16,39	0,93	11,10	10,29	1,08	56,88
49	11,05	23,40	1,33	18,39	14,70	1,25	81,22
50	11,05	14,05	0,80	9,09	8,83	1,03	48,77
51	11,05	11,71	0,67	7,24	7,36	0,98	40,65
52	12,67	22,23	1,45	22,41	18,37	1,22	116,42
53	12,74	4,70	0,31	3,38	3,93	0,86	25,02
54	12,96	19,89	1,33	19,96	17,20	1,16	111,46
55	12,96	15,22	1,01	13,85	13,16	1,05	85,27
56	12,96	17,56	1,17	16,75	15,18	1,10	98,37
57	12,96	18,72	1,25	18,29	16,19	1,13	104,92
58	13,09	13,36	0,90	11,98	11,79	1,02	77,18
59	13,12	9,02	0,61	7,61	7,99	0,95	52,39
60	13,32	10,33	0,71	9,13	9,42	0,97	62,73
61	13,47	5,87	0,41	4,90	5,47	0,89	36,86
62	14,87	7,04	0,54	7,42	8,01	0,93	59,58
63	14,87	11,71	0,90	13,21	13,33	0,99	99,16
64	14,87	23,40	1,79	33,27	26,64	1,25	198,12
65	14,87	16,39	1,25	20,16	18,66	1,08	138,75
66	14,88	18,72	1,43	24,10	21,32	1,13	158,54
67	14,88	21,06	1,61	28,44	23,98	1,19	178,34
68	14,88	4,70	0,36	4,53	5,35	0,85	39,80
69	14,89	13,00	1,00	15,04	14,84	1,01	110,49
70	15,04	14,15	1,10	17,01	16,48	1,03	123,98
71	15,26	9,14	0,72	10,48	10,95	0,96	83,55
72	16,69	10,52	0,90	14,71	15,08	0,98	125,86
73	16,78	12,89	1,11	18,98	18,67	1,02	156,61
74	16,79	19,89	1,72	33,30	28,84	1,15	242,11
75	16,79	22,23	1,92	39,12	32,23	1,21	270,57
76	16,79	23,40	2,02	42,28	33,93	1,25	284,79
77	16,79	5,87	0,51	7,86	8,51	0,92	71,43
78	16,79	17,56	1,52	28,06	25,46	1,10	213,73
79	16,91	4,70	0,41	6,01	6,91	0,87	58,45
80	16,96	15,27	1,33	23,87	22,60	1,06	191,65
81	17,72	8,21	0,75	12,62	13,26	0,95	117,54
82	18,70	9,37	0,90	16,26	16,87	0,96	157,70
83	18,70	18,73	1,80	37,88	33,69	1,12	315,00
84	18,70	21,06	2,03	44,72	37,90	1,18	354,32
85	18,70	7,04	0,68	11,91	12,66	0,94	118,39
86	18,70	11,71	1,13	20,96	21,07	0,99	197,04
87	18,78	16,44	1,59	32,13	29,84	1,08	280,31
88	20,61	10,54	1,12	22,77	23,05	0,99	237,54
89	20,61	5,87	0,62	11,88	12,82	0,93	132,17
90	20,61	13,17	1,40	29,37	28,79	1,02	296,76
91	20,61	22,47	2,38	59,70	49,12	1,22	506,29
92	20,61	15,22	1,61	35,03	33,27	1,05	342,87
93	20,61	17,61	1,87	42,28	38,49	1,10	396,70

94	20,61	8,21	0,87	17,14	17,94	0,96	184,89
95	20,71	19,95	2,13	50,65	44,02	1,15	455,79
96	21,22	21,22	2,32	58,07	49,15	1,18	521,42
97	22,52	23,40	2,71	75,72	61,08	1,24	687,93
98	22,52	11,71	1,36	30,60	30,57	1,00	344,35
99	22,53	9,38	1,09	23,93	24,47	0,98	275,63
100	22,53	18,73	2,17	54,80	48,88	1,12	550,53
101	22,53	7,04	0,82	17,51	18,37	0,95	206,90
102	22,53	16,39	1,90	45,91	42,78	1,07	481,80
103	22,53	4,70	0,54	11,32	12,27	0,92	138,18
104	22,53	14,05	1,63	37,88	36,68	1,03	413,08
105	23,29	21,53	2,58	71,39	60,10	1,19	699,94
106	24,44	8,21	1,03	24,47	25,21	0,97	308,09
107	24,44	5,87	0,74	17,20	18,03	0,95	220,33
108	24,44	19,97	2,51	70,49	61,37	1,15	749,84
109	24,44	15,22	1,91	49,17	46,76	1,05	571,37
110	24,66	12,74	1,62	40,42	39,88	1,01	491,74
111	24,66	10,68	1,36	33,08	33,42	0,99	412,16
112	25,20	23,40	3,03	94,70	76,48	1,24	963,87
113	26,35	7,04	0,95	24,24	25,14	0,96	331,21
114	26,35	16,39	2,22	62,76	58,54	1,07	771,28
115	26,35	18,72	2,54	74,89	66,89	1,12	881,29
116	26,35	14,05	1,90	51,80	50,19	1,03	661,27
117	26,35	4,70	0,64	15,87	16,79	0,95	221,21
118	26,35	9,38	1,27	32,77	33,49	0,98	441,24
119	26,54	22,35	3,05	97,90	81,03	1,21	1075,44
120	26,80	11,71	1,61	43,31	43,28	1,00	579,92
121	27,09	21,06	2,94	93,37	79,51	1,17	1076,89
122	27,88	23,40	3,36	115,82	93,61	1,24	1305,17
123	28,08	10,44	1,51	41,82	42,35	0,99	594,65
124	28,26	5,87	0,85	23,10	24,12	0,96	340,83
125	28,27	17,56	2,55	79,01	72,19	1,09	1020,33
126	28,42	19,69	2,88	93,37	81,85	1,14	1163,26
127	28,78	12,60	1,86	54,27	53,67	1,01	772,18
128	29,41	22,22	3,36	119,06	98,89	1,20	1454,09
129	30,06	13,87	2,15	66,34	64,47	1,03	968,88
130	30,13	9,35	1,45	42,71	43,64	0,98	657,39
131	30,18	16,39	2,54	82,23	76,77	1,07	1158,28
132	30,18	7,04	1,09	31,81	32,97	0,96	497,41
133	30,18	4,70	0,73	20,85	22,02	0,95	332,20
134	30,35	18,62	2,91	98,48	88,23	1,12	1338,93
135	30,65	11,63	1,83	56,19	56,21	1,00	861,42
136	30,93	23,40	3,72	142,43	115,19	1,24	1781,55
137	30,96	21,06	3,35	121,86	103,87	1,17	1607,79
138	32,06	9,39	1,55	48,64	49,67	0,98	796,21
139	32,09	15,22	2,51	84,65	80,61	1,05	1293,26
140	32,09	4,70	0,78	23,54	24,90	0,95	399,45
141	32,09	16,39	2,71	92,96	86,81	1,07	1392,72

142	32,09	5,87	0,97	29,81	31,09	0,96	498,78
143	32,09	8,21	1,35	42,24	43,47	0,97	697,44
144	32,26	17,56	2,91	102,81	94,02	1,09	1516,60
145	32,47	23,40	3,91	156,87	126,90	1,24	2059,95
146	32,57	10,91	1,83	59,07	59,53	0,99	969,47
147	32,92	20,11	3,41	128,90	112,14	1,15	1845,86
148	34,00	9,37	1,64	54,61	55,76	0,98	947,89
149	34,00	18,72	3,28	124,49	111,37	1,12	1893,27
150	34,00	7,04	1,23	40,41	41,85	0,97	711,53
151	34,00	21,49	3,76	151,30	127,83	1,18	2173,08
152	34,00	16,39	2,87	104,34	97,47	1,07	1656,93
153	34,00	11,97	2,09	71,47	71,22	1,00	1210,66
154	34,00	22,45	3,93	161,41	133,50	1,21	2269,52

Załącznik F

Zestawienie wyników symulacji dla wariantu $h_{SP}=70,2$ mm.

Tab. F.1. Punkty DOE dla wariantu $h_{SP}=70,2$ mm.

<i>Lp.</i>	v_s [m/s]	w_s [mm]	m'_s [kg/s]	F_{PS} [N]	T'_s [N]	F_{PS}/T'_s [-]	P'_s [W]
1	3,40	2,30	0,04	0,73	0,14	5,36	0,23
2	18,70	2,30	0,22	3,78	4,14	0,91	38,69
3	34,00	2,30	0,40	12,64	13,68	0,92	232,55
4	3,40	7,00	0,12	0,94	0,42	2,25	0,71
5	18,70	7,00	0,67	13,15	12,59	1,04	117,75
6	34,00	7,00	1,22	43,25	41,63	1,04	707,77
7	3,40	11,70	0,20	1,32	0,70	1,89	1,18
8	18,70	11,70	1,13	26,37	21,05	1,25	196,82
9	34,00	11,70	2,05	86,74	69,59	1,25	1182,98

Tab. F.2. Punkty weryfikacyjne dla wariantu $h_{SP}=70,2$ mm.

<i>Lp.</i>	v_s [m/s]	w_s [mm]	m'_s [kg/s]	F_{PS} [N]	T'_s [mm]	F_{PS}/T'_s [-]	P'_s [W]
1	18,68	4,65	0,45	8,08	8,34	0,97	8,34
2	30,54	8,30	1,30	43,33	39,82	1,09	39,82
3	22,58	8,16	0,95	23,23	21,40	1,09	21,40
4	30,56	5,69	0,89	27,23	27,31	1,00	27,31
5	7,26	5,83	0,22	1,80	1,58	1,14	1,58
6	22,73	5,92	0,69	15,83	15,73	1,01	15,73
7	14,85	10,50	0,80	14,21	11,92	1,19	11,92
8	14,87	8,22	0,63	10,22	9,36	1,09	9,36
9	22,55	3,43	0,40	8,53	8,97	0,95	8,97
10	22,67	10,51	1,23	33,04	27,80	1,19	27,80
11	7,08	10,51	0,38	3,23	2,71	1,19	2,71
12	14,93	5,79	0,44	6,66	6,63	1,00	6,63
13	7,55	8,17	0,32	2,60	2,40	1,08	2,40
14	29,81	3,48	0,53	15,28	15,90	0,96	15,90
15	15,16	3,50	0,27	3,85	4,14	0,93	4,14
16	29,64	10,52	1,60	56,34	47,54	1,19	47,54
17	8,50	3,35	0,15	1,23	1,25	0,99	1,25
18	7,20	4,50	0,17	1,42	1,20	1,18	1,20
19	14,87	11,68	0,89	16,66	13,29	1,25	13,29
20	7,23	9,34	0,35	2,84	2,51	1,13	2,51

Tab. F.3. Punkty doskonalenia powierzchni odpowiedzi dla wariantu $h_{SP}=70,2$ mm.

$Lp.$	v_s [m/s]	w_s [mm]	m'_s [kg/s]	F_{PS} [N]	T'_s [N]	F_{PS}/T'_s [-]	P'_s [W]
1	26,35	9,35	1,27	440,05	33,40	1,13	440,05
2	26,35	4,65	0,63	218,85	16,61	0,97	218,85
3	11,05	4,65	0,26	16,14	2,92	0,95	16,14
4	11,05	9,35	0,53	32,45	5,87	1,14	32,45
5	34,00	9,79	1,71	989,94	58,23	1,15	989,94
6	11,05	11,70	0,67	40,61	7,35	1,26	40,61
7	12,04	2,30	0,14	10,33	1,72	0,84	10,33
8	34,00	4,37	0,76	441,99	26,00	0,97	441,99
9	26,35	2,30	0,31	108,25	8,22	0,93	108,25
10	3,40	9,35	0,16	0,95	0,56	2,05	0,95
11	26,35	11,70	1,59	550,66	41,80	1,25	550,66
12	3,40	4,65	0,08	0,47	0,28	3,73	0,47
13	18,72	9,36	0,90	157,84	16,87	1,14	157,84
14	11,05	7,00	0,40	24,30	4,40	1,05	24,30
15	26,85	6,98	0,96	347,62	25,89	1,04	347,62
16	3,40	3,36	0,06	0,34	0,20	4,24	0,34
17	18,70	4,65	0,45	78,22	8,37	0,97	78,22
18	34,00	3,34	0,58	337,27	19,84	0,96	337,27
19	7,22	10,52	0,39	10,21	2,83	1,19	10,21
20	30,18	11,70	1,82	826,98	54,81	1,25	826,98
21	3,40	5,82	0,10	0,59	0,35	2,68	0,59
22	30,47	5,73	0,90	417,32	27,39	1,00	417,32
23	22,52	8,17	0,95	240,34	21,34	1,09	240,34
24	25,88	3,47	0,46	154,92	11,97	0,95	154,92
25	7,22	8,03	0,30	7,79	2,16	1,09	7,79
26	8,40	3,35	0,14	5,10	1,21	1,00	5,10
27	30,17	2,30	0,36	162,56	10,77	0,94	162,56
28	30,89	8,40	1,33	636,72	41,22	1,09	636,72
29	3,40	10,53	0,18	1,06	0,63	1,96	1,06
30	14,87	5,82	0,45	49,32	6,63	1,00	49,32
31	14,87	10,53	0,81	89,11	11,98	1,19	89,11
32	21,27	3,47	0,38	86,02	8,09	0,95	86,02
33	3,40	7,97	0,14	0,81	0,47	2,20	0,81
34	14,87	8,17	0,63	69,22	9,31	1,09	69,22
35	7,22	5,24	0,19	5,08	1,41	1,08	5,08
36	22,75	5,89	0,69	178,37	15,68	1,00	178,37
37	34,00	10,75	1,88	1086,46	63,91	1,20	1086,46
38	7,07	2,30	0,08	2,09	0,59	1,66	2,09
39	7,22	11,70	0,43	11,35	3,14	1,26	11,35
40	29,98	3,89	0,60	269,48	17,98	0,97	269,48
41	22,52	10,53	1,22	309,60	27,49	1,19	309,60
42	7,22	6,51	0,24	6,32	1,75	1,09	6,32
43	15,37	3,47	0,27	32,37	4,21	0,93	32,37
44	23,11	7,04	0,84	223,52	19,34	1,04	223,52
45	34,00	8,02	1,40	811,33	47,73	1,08	811,33

46	7,22	9,21	0,34	8,94	2,47	1,13	8,94
47	5,71	3,87	0,11	1,85	0,65	1,91	1,85
48	29,67	10,31	1,57	692,65	46,69	1,18	692,65
49	5,10	8,65	0,23	2,95	1,16	1,34	2,95
50	15,37	2,30	0,18	21,48	2,80	0,84	21,48
51	28,50	3,05	0,45	181,78	12,76	0,95	181,78
52	12,28	6,20	0,39	29,54	4,81	1,02	29,54
53	4,82	6,36	0,16	1,84	0,76	1,65	1,84
54	5,31	11,11	0,30	4,29	1,61	1,23	4,29
55	30,43	6,84	1,07	496,01	32,60	1,03	496,01
56	18,71	10,53	1,01	177,35	18,96	1,19	177,35
57	31,33	3,16	0,51	249,82	15,95	0,95	249,82
58	14,87	4,63	0,35	39,21	5,27	0,97	39,21
59	13,22	11,19	0,76	66,58	10,07	1,23	66,58
60	28,26	11,13	1,62	646,27	45,73	1,22	646,27
61	22,02	2,53	0,29	69,61	6,32	0,93	69,61
62	5,90	3,04	0,09	1,61	0,55	2,10	1,61
63	6,01	7,27	0,22	4,06	1,35	1,18	4,06
64	34,00	5,65	0,99	571,06	33,59	1,00	571,06
65	20,74	11,16	1,19	256,14	24,70	1,22	256,14
66	21,05	6,52	0,71	156,56	14,87	1,03	156,56
67	10,10	2,79	0,14	7,38	1,46	0,89	7,38
68	10,15	10,25	0,54	27,57	5,43	1,18	27,57
69	31,52	10,82	1,75	871,82	55,31	1,20	871,82
70	28,63	5,11	0,75	308,70	21,56	0,98	308,70
71	16,42	6,53	0,55	74,30	9,05	1,03	74,30
72	19,88	2,91	0,30	58,80	5,92	0,93	58,80
73	8,56	7,19	0,32	11,59	2,71	1,04	11,59
74	22,53	9,35	1,08	275,14	24,42	1,13	275,14
75	16,92	11,13	0,97	138,62	16,39	1,22	138,62
76	28,90	7,68	1,14	476,68	32,99	1,07	476,68
77	18,24	3,74	0,35	58,34	6,40	0,95	58,34
78	15,16	11,70	0,91	104,88	13,84	1,25	104,88
79	32,50	6,32	1,06	558,28	34,36	1,02	558,28
80	11,02	8,18	0,46	28,13	5,11	1,09	28,13
81	8,21	4,37	0,18	6,21	1,51	0,99	6,21
82	32,37	9,11	1,52	794,90	49,11	1,12	794,90
83	20,46	8,72	0,92	192,11	18,78	1,11	192,11
84	32,09	2,30	0,38	195,47	12,18	0,93	195,47
85	24,01	11,25	1,39	400,45	33,36	1,23	400,45
86	4,80	9,94	0,25	2,83	1,18	1,34	2,83
87	12,42	3,79	0,24	18,65	3,00	0,91	18,65
88	12,76	10,00	0,66	53,44	8,38	1,17	53,44
89	32,39	3,85	0,64	336,82	20,80	0,97	336,82
90	4,23	5,24	0,11	1,02	0,48	2,30	1,02
91	25,11	7,72	1,00	314,31	25,04	1,07	314,31
92	12,82	7,03	0,46	38,07	5,94	1,05	38,07
93	22,53	4,59	0,53	134,85	11,97	0,97	134,85

94	32,09	11,70	1,93	994,38	61,98	1,25	994,38
95	25,41	10,24	1,34	431,96	34,00	1,17	431,96
96	12,64	5,41	0,35	28,08	4,44	0,99	28,08
97	13,70	2,88	0,20	19,09	2,79	0,87	19,09
98	9,14	11,11	0,52	21,81	4,77	1,23	21,81
99	20,14	5,45	0,56	114,50	11,37	0,99	114,50
100	3,40	4,00	0,07	0,40	0,24	3,75	0,40
101	16,80	9,94	0,86	121,18	14,43	1,16	121,18
102	32,06	5,01	0,83	424,60	26,49	0,98	424,60
103	32,60	10,27	1,72	915,02	56,14	1,17	915,02
104	24,12	2,30	0,29	83,01	6,88	0,93	83,01
105	15,43	7,33	0,58	69,33	8,99	1,06	69,33
106	8,91	8,62	0,40	15,67	3,52	1,11	15,67
107	5,95	4,66	0,14	2,53	0,85	1,53	2,53
108	5,31	11,70	0,32	4,51	1,70	1,26	4,51
109	17,03	2,88	0,25	36,66	4,30	0,92	36,66
110	18,13	8,00	0,75	122,58	13,52	1,08	122,58
111	27,43	6,02	0,85	319,41	23,29	1,01	319,41
112	17,36	5,45	0,49	73,29	8,44	0,99	73,29
113	34,00	2,82	0,49	284,91	16,76	0,95	284,91
114	25,23	2,85	0,37	117,98	9,35	0,94	117,98
115	27,92	8,56	1,23	479,20	34,33	1,10	479,20
116	4,32	7,49	0,17	1,55	0,72	1,69	1,55
117	28,26	2,30	0,33	133,57	9,45	0,94	133,57
118	9,44	5,87	0,29	12,71	2,69	1,00	12,71
119	14,13	9,12	0,66	66,23	9,37	1,13	66,23
120	34,00	4,97	0,87	502,44	29,56	0,98	502,44
121	15,37	2,91	0,23	27,22	3,54	0,88	27,22
122	33,48	11,19	1,93	1080,38	64,53	1,22	1080,38
123	3,40	11,11	0,19	1,12	0,66	1,93	1,12
124	4,35	2,77	0,06	0,59	0,27	3,49	0,59
125	25,23	5,46	0,71	225,39	17,87	0,99	225,39
126	24,63	8,70	1,10	334,50	27,16	1,11	334,50
127	9,14	11,70	0,55	22,96	5,03	1,26	22,96
128	30,41	2,77	0,43	200,58	13,19	0,95	200,58
129	5,10	2,30	0,06	0,78	0,31	3,17	0,78
130	9,20	2,30	0,11	4,61	1,00	0,89	4,61
131	11,86	3,06	0,19	13,15	2,22	0,89	13,15
132	32,47	2,84	0,47	250,37	15,42	0,95	250,37
133	20,27	4,12	0,43	88,34	8,72	0,96	88,34
134	9,78	5,20	0,26	12,51	2,56	0,97	12,51
135	15,57	4,07	0,33	39,49	5,07	0,95	39,49
136	26,98	4,03	0,56	203,58	15,09	0,96	203,58
137	10,03	3,89	0,20	10,11	2,02	0,93	10,11
138	23,59	3,86	0,47	130,36	11,05	0,96	130,36
139	8,13	2,78	0,12	3,84	0,95	1,14	3,84
140	17,10	3,42	0,30	43,99	5,14	0,94	43,99
141	13,73	3,55	0,25	23,65	3,44	0,92	23,65

142	29,89	4,56	0,70	313,40	20,97	0,98	313,40
143	19,82	7,58	0,77	151,70	15,31	1,06	151,70
144	6,15	5,82	0,18	3,48	1,13	1,35	3,48
145	4,89	3,38	0,08	1,01	0,42	2,62	1,01
146	22,86	3,10	0,36	95,13	8,32	0,95	95,13
147	17,26	4,30	0,38	56,81	6,58	0,96	56,81
148	16,91	2,30	0,20	28,59	3,38	0,85	28,59
149	10,29	3,34	0,18	9,35	1,82	0,91	9,35
150	12,56	4,46	0,29	22,72	3,62	0,95	22,72
151	7,22	11,11	0,41	10,78	2,98	1,22	10,78
152	6,80	4,33	0,15	3,50	1,03	1,34	3,50
153	34,00	3,76	0,66	380,25	22,37	0,97	380,25
154	7,88	3,85	0,16	4,85	1,23	1,07	4,85
155	28,15	3,60	0,52	206,62	14,68	0,96	206,62
156	11,74	10,70	0,65	44,59	7,59	1,20	44,59
157	33,60	8,62	1,49	841,46	50,09	1,10	841,46
158	16,49	7,78	0,66	89,69	10,88	1,07	89,69
159	16,57	4,91	0,42	57,41	6,93	0,98	57,41
160	4,00	8,95	0,18	1,48	0,74	1,68	1,48
161	7,92	6,06	0,25	7,74	1,95	1,05	7,74
162	11,81	8,76	0,53	37,10	6,28	1,12	37,10
163	7,93	9,87	0,40	12,65	3,19	1,16	12,65
164	1,00	3,50	0,02	0,01	0,02	16,68	0,01
165	17,50	3,50	0,32	48,25	5,51	0,84	48,25
166	34,00	3,50	0,61	353,88	20,82	0,92	353,88
167	1,00	10,50	0,05	0,03	0,05	6,25	0,03
168	17,50	10,50	0,95	144,76	16,54	1,01	144,76
169	34,00	10,50	1,84	1061,65	62,45	1,01	1061,65
170	1,00	17,50	0,09	0,05	0,09	3,35	0,05
171	17,50	17,50	1,58	241,27	27,57	1,25	241,27
172	34,00	17,50	3,06	1769,42	104,08	1,24	1769,42
173	29,22	5,64	0,85	362,03	24,78	0,96	362,03
174	27,83	8,68	1,24	481,35	34,59	0,97	481,35
175	30,20	7,35	1,14	520,65	34,48	0,97	520,65
176	1,00	5,29	0,03	0,01	0,03	12,26	0,01
177	4,96	7,17	0,18	2,24	0,91	1,33	2,24
178	21,23	10,30	1,13	253,52	23,89	0,99	253,52
179	12,43	3,55	0,23	17,57	2,83	0,81	17,57
180	24,48	15,49	1,95	584,30	47,74	1,06	584,30
181	23,91	8,60	1,06	302,51	25,30	0,97	302,51
182	21,44	3,51	0,39	89,00	8,30	0,88	89,00
183	27,38	12,56	1,77	663,00	48,44	1,01	663,00
184	25,69	5,51	0,73	240,20	18,70	0,95	240,20
185	13,56	7,28	0,51	46,64	6,88	0,92	46,64
186	4,23	9,92	0,22	1,93	0,91	1,48	1,93
187	30,37	9,80	1,53	706,18	46,50	0,98	706,18
188	14,28	14,41	1,06	107,94	15,12	1,04	107,94
189	9,94	8,37	0,43	21,15	4,25	0,95	21,15

190	9,59	4,83	0,24	10,97	2,29	0,90	10,97
191	16,71	11,84	1,02	142,17	17,01	0,99	142,17
192	16,84	8,42	0,73	103,42	12,28	0,95	103,42

Załącznik G

Zestawienie wyników symulacji dla wariantu $h_{SP}= 35,1$ mm.

Tab. G.1. Punkty DOE dla wariantu $h_{SP}= 35,1$ mm.

<i>Lp.</i>	v_s [m/s]	w_s [mm]	m'_s [kg/s]	F_{PS} [N]	T'_s [N]	F_{PS}/T'_s [-]	P'_s [W]
1	3,40	1,20	0,02	0,30	0,07	4,21	0,12
2	18,70	1,20	0,12	1,94	2,16	0,90	20,19
3	34,00	1,20	0,21	6,53	7,14	0,91	121,33
4	3,40	3,55	0,06	0,49	0,21	2,31	0,36
5	18,70	3,55	0,34	5,25	6,39	0,82	59,72
6	34,00	3,55	0,62	22,13	21,11	1,05	358,94
7	3,40	5,90	0,10	0,62	0,35	1,77	0,60
8	18,70	5,90	0,57	13,41	10,62	1,26	99,25
9	34,00	5,90	1,03	44,18	35,09	1,26	596,55

Tab. G.2. Punkty weryfikacyjne dla wariantu $h_{SP}= 35,1$ mm.

<i>Lp.</i>	v_s [m/s]	w_s [mm]	m'_s [kg/s]	F_{PS} [N]	T'_s [N]	F_{PS}/T'_s [-]	P'_s [W]
1	8,86	1,97	0,09	0,79	0,80	1,00	3,53
2	6,69	4,15	0,14	6,47	0,95	6,79	3,19
3	30,66	4,13	0,65	21,89	19,99	1,09	306,54
4	7,27	5,17	0,19	1,68	1,40	1,20	5,10
5	29,48	1,86	0,28	7,87	8,33	0,94	122,75
6	22,37	5,46	0,63	17,12	14,07	1,22	157,40
7	23,11	1,26	0,15	3,14	3,47	0,90	40,06
8	13,23	5,29	0,36	5,76	4,76	1,21	31,50
9	30,42	2,71	0,42	12,81	12,89	0,99	196,13
10	29,79	5,26	0,81	28,68	24,02	1,19	357,74
11	17,22	5,33	0,47	9,82	8,14	1,21	70,11
12	25,63	1,74	0,23	5,51	5,88	0,94	75,29
13	4,45	2,99	0,07	0,57	0,30	1,88	0,68
14	3,43	5,31	0,09	0,58	0,32	1,82	0,55
15	33,83	2,96	0,52	17,59	17,45	1,01	295,22
16	14,79	1,25	0,09	1,22	1,40	0,87	10,37
17	30,34	4,71	0,73	25,47	22,29	1,14	338,04
18	7,01	3,53	0,13	1,01	0,89	1,13	3,12
19	25,90	5,36	0,71	22,32	18,52	1,21	239,84
20	7,07	2,43	0,09	0,80	0,62	1,29	2,21

Tab. G.3. Punkty doskonalenia powierzchni odpowiedzi dla wariantu $h_{SP}= 35,1$ mm.

$Lp.$	v_s [m/s]	w_s [mm]	m'_s [kg/s]	F_{PS} [N]	T'_s [N]	F_{PS}/T'_s [-]	P'_s [W]
1	11,05	1,20	0,07	0,66	0,75	0,88	4,16
2	26,35	2,38	0,32	8,27	8,48	0,97	111,78
3	11,05	4,72	0,27	3,45	2,97	1,16	16,40
4	26,35	5,90	0,80	26,58	21,08	1,26	277,69
5	3,40	2,41	0,04	0,44	0,14	3,06	0,24
6	34,00	4,66	0,81	31,49	27,70	1,14	470,86
7	12,42	2,58	0,16	2,05	2,05	1,00	12,70
8	26,35	3,82	0,52	14,63	13,64	1,07	179,72
9	27,56	1,20	0,17	4,25	4,69	0,91	64,62
10	20,18	4,86	0,50	11,81	10,18	1,16	102,66
11	26,73	4,82	0,66	20,48	17,74	1,15	237,03
12	10,51	3,63	0,20	2,22	2,06	1,08	10,84
13	11,05	5,90	0,34	4,73	3,71	1,27	20,48
14	22,97	2,83	0,33	7,74	7,68	1,01	88,24
15	3,40	4,73	0,08	0,64	0,28	2,26	0,48
16	15,76	4,74	0,38	6,99	6,05	1,15	47,71
17	14,91	1,82	0,14	1,97	2,08	0,95	15,51
18	34,00	2,37	0,42	13,74	14,13	0,97	240,13
19	29,69	3,36	0,51	15,81	15,23	1,04	226,16
20	21,47	4,11	0,45	10,67	9,74	1,10	104,51
21	29,52	5,90	0,90	33,34	26,46	1,26	390,53
22	24,28	3,35	0,42	10,56	10,17	1,04	123,51
23	13,51	4,14	0,29	4,32	3,89	1,11	26,30
24	16,87	2,45	0,21	3,54	3,59	0,99	30,26
25	23,25	4,74	0,57	15,12	13,17	1,15	153,09
26	3,40	1,81	0,03	0,36	0,11	3,39	0,18
27	14,87	5,90	0,45	8,51	6,72	1,27	49,95
28	34,00	1,81	0,32	10,16	10,74	0,95	182,66
29	34,00	5,14	0,90	36,14	30,60	1,18	520,12
30	8,42	2,98	0,13	1,11	1,09	1,02	4,58
31	15,19	2,95	0,23	3,56	3,50	1,02	26,57
32	7,01	5,90	0,21	1,90	1,49	1,28	5,23
33	21,47	1,95	0,22	4,40	4,62	0,95	49,63
34	7,46	1,20	0,05	0,42	0,34	1,24	1,28
35	18,43	4,40	0,42	8,62	7,69	1,12	70,85
36	26,49	2,92	0,40	10,63	10,56	1,01	139,89
37	19,83	2,67	0,27	5,41	5,41	1,00	53,64
38	13,67	3,66	0,26	3,76	3,52	1,07	24,06
39	11,66	3,14	0,19	2,29	2,20	1,04	12,82
40	20,78	2,32	0,25	5,02	5,15	0,98	53,47
41	3,40	5,31	0,09	0,58	0,32	1,83	0,54
42	3,40	2,90	0,05	0,43	0,17	2,47	0,29
43	24,55	4,22	0,53	14,46	13,09	1,10	160,67
44	23,13	1,20	0,14	2,97	3,30	0,90	38,20

45	31,54	5,49	0,89	34,23	28,11	1,22	443,38
46	15,27	5,32	0,42	7,71	6,38	1,21	48,74
47	17,53	2,82	0,25	4,50	4,45	1,01	39,02
48	3,40	4,11	0,07	0,51	0,24	2,09	0,42
49	30,22	2,64	0,41	12,26	12,40	0,99	187,29
50	16,42	4,06	0,34	6,19	5,64	1,10	46,31
51	34,00	5,46	0,96	39,38	32,48	1,21	552,16
52	15,38	3,35	0,27	4,26	4,08	1,04	31,37
53	34,00	2,96	0,52	17,76	17,62	1,01	299,53
54	5,43	1,50	0,04	0,46	0,23	2,03	0,62
55	7,88	5,22	0,21	2,01	1,67	1,21	6,56
56	22,63	4,40	0,51	13,00	11,60	1,12	131,32
57	24,56	2,98	0,38	9,37	9,26	1,01	113,78
58	34,00	4,21	0,74	27,54	25,05	1,10	425,84
59	6,84	3,83	0,13	1,07	0,92	1,16	3,16
60	18,12	1,97	0,18	3,18	3,33	0,96	30,12
61	15,52	3,79	0,30	5,05	4,69	1,08	36,41
62	14,87	1,20	0,09	1,18	1,37	0,86	10,16
63	31,40	5,90	0,95	37,70	29,92	1,26	469,79
64	30,78	1,20	0,19	5,36	5,85	0,92	90,02
65	25,69	3,55	0,47	12,67	12,04	1,05	154,68
66	5,20	5,61	0,15	0,97	0,78	1,24	2,03
67	14,62	2,50	0,19	2,73	2,75	0,99	20,08
68	20,68	5,42	0,58	14,48	11,93	1,21	123,32
69	20,00	3,06	0,31	6,42	6,30	1,02	63,00
70	20,76	4,40	0,47	10,92	9,75	1,12	101,15
71	13,71	3,17	0,22	3,18	3,07	1,04	21,03
72	23,59	3,82	0,46	11,75	10,95	1,07	129,13
73	22,66	5,90	0,69	19,67	15,58	1,26	176,54
74	16,11	4,40	0,36	6,61	5,88	1,12	47,35
75	20,92	1,20	0,13	2,43	2,70	0,90	28,24
76	21,61	2,58	0,29	6,14	6,19	0,99	66,93
77	9,60	1,94	0,10	0,88	0,92	0,96	4,41
78	3,40	5,02	0,09	0,56	0,30	1,89	0,51
79	9,45	4,22	0,21	2,18	1,94	1,12	9,18
80	32,68	5,30	0,89	34,87	29,14	1,20	476,08
81	21,52	3,79	0,42	9,66	9,02	1,07	97,06
82	29,47	1,87	0,28	7,89	8,35	0,95	123,07
83	7,26	2,41	0,09	0,83	0,65	1,27	2,38
84	30,46	4,84	0,76	26,69	23,11	1,15	352,06
85	7,09	4,66	0,17	1,15	1,21	0,96	4,28
86	18,12	5,19	0,48	10,46	8,77	1,19	79,44
87	12,15	3,45	0,22	2,77	2,62	1,06	15,92
88	27,33	3,27	0,46	12,98	12,58	1,03	171,91
89	9,25	1,42	0,07	0,60	0,63	0,96	2,90
90	17,57	3,14	0,28	5,11	4,98	1,03	43,77
91	21,68	3,37	0,38	8,46	8,14	1,04	88,20
92	9,70	5,53	0,28	3,32	2,68	1,24	12,98

93	6,50	1,95	0,07	0,63	0,42	1,48	1,38
94	27,87	5,37	0,77	25,89	21,48	1,21	299,27
95	29,17	1,49	0,22	6,05	6,52	0,93	95,15
96	12,31	3,89	0,25	3,31	3,03	1,09	18,67
97	30,27	3,97	0,62	20,28	18,73	1,08	283,38
98	4,50	4,42	0,10	0,72	0,46	1,57	1,03
99	19,59	4,17	0,42	9,07	8,23	1,10	80,64
100	15,91	2,69	0,22	3,52	3,51	1,00	27,88
101	18,21	3,97	0,37	7,37	6,77	1,09	61,67
102	32,56	5,70	0,96	38,55	31,13	1,24	506,81
103	5,79	5,04	0,15	1,08	0,87	1,25	2,51
104	3,40	2,11	0,04	0,45	0,13	3,56	0,21
105	24,87	2,64	0,34	8,33	8,40	0,99	104,46
106	27,84	4,33	0,62	19,24	17,29	1,11	240,72
107	9,87	3,92	0,20	2,16	1,97	1,10	9,70
108	20,68	5,90	0,63	16,40	12,98	1,26	134,21
109	13,65	4,98	0,35	5,63	4,78	1,18	32,59
110	14,37	2,15	0,16	2,22	2,29	0,97	16,43
111	21,72	3,10	0,35	7,68	7,53	1,02	81,76
112	3,40	1,50	0,03	0,33	0,09	3,70	0,15
113	13,78	4,52	0,32	5,02	4,41	1,14	30,41
114	32,39	1,50	0,25	7,54	8,11	0,93	131,41
115	5,75	3,23	0,10	0,86	0,55	1,57	1,58
116	29,93	5,27	0,81	29,02	24,29	1,19	363,45
117	8,32	5,71	0,24	2,55	2,03	1,26	8,45
118	23,01	4,17	0,49	12,49	11,34	1,10	130,49
119	12,03	1,65	0,10	1,13	1,23	0,92	7,39
120	13,84	3,41	0,24	3,54	3,36	1,05	23,28
121	19,91	3,90	0,40	8,60	7,95	1,08	79,18
122	6,75	4,23	0,15	1,10	0,99	1,11	3,34
123	25,37	1,74	0,23	5,40	5,76	0,94	73,03
124	24,38	5,44	0,68	20,21	16,64	1,21	202,85
125	6,01	2,78	0,09	0,74	0,52	1,42	1,55
126	34,00	3,88	0,68	24,79	23,08	1,07	392,39
127	18,62	2,97	0,28	5,38	5,30	1,01	49,37
128	12,90	5,56	0,37	5,89	4,76	1,24	30,71
129	16,43	3,56	0,30	5,23	4,94	1,06	40,61
130	5,12	1,20	0,03	0,40	0,16	2,48	0,42
131	19,03	3,28	0,32	6,32	6,11	1,03	58,10
132	9,90	4,50	0,23	2,60	2,27	1,15	11,24
133	7,66	1,66	0,07	0,63	0,50	1,26	1,92
134	24,79	5,79	0,74	22,87	18,30	1,25	226,87
135	31,26	2,22	0,36	10,76	11,17	0,96	174,63
136	31,30	4,40	0,71	24,83	22,18	1,12	347,14
137	5,28	5,90	0,16	1,06	0,85	1,25	2,24
138	3,40	3,23	0,06	0,47	0,19	2,46	0,33
139	17,92	4,84	0,45	9,28	8,00	1,16	71,65
140	21,33	1,56	0,17	3,37	3,65	0,93	38,88

141	20,21	3,47	0,36	7,64	7,29	1,05	73,67
142	3,40	3,84	0,07	0,50	0,23	2,19	0,39
143	16,85	5,74	0,50	10,48	8,39	1,25	70,72
144	9,25	4,94	0,24	2,57	2,17	1,18	10,06
145	9,75	2,56	0,13	1,23	1,25	0,98	6,11
146	26,19	5,18	0,70	21,70	18,27	1,19	239,22
147	14,99	3,56	0,27	4,37	4,12	1,06	30,85
148	17,18	3,78	0,33	6,16	5,74	1,07	49,30
149	8,26	3,40	0,14	1,28	1,19	1,07	4,92
150	5,07	4,66	0,12	0,88	0,62	1,42	1,56
151	21,41	3,57	0,39	8,89	8,43	1,06	90,20
152	5,07	4,17	0,11	0,78	0,55	1,41	1,40
153	8,08	2,13	0,09	0,79	0,72	1,11	2,89
154	3,40	5,59	0,10	0,60	0,33	1,80	0,57
155	16,88	3,34	0,29	5,10	4,90	1,04	41,33
156	9,87	5,23	0,27	3,17	2,62	1,21	12,92
157	18,77	3,77	0,36	7,32	6,83	1,07	64,13
158	20,48	3,26	0,34	7,26	7,03	1,03	72,04
159	5,56	3,56	0,10	0,75	0,57	1,32	1,58
160	5,03	2,54	0,07	0,59	0,33	1,77	0,83
161	20,19	3,68	0,38	8,22	7,73	1,06	78,01
162	10,99	2,36	0,13	1,41	1,47	0,96	8,06
163	6,11	4,46	0,14	22,86	0,86	26,65	2,62
164	23,19	3,57	0,43	10,40	9,87	1,05	114,42
165	5,71	2,30	0,07	0,63	0,39	1,63	1,10
166	11,23	2,84	0,16	1,86	1,84	1,01	10,32
167	11,62	2,20	0,13	1,47	1,52	0,96	8,86
168	9,61	2,28	0,11	1,05	1,08	0,97	5,21
169	6,74	5,42	0,19	1,54	1,26	1,22	4,26
170	28,30	2,72	0,40	11,17	11,22	1,00	158,72
171	19,88	5,12	0,52	12,33	10,41	1,18	103,45
172	6,71	2,16	0,07	0,70	0,50	1,39	1,68
173	11,77	4,14	0,25	3,28	2,95	1,11	17,35
174	12,39	5,16	0,33	4,88	4,07	1,20	25,23
175	30,06	4,58	0,71	24,15	21,32	1,13	320,41
176	17,02	1,55	0,14	2,15	2,32	0,93	19,73
177	4,52	3,39	0,08	0,63	0,36	1,76	0,81
178	16,05	3,14	0,26	4,28	4,16	1,03	33,39
179	8,09	4,06	0,17	1,49	1,36	1,09	5,52
180	5,23	5,29	0,14	1,03	0,74	1,38	1,95
181	16,74	5,03	0,43	8,56	7,25	1,18	60,69
182	32,67	3,72	0,62	21,66	20,40	1,06	333,14
183	4,60	3,06	0,07	0,61	0,33	1,82	0,76
184	10,89	5,02	0,28	3,64	3,06	1,19	16,66
185	12,80	2,95	0,19	2,54	2,48	1,03	15,87
186	11,49	4,40	0,26	3,39	2,99	1,13	17,18
187	5,07	3,90	0,10	0,70	0,52	1,36	1,31
188	8,26	5,45	0,23	2,35	1,91	1,23	7,91

189	8,51	3,76	0,16	1,49	1,40	1,06	5,97
190	4,25	5,17	0,11	0,77	0,48	1,61	1,02
191	13,88	5,22	0,37	6,21	5,17	1,20	35,91
192	8,77	4,69	0,21	2,16	1,86	1,16	8,14
193	7,56	2,67	0,10	0,88	0,79	1,13	2,97
194	4,08	3,98	0,08	0,57	0,34	1,66	0,69
195	15,09	4,21	0,33	5,47	4,93	1,11	37,16
196	6,73	3,41	0,12	1,06	0,80	1,33	2,68
197	11,96	3,67	0,23	2,91	2,70	1,08	16,14
198	12,21	4,89	0,31	4,40	3,75	1,17	22,87
199	6,23	4,03	0,13	1,05	0,80	1,31	2,51
200	34,00	3,26	0,57	19,94	19,37	1,03	329,23
201	13,45	4,75	0,33	5,12	4,42	1,16	29,73
202	9,99	3,09	0,16	1,63	1,58	1,03	7,91
203	7,42	4,96	0,19	1,65	1,40	1,18	5,20
204	4,73	2,86	0,07	0,57	0,33	1,75	0,78
205	4,51	4,87	0,11	0,75	0,51	1,46	1,15
206	11,04	3,82	0,22	2,62	2,40	1,09	13,24
207	7,57	3,59	0,14	1,13	1,06	1,07	4,01
208	8,28	4,41	0,19	1,77	1,56	1,13	6,45
209	26,09	5,44	0,73	23,11	19,06	1,21	248,58
210	5,03	2,07	0,05	0,53	0,27	1,96	0,68
211	12,76	5,90	0,39	6,29	4,95	1,27	31,57
212	30,10	3,62	0,56	17,78	16,86	1,05	253,68
213	25,14	4,63	0,60	17,16	15,07	1,14	189,50
214	10,35	1,70	0,09	0,88	0,94	0,94	4,85
215	31,97	4,97	0,82	30,44	26,12	1,17	417,44
216	29,57	4,33	0,66	21,67	19,49	1,11	288,27
217	19,11	4,65	0,46	9,99	8,74	1,14	83,56
218	6,25	4,84	0,16	1,18	0,97	1,21	3,04
219	3,60	2,66	0,05	0,47	0,18	2,64	0,32
220	4,39	5,45	0,12	0,83	0,54	1,54	1,18
221	14,63	3,98	0,30	4,79	4,38	1,09	32,08
222	11,33	5,37	0,31	4,32	3,54	1,22	20,06
223	9,15	3,57	0,17	1,62	1,54	1,05	7,04
224	6,74	3,02	0,10	0,82	0,71	1,16	2,38
225	10,30	4,86	0,26	3,12	2,66	1,18	13,69
226	8,29	4,23	0,18	1,67	1,50	1,12	6,20
227	4,34	5,76	0,13	0,85	0,56	1,52	1,21
228	7,41	3,19	0,12	1,08	0,90	1,20	3,34
229	5,75	3,75	0,11	0,72	0,64	1,14	1,83
230	6,86	5,12	0,18	1,48	1,24	1,19	4,26
231	12,89	4,34	0,29	4,18	3,71	1,13	23,91
232	6,75	5,66	0,20	1,66	1,33	1,25	4,48
233	14,82	4,40	0,34	5,60	4,97	1,13	36,86
234	14,05	4,32	0,31	4,92	4,39	1,12	30,82
235	12,31	4,60	0,29	4,12	3,58	1,15	22,05

Załącznik H

Zestawienie wyników symulacji dla wariantu $h_{SP}=17,5$ mm.

Tab. H.1. Punkty DOE dla wariantu $h_{SP}=17,5$ mm.

<i>Lp.</i>	v_s [m/s]	w_s [mm]	m'_s [kg/s]	F_{PS} [N]	T'_s [N]	F_{PS}/T'_s [-]	P'_s [W]
1	3,40	0,60	0,01	0,16	0,04	4,57	0,06
2	18,70	0,60	0,06	1,00	1,08	0,92	10,09
3	34,00	0,60	0,10	3,24	3,57	0,91	60,67
4	3,40	1,75	0,03	0,20	0,10	1,96	0,18
5	18,70	1,75	0,17	3,38	3,15	1,07	29,44
6	34,00	1,75	0,31	10,96	10,41	1,05	176,94
7	3,40	2,90	0,05	0,30	0,17	1,73	0,29
8	18,70	2,90	0,28	6,61	5,22	1,27	48,78
9	34,00	2,90	0,51	21,65	17,25	1,26	293,22

Tab. H.2. Punkty weryfikacyjne dla wariantu $h_{s'} = 17,5$ mm.

<i>Lp.</i>	v_s [m/s]	w_s [mm]	m'_s [kg/s]	F_{PS} [N]	T'_s [N]	F_{PS}/T'_s [-]	P'_s [W]
1	26,38	2,32	0,32	9,58	8,32	1,15	109,70
2	11,05	1,18	0,07	0,73	0,74	0,98	4,10
3	26,27	1,17	0,16	4,12	4,17	0,99	54,77
4	11,05	2,35	0,13	1,71	1,47	1,16	8,14
5	33,98	1,17	0,21	6,85	6,98	0,98	118,56
6	18,69	2,33	0,22	4,85	4,18	1,16	39,03
7	26,34	1,75	0,24	6,61	6,23	1,06	82,08
8	18,68	1,17	0,11	2,10	2,11	1,00	19,69
9	26,47	0,61	0,08	2,00	2,18	0,92	28,89
10	33,90	2,33	0,41	15,74	13,75	1,15	233,01
11	10,90	1,76	0,10	1,16	1,07	1,08	5,86
12	3,45	2,31	0,04	0,38	0,14	2,69	0,24
13	3,57	1,16	0,02	0,21	0,08	2,72	0,14
14	11,19	0,62	0,04	0,37	0,40	0,92	2,24
15	26,19	2,88	0,39	12,79	10,17	1,26	133,25
16	10,99	2,89	0,16	2,28	1,80	1,27	9,88
17	30,14	1,46	0,23	6,94	6,83	1,02	102,94
18	22,58	2,03	0,24	5,93	5,33	1,11	60,22
19	7,26	1,46	0,05	0,45	0,40	1,14	1,44
20	22,55	0,88	0,10	2,19	2,29	0,96	25,85

Tab. H.3. Punkty doskonalenia powierzchni odpowiedzi dla wariantu $h_{sp}=17,5$ mm.

$Lp.$	v_s [m/s]	w_s [mm]	m'_s [kg/s]	F_{PS} [N]	T'_s [N]	F_{PS}/T'_s [-]	P'_s [W]
1	26,35	2,32	0,32	9,57	8,31	1,15	109,43
2	11,05	1,18	0,07	0,73	0,74	0,99	4,08
3	26,35	1,17	0,16	4,15	4,20	0,99	55,30
4	11,05	2,32	0,13	1,69	1,46	1,16	8,07
5	26,35	1,75	0,24	6,64	6,25	1,06	82,36
6	11,05	0,60	0,03	0,35	0,38	0,92	2,08
7	26,35	0,60	0,08	1,96	2,14	0,91	28,24
8	3,40	1,18	0,02	0,19	0,07	2,69	0,12
9	18,70	2,33	0,22	4,85	4,18	1,16	39,11
10	26,35	2,90	0,39	13,06	10,36	1,26	136,49
11	34,00	2,33	0,41	15,83	13,83	1,14	235,08
12	34,00	1,17	0,21	6,86	6,99	0,98	118,80
13	3,40	2,33	0,04	0,37	0,14	2,70	0,24
14	18,70	1,17	0,11	2,10	2,11	1,00	19,77
15	11,05	2,90	0,16	2,31	1,82	1,27	10,07
16	11,05	1,75	0,10	1,18	1,10	1,08	6,07
17	7,22	0,89	0,03	0,29	0,24	1,23	0,86
18	22,52	2,61	0,30	8,24	6,82	1,21	76,81
19	30,17	0,78	0,12	3,40	3,64	0,94	54,85
20	30,17	1,57	0,24	7,62	7,37	1,03	111,24
21	7,22	2,61	0,10	0,85	0,70	1,21	2,53
22	7,30	0,60	0,02	0,19	0,16	1,14	0,60
23	30,17	2,90	0,45	17,08	13,59	1,26	204,97
24	7,22	1,46	0,05	0,45	0,39	1,15	1,42
25	3,40	2,04	0,04	0,23	0,12	1,89	0,21
26	14,88	2,04	0,16	2,59	2,32	1,11	17,25
27	22,52	0,89	0,10	2,22	2,32	0,96	26,09
28	30,18	2,04	0,32	10,53	9,55	1,10	144,01
29	14,88	2,61	0,20	3,60	2,97	1,21	22,12
30	34,00	0,89	0,16	4,99	5,28	0,94	89,73
31	3,40	2,61	0,05	0,27	0,16	1,74	0,26
32	34,00	2,61	0,46	18,59	15,54	1,20	264,15
33	3,40	0,89	0,02	0,18	0,05	3,48	0,09
34	22,53	1,46	0,17	3,94	3,82	1,03	43,00
35	14,87	0,89	0,07	0,95	1,01	0,94	7,51
36	7,22	1,89	0,07	0,55	0,51	1,09	1,84
37	18,70	2,61	0,25	5,69	4,70	1,21	43,95
38	34,00	2,02	0,35	13,17	12,03	1,10	204,44
39	14,87	1,46	0,11	1,72	1,66	1,04	12,38
40	30,18	1,08	0,17	4,92	5,06	0,97	76,28
41	7,22	2,21	0,08	0,67	0,59	1,13	2,14
42	3,40	1,46	0,03	0,19	0,09	2,24	0,15
43	5,31	2,52	0,07	0,49	0,37	1,34	0,97
44	6,56	2,37	0,08	0,61	0,53	1,15	1,73
45	5,64	2,05	0,06	0,46	0,34	1,36	0,94

46	7,22	2,30	0,09	0,71	0,62	1,15	2,23
47	5,86	2,16	0,07	0,49	0,38	1,28	1,12
48	6,22	2,10	0,07	0,48	0,42	1,14	1,30
49	6,84	2,15	0,08	0,57	0,52	1,11	1,77
50	6,56	2,25	0,08	0,56	0,50	1,12	1,64
51	7,23	1,18	0,04	0,38	0,32	1,20	1,14
52	28,27	2,61	0,38	12,91	10,74	1,20	151,82
53	30,55	0,60	0,09	2,62	2,88	0,91	44,01
54	7,23	2,90	0,11	0,99	0,78	1,27	2,81
55	11,05	1,46	0,08	0,95	0,92	1,04	5,08
56	26,35	2,61	0,35	11,23	9,33	1,20	122,96
57	29,54	2,56	0,39	13,72	11,51	1,19	170,02
58	31,36	2,40	0,39	14,10	12,15	1,16	190,51
59	31,74	1,36	0,22	7,08	7,03	1,01	111,53
60	8,18	1,68	0,07	0,62	0,58	1,06	2,36
61	31,66	1,86	0,30	10,29	9,60	1,07	151,90
62	31,59	2,68	0,44	16,67	13,75	1,21	217,25
63	31,96	2,19	0,36	12,95	11,51	1,12	183,98
64	31,91	1,68	0,28	9,22	8,82	1,05	140,70
65	31,75	2,54	0,41	15,64	13,17	1,19	209,10
66	31,22	1,77	0,28	9,38	8,87	1,06	138,44
67	22,53	2,04	0,24	5,92	5,32	1,11	59,90
68	11,05	0,89	0,05	0,54	0,56	0,97	3,08
69	14,87	2,90	0,22	4,18	3,30	1,27	24,55
70	3,40	1,89	0,03	0,22	0,11	1,94	0,19
71	22,53	0,60	0,07	1,44	1,57	0,92	17,64
72	3,40	2,76	0,05	0,28	0,16	1,69	0,28
73	34,00	1,51	0,26	9,18	9,00	1,02	153,02
74	32,09	2,83	0,47	18,64	15,01	1,24	240,74
75	11,05	2,04	0,12	1,43	1,28	1,12	7,07
76	18,70	1,46	0,14	2,72	2,63	1,03	24,60
77	14,88	0,60	0,05	0,61	0,68	0,89	5,08
78	26,64	1,46	0,20	5,46	5,34	1,02	71,10
79	11,05	2,61	0,15	1,99	1,64	1,21	9,07
80	22,52	2,90	0,34	9,58	7,57	1,27	85,26
81	5,31	1,32	0,04	0,29	0,19	1,51	0,51
82	18,70	2,04	0,20	4,09	3,67	1,11	34,28
83	3,90	2,18	0,04	0,29	0,17	1,67	0,33
84	14,87	1,18	0,09	1,34	1,34	1,00	9,95
85	29,14	2,26	0,34	11,21	9,86	1,14	143,65
86	26,64	0,89	0,12	3,09	3,24	0,95	43,15
87	3,40	2,49	0,04	0,27	0,15	1,80	0,25
88	18,70	0,89	0,09	1,53	1,60	0,96	14,93
89	34,00	2,74	0,48	19,91	16,28	1,22	276,76
90	5,31	1,03	0,03	0,24	0,15	1,62	0,40
91	26,35	2,04	0,28	8,06	7,28	1,11	95,90
92	14,87	1,75	0,13	2,14	1,99	1,07	14,82
93	34,00	0,76	0,13	4,22	4,54	0,93	77,12

94	16,79	2,76	0,24	4,95	4,00	1,24	33,55
95	5,79	1,71	0,05	0,43	0,30	1,44	0,86
96	9,11	2,90	0,14	1,57	1,24	1,27	5,64
97	14,87	2,33	0,18	3,07	2,65	1,16	19,69
98	22,52	1,17	0,14	3,04	3,07	0,99	34,54
99	3,40	1,61	0,03	0,20	0,10	2,09	0,16
100	5,00	2,65	0,07	0,47	0,34	1,38	0,85
101	5,35	0,74	0,02	0,19	0,11	1,72	0,29
102	32,51	1,03	0,17	5,41	5,61	0,96	91,17
103	28,72	1,86	0,27	8,48	7,89	1,07	113,32
104	22,52	2,33	0,27	7,03	6,07	1,16	68,36
105	16,79	0,74	0,06	1,02	1,08	0,95	9,05
106	12,96	1,61	0,11	1,47	1,39	1,06	9,00
107	22,53	1,75	0,20	4,89	4,57	1,07	51,45
108	7,23	1,32	0,05	0,41	0,35	1,16	1,28
109	4,21	2,55	0,06	0,36	0,23	1,56	0,49
110	28,45	0,60	0,09	2,28	2,50	0,91	35,54
111	16,79	1,03	0,09	1,47	1,50	0,98	12,55
112	12,96	1,89	0,13	1,79	1,64	1,09	10,61
113	20,61	2,76	0,29	7,46	6,03	1,24	62,10
114	34,00	2,47	0,43	17,18	14,68	1,17	249,61
115	9,18	0,60	0,03	0,24	0,26	0,93	1,19
116	32,07	1,54	0,25	8,33	8,13	1,02	130,35