

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE  
STAVEBNÁ FAKULTA

Evidenčné číslo: SvF-16645-114878

AERODYNAMIKA V OKOLÍ CYKLISTU/CYKLISTKY

Bakalárska práca

2024

Ema Podhorná

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE  
STAVEBNÁ FAKULTA

AERODYNAMIKA V OKOLÍ CYKLISTU/CYKLISTKY  
Bakalárska práca

Študijný program: Matematicko-počítačové modelovanie  
Študijný odbor: 9.1.9. Aplikovaná matematika  
Školiace pracovisko: Katedra matematiky a deskriptívnej geometrie  
Školiteľ: Ing. Marek Macák, PhD.

**Bratislava 2024**

**Ema Podhorná**



## ZADANIE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

Študentka: **Ema Podhorná**  
ID študenta: 114878  
Študijný program: matematicko-počítačové modelovanie  
Študijný odbor: matematika  
Vedúci práce: Ing. Marek Macák, PhD.  
Vedúci pracoviska: Ing. Marek Macák, PhD.

Názov práce: **Aerodynamika v okolí cyklistu/cyklistky**

Jazyk, v ktorom sa práca vypracuje: slovenský jazyk

Špecifikácia zadania:

Navrhovaná práca sa bude venovať modelom prúdenia aplikovaných v športovej praxi. Úlohou študenta/študentky bude vypočítať odpor vzduchu pre polohu cyklistu alebo skupiny cyklistov.

Rozsah práce: 30

Zoznam odbornej literatúry:

1. ANSYS : Fluent Theory Guide. ANSYS Release: 15.0, Published Date: November, 2013.
2. ANSYS : Fluent Tutorial Guide. ANSYS Release: 15.0, Published Date: November, 2013.
3. Defraeye, T.; Blocken, B.; Koninckx, E.; et al. Aerodynamic study of different cyclist positions: CFD analysis and full-scale wind-tunnel tests. *J. Biomech.* 2012, 43, 1262–1268.
4. Defraeye, T.; Blocken, B.; Koninckx, E.; Hespel, P.; Carmeliet, J. Computational fluid dynamics analysis of cyclist aerodynamics: Performance of different turbulence-modelling and boundary-layer modelling approaches. *J. Biomech.* 2010, 43, 2281–2287.

Termín odovzdania bakalárskej práce: 02. 05. 2024

Dátum schválenia zadania bakalárskej práce: 09. 04. 2024

Zadanie bakalárskej práce schválil: prof. RNDr. Karol Mikula, DrSc. – garant študijného programu

## Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že som túto záverečnú prácu vypracovala samostatne pod vedením vedúceho záverečnej práce, s použitím literatúry uvedenej v zozname použitej literatúry.

Bratislava 30. 4. 2024

Ema Podhorná

## **Pod'akovanie**

Chcela by som sa pod'akovať školiteľovi Ing. Marekovi Macákovi, PhD. za vedenie práce, konzultácie a ochotu, Ing. Michalovi Žeravému za pomoc pri skenovaní 3D skenerom, Ing. Anete Alexandre Ožvat za fotodokumentáciu počas skenovania, doc. Ing. Jánovi Erdélyimu, PhD. z Katedry geodézie za zapožičanie 3D skeneru a tiež všetkým, ktorí mi poskytli cenné informácie, ktoré boli dôležité pri spracovaní tejto práce.

Bratislava 30. 4. 2024

Ema Podhorná

## Abstrakt

**Názov práce:** Aerodynamika v okolí cyklistu/cyklistky

**Abstrakt:** Uvedená práca sa zaoberá prúdením vzduchu v okolí cyklistu, jeho charakteristickými vlastnosťami a špecifikami. Základom pre nami požadované výsledky je matematický model prúdenia Standard  $k - \epsilon$ , ktorý vychádza z Navier-Stokesových rovníc a pomocou softvéru ANSYS Fluent nám poskytuje numerické výsledky v podobe odporovej sily, z ktorej následne počítame odporovú plochu a kvantifikujeme tak aerodynamické vlastnosti cyklistu. V práci používame dve geometrie - zjednodušenú a komplexnú, ktorá je nsakenovaná pomocou 3D skeneru a následne upravená do podoby použiteľnej ako vstupná geometria do softvéru ANSYS Fluent. Výsledky pre zjednodušenú geometriu dostávame pre 4 rôzne výpočtové siete a pre komplexnú geometriu vyberieme parametre siete s najlepšimi vlastnosťami použité pre jednoduchú geometriu.

**Kľúčové slová:** prúdenie tekutín, cyklistika, odpor

## Abstract

**Title:** Aerodynamics around the cyclist

**Abstract:** The presented thesis deals with airflow around a cyclist, its characteristic properties and specifics. The basis for the desired outcomes is the mathematical model of flow, we specifically use the Standard  $k - \epsilon$ , derived from the Navier-Stokes equations and provided numerical results through ANSYS Fluent software in the form of drag force. We use drag force to calculate the drag area and quantify the cyclist's aerodynamic properties. Two geometries are employed in the thesis: a simplified one and a complex one, the latter being scanned using a 3D scanner and subsequently modified to be usable as an input geometry for the ANSYS Fluent software. Results for the simplified geometry are obtained for four computational meshes, while for the complex geometry, we choose the mesh parameters with the best characteristics used for the simplified geometry.

**Keywords:** fluid flow, cycling, aerodynamic drag

# Predhovor

Hlavnou motiváciou témy práce je záujem o prepojenie matematických modelov a rovníc so športom, nakoľko šport predstavuje neodmysliteľnú súčasť nášho života a vidíme, že prínos matematických poznatkov a simulácií významne ovplyvňuje športovú sféru. Cyklistika je jedným zo športov, v ktorom matematické modely a simulácie najviac ovplyvňujú vývoj športového materiálu či ideálny posed na bicykli. Aplikácia matematických poznatkov získaných počítačovými simuláciami v reálnom živote, najmä v cyklistických tréningoch a pretekoch, predstavovala hlavný dôvod pre výber témy tejto práce.

Uvedená práca sa zaoberá aerodynamikou - prúdením vzduchu v okolí cyklistu a skúma vplyvy prúdenia na cyklistu. Cieľom práce je vypočítať tzv. odporovú plochu cyklistu pri vopred definovanej rýchlosti jeho pohybu, preskúmať vplyv jemnosti siete na výsledky a porovnať výsledky pre zjednodušený model cyklistu a pre reálny model získaný pomocou 3D skenera. Práca je členená do piatich celkov. Začneme úvodom, v ktorom popíšeme problematiku práce, stav poznania uvedenej problematiky v literatúre a dostupných zdrojoch a vysvetlíme základné pojmy, s ktorými sa v práci narába. Následne odvodíme matematický model, ktorý popisuje prúdenie v okolí cyklistu. V tretej časti sa zaoberáme popisom odporovej plochy, koeficientu odporu a odporovej sily a ich významom v cyklistike. Ďalšiu časť práce predstavuje prevedenie samotného experimentu, jeho metodika a výstupy. V závere zhodnotíme výsledky experimentu a predstavíme ďalšie možnosti týkajúce sa spracovávanej problematiky.

Geometriu cyklistu pre potreby experimentu sme získali použitím 3D skeneru Shining3D EinStar. Takto nadobudnutý 3D model, resp. mračno bodov, sme následne upravili pomocou softvéru EXStar\_v1.0.6.0. Samotné prevedenie experimentu prebiehalo v softvéri ANSYS Fluent.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Matematický model a jeho odvodenie</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Špecifiká prúdenia vzduchu v cyklistike a odporová plocha</b>	<b>16</b>
3.1	Odporová plocha a koeficient odporu . . . . .	16
3.2	Špecifiká aerodynamiky v cyklistike . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Experimenty v softvéri ANSYS Fluent</b>	<b>20</b>
4.1	3D sken . . . . .	20
4.1.1	Použité zariadenie a jeho parametre . . . . .	20
4.1.2	Úprava mračna bodov a výsledný 3D model . . . . .	22
4.2	Experimenty . . . . .	23
4.2.1	Výpočet s jednoduchou geometriou . . . . .	23
4.2.2	Výpočet s komplexnou geometriou . . . . .	29
<b>5</b>	<b>Záver</b>	<b>37</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>39</b>



# Kapitola 1

## Úvod

Pojem prúdenie predstavuje základnú a neoddeliteľnú súčasť našej práce. Podľa skrípt [13] možno prúdenie definovať ako opis pohybu tekutín v priestore a čase, pričom pod pojmom tekutiny uvažujeme kvapaliny a plyny. V našej práci budeme však pracovať výlučne s prúdením vzduchu. Je veľmi dôležité poznamenať, že prúdenie tekutín je fyzikálny dej, ktorého pochopenie je v záujme mnohých praktických inžinierskych úloh. Matematické a počítačové modelovanie považujeme za jeden z nástrojov, ako takýto komplexný fyzikálny dej, akým je prúdenie, pochopiť a následne získané poznatky aplikovať do praxe.

Modely využívané pre opis prúdenia tekutiny sú do značnej miery fyzikálne či matematicky idealizované, preto je treba povedať, že reálne tekutiny splňajú tieto modely iba približne, získané a odvodené výsledky však zodpovedajú skutočným dejom [13].

Matematické modely vieme po ich odvodení softvérovo aplikovať na našu úlohu, ktorou je vypočítať odporovú plochu cyklistu pre dve rôzne geometrie (model získaný transformovaním mračna bodov zachyteného pomocou 3D skeneru a zjednodušená geometria pripomínajúca cyklistu, avšak bez bicykla či akýchkoľvek detailov) a porovnať tieto výsledky. Definícia odporovej plochy je uvedená v kapitole 3.1. Odporová plocha, resp. odporová sila zohráva významnú úlohu v úspore energie športovca - pri danej rýchlosti pohybu a v našom prípade konštantnej hustote vzduchu sú odporová plocha, resp. sila jediné parametre, ktoré možno ovplyvniť. Táto charakteristika vie ovplyvniť výkon športovca v mnohých športoch, nakoľko prúdenie tekutín ovplyvňuje veľa exteriérových športov, z interiérových športov napríklad plávanie, pri ktorom však ako tekutinu uvažujeme kvapalinu. V niektorých športoch však uvedená charakteristika ovplyvňuje výkon viac ako pri ostatných a jedným z takýchto športov je práve cyklistika. Odporová plocha priamo závisí na tvare a kvalite povrchu telesa, preto sme v posledných rokoch svedkami obrovského pokroku, čo sa týka aerodynamiky v cyklistike. Každým rokom môžeme sledovať nové tvary rámov bicyklov, prilieb, vylepšené aerodyna-

mické vlastnosti materiálov cyklistických dresov či hľadanie takej pozície na bicykli, aby cyklista ušetril čo najviac energie. Cyklista vie potom energiu ušetrenú priamo vylepšovaním vybavenia využiť v čistom výkone, čo sa následne pri určitých nemenných poveternostných podmienkach prejaví aj zvýšením rýchlosti. Treba dodať, že pokrok vo výskume, resp. neustále hľadanie čo najlepších materiálov či posedov, nie vždy vyústi do úspešného konca a využitia týchto poznatkov v praxi. Pravidlá Medzinárodnej cyklistickej únie totiž využitie niektorých materiálov či posedov na bicykli počas pretekania výslovne zakazujú, predovšetkým z hľadiska bezpečnosti.

Stav poznania v nami skúmanej oblasti je veľmi pokročilý, autori, ktorí sa venujú problematike aerodynamiky v cyklistike, skúmajú viaceré oblasti cyklistiky, kde sa dajú matematické modely ich následnou aplikáciou do praxe využiť v prospech športovcov. Skúma sa napríklad vplyv pozície v „pelotóne“ či v menšej skupine jazdcov na množstvo vynaloženej energie cyklistu, vplyv sprievodných vozidiel (áut, motoriek, v posledných rokoch aj dronov či helikoptér) na prúdenie vzduchu okolo cyklistu hlavne počas pretekov či spomínané technologické a materiálne vychytávky, ktoré však treba otestovať. Berúc do úvahy, že experimenty vo veternom tuneli sú nie vždy možné, počítačové simulácie predstavujú výborný nástroj, ako získať požadované informácie a výsledky.

Zdroje, z ktorých sme čerpali pri písaní práce, by sa dali rozdeliť do troch hlavných skupín:

- matematické modely prúdenia, ich odvodenie
- špecifiká prúdenia vzduchu v cyklistike
- modelovanie prúdenia v prostredí ANSYS Fluent

Čo sa týka prvej skupiny zdrojov, čerpali sme hlavne z prednášok predmetu Prúdenie kvapalín a plynov, kde sme si ujasnili základné pojmy, princípy a metódy prúdenia tekutín. Dôležitým zdrojom boli aj skriptá [13], kde sa zachádza do ešte väčších podrobností a napokon záverečná práca [20], kde už bola tematika prúdenia tekutín taktiež rozobraná.

Hlavné pramene druhej skupiny zdrojov tvoria vedecké články od Prof. Dr. Berta Blockena, ktorý sa výskumu v oblasti aerodynamiky v cyklistike zaoberá už od roku 2010 a spolu s ďalšími autormi významne prispel k rozvoju v tejto oblasti. V našej práci sme využili poznatky z článku [10], v ktorom sa autor sústreďuje na porovnanie viacerých cyklistických pozícií prostredníctvom počítačových simulácií a taktiež experimentov vo veternom tuneli. Článok [11] poskytuje informácie o porovnaní presnosti viacerých matematických modelov implementovaných v softvéri ANSYS Fluent s testami vo veternom tuneli a vyhodnocuje, ktorý model je najlepší pre simuláciu prúdenia v okolí cyklistu. O všeobecných trendoch a

základných poznatkoch vplývajúcich na aerodynamiku v cyklistike v priebehu desaťročí sa dozvedáme v článku [16]. V článku [9] autori zisťujú vplyv auta ako sprievodného vozidla počas cyklistických pretekov a vplyv rôznych polôh auta voči cyklistovi na odpor vzduchu pôsobiaci na cyklistu. V každom článku sme našli užitočné informácie, na ktoré sme v našej práci následne vedeli nadviazať.

Tretiu skupinu prameňov tvoria zdroje opisujúce princípy softvéru ANSYS Fluent, využitie a porovnanie jednotlivých implementovaných modelov. Využili sme oficiálny tutoriál [7] a tiež oficiálny teoretický návod [6] k softvéru ANSYS Fluent. Cenné informácie nám poskytla aj práca [19] či skriptá k počítačovému modelovaniu prúdenia, ako napríklad [8] či [14].

## Kapitola 2

# Matematický model a jeho odvodenie

V tejto kapitole si odvodíme Standard  $k-\epsilon$  model, ktorý v experimentálnej časti využívame na výpočet v softvéri ANSYS Fluent. Základné rovnice popisujúce prúdenie vychádzajú zo základných zákonov zachovania - zákon zachovania hmotnosti, inak označovaný aj ako rovnica kontinuity, zákon zachovania hybnosti a zákon zachovania energie, ktorý sa však rieši iba v tom prípade, ak je prúdenie stlačiteľné alebo zahŕňa prenos tepla [19]. Na riešenie prenosu hybnosti počas prúdenia využívame rovnicu kontinuity a zákon zachovania hybnosti. Rovnica kontinuity má tvar (2.1):

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho(x, t) \mathbf{v}(x, t)) = 0. \quad (2.1)$$

Vo vzťahu (2.1) vystupujú veličiny  $\rho(x, t)$ , čo predstavuje hustotu tekutiny a  $\mathbf{v}(x, t)$ , čo predstavuje vektor rýchlosti prúdiacej tekutiny. V našej práci uvažujeme nestlačiteľné prúdenie, tým pádom člen  $\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t}$  vystupujúci vo vzťahu (2.1) bude v tomto prípade rovný nule, resp.  $\rho = const.$ , z čoho vyplýva, že rovnica sa zjednoduší na tvar (2.2), resp. na tvar (2.3):

$$\nabla \cdot (\rho(x, t) \mathbf{v}(x, t)) = 0, \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v}(x, t) = 0. \quad (2.3)$$

Zákon zachovania hybnosti získame z platnosti 2. Newtonovho zákona a v integrálnej podobe má zákon zachovania hybnosti pre pohyblivý kontrolný objem tvar (2.4):

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega(t)} \rho(x, t) \mathbf{v}(x, t) dx = \int_{\Omega(t)} \rho(x, t) \mathbf{f}(x, t) dx + \int_{\partial\Omega(t)} \mathbf{T}(s, t, \mathbf{n}(s)) ds. \quad (2.4)$$

Vo vzťahu (2.4)  $\mathbf{f}(x, t)$  predstavuje vektor vonkajších objemových síl. Ľavá strana vzťahu (2.4) definuje rýchlosť zmeny hybnosti kontrolného objemu a zo vzťahu (2.4) vidíme, že

je rovná súčtu vonkajších objemových a vnútorných plošných síl.  $\mathbf{T}(s, t, \mathbf{n}(s))$  predstavuje hustotu plošnej sily a  $\mathbf{T}$  sa tiež nazýva aj tenzor napätí. Ak uvažujeme ideálnu tekutinu (t.j. ak za jedínú pôsobiacu povrchovú silu uvažujeme tlak  $p(s, t)$ , teda zanedbáme tangenciálne napätia v tenzore napätia a uvažujeme iba normálové napätia), tak závislosť tenzora napätí od normálového vektora  $\mathbf{n}(s)$  je vyjadrená pomocou vzťahu (2.5) za predpokladu, že tlak je v kontrolnom objeme spojito rozložený a teda v každom čase  $t$  a v každom bode hranice  $\partial\Omega(t)$  pôsobí napätie definované vzťahom (2.5):

$$\mathbf{T}(s, t, \mathbf{n}(s)) = p(s, t)(-\mathbf{n}(s)). \quad (2.5)$$

$p(s, t)$  predstavuje tlak vyjadrený skalárnou hodnotou. Normála smeruje smerom von a plošná sila pôsobí smerom dnu na plochu, preto použijeme znamienko mínus. Integrál cez hranicu  $\partial\Omega(t)$  vo vzťahu (2.4) môžeme teda nahradiť integrálom na pravej strane vzťahu (2.6):

$$\int_{\partial\Omega(t)} \mathbf{T}(s, t, \mathbf{n}(s)) ds = - \int_{\partial\Omega(t)} p(s, t) \mathbf{n}(s) ds. \quad (2.6)$$

Po dosadení pravej strany vzťahu (2.6) do vzťahu (2.4) nám na úpravu vzťahu (2.4) posluží Greenova veta v tvare (2.7) a dostávame výslednú podobu zákona zachovania hybnosti (2.8):

$$\int_{\Omega(t)} \nabla p(x, t) dx = \int_{\partial\Omega(t)} p(s, t) \mathbf{n}(s) ds, \quad (2.7)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega(t)} \rho(x, t) \mathbf{v}(x, t) dx = \int_{\Omega(t)} \rho(x, t) \mathbf{f}(x, t) dx - \int_{\Omega(t)} \nabla p(x, t) dx. \quad (2.8)$$

Z integrálnej formulácie zákona zachovania hybnosti sa následne dajú odvodiť parciálne diferenciálne rovnice pre vektorové pole rýchlosti, ktoré môžeme vo všeobecnosti nazvať Eulerove pohybové rovnice [13], v *nekonzervatívnom*, resp. *nedivergentnom* tvare sa dajú zapísať nasledovným spôsobom (2.9) (ďalej neuvádzame v zátvorke premenné jednotlivých funkcií kvôli zložitejšiemu tvaru rovníc a viacerým premenným):

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{f} - \frac{1}{\rho} \nabla p. \quad (2.9)$$

### Navier-Stokesove pohybové rovnice

Ako sme už spomínali, vo vzťahu (2.8) aj vo vzťahu (2.9) uvažujeme ideálnu kvapalinu, t.j. jediná vnútorná sila pôsobiaci v tekutine je tlak. Takýto predpoklad nie je pre prax dostatočný, nakoľko neuvažujeme vnútorné trenie či viskozitu tekutiny [13]. Hlavným rozdielom Navier-Stokesových pohybových rovníc oproti Eulerovým pohybovým rovniciam je, že v prípade Navier-Stokesových pohybových rovníc v tenzore napätia neuvažujeme nenulové iba normálové zložky napätia, ale aj tangenciálne zložky napätia. Ďalej na základe Stokesových

postulátov dostávame Navier-Stokesove rovnice pre prúdenie tekutiny v konzervatívnom tvare (2.10):

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_i \mathbf{v}) = \rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial(\lambda \nabla \cdot \mathbf{v})}{\partial x_i} + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad i = 1, 2, 3. \quad (2.10)$$

V rovniciach (2.10) vystupujú okrem už spomínaných premenných ešte koeficienty  $\lambda$  a  $\mu$ , ktoré charakterizujú viskozitu tekutiny. Ak uvažujeme iba nestlačiteľné prúdenie (čo v našej práci uvažujeme), rovnica kontinuity sa zjednoduší na tvar  $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$  a Navier-Stokesove rovnice sa po predelení  $\rho$  následne zjednodušia na tvar (2.11), v ktorom  $\nu$  (kinematická viskozita tekutiny) vzniklo na základe vzťahu  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$  a člen  $\frac{\partial(\lambda \nabla \cdot \mathbf{v})}{\partial x_i}$  vypadne kvôli  $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$ :

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = f_i + \nu \Delta v_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad i = 1, 2, 3. \quad (2.11)$$

Po odvodení základných rovníc popisujúcich prúdenie môžeme prúdenie rozdeliť na dva základné režimy [8], pričom v ďalšej časti práce budeme uvažovať iba jeden režim prúdenia, konkrétne turbulentné prúdenie. Pre tento typ prúdenia je charakteristické, že rýchlosť je náhodnou funkciou súradníc  $x, y, z$  a času  $t$  a čo sa týka difúzie a strát energie spôsobených disipáciou, oproti laminárnemu prúdeniu sú omnoho výraznejšie a jednoznačne nezanedbateľné. Turbulentné prúdenie sa tiež vyznačuje priestorovými štruktúrami - turbulentnými vírmi (tzv. „eddies”), ktoré majú rôzne veľkosti. Veľkosť najväčších vírov je označovaná ako makromierka a je určená rozmermi danej oblasti, nakoľko veľkosť žiadneho víru nemôže presiahnuť veľkosť výpočtovej oblasti. Naopak, veľkosť najmenších možných vírov je označovaná ako Kolmogorova mikromierka [20] a je určená viskozitou tekutiny. Veľké víry obsahujú určité množstvo energie a ďalej sa rozpadajú na menšie víry až pokiaľ nedosiahnu veľkosť mikromierky, pričom tieto najmenšie víry následne prostredníctvom disipácie energie na teplo zaniknú. Čo sa týka inžinierskych aplikácií, resp. prírodných dejov okolo nás, takmer všetky takéto deje sa vyznačujú turbulentným charakterom. Prechodový stav, resp. hranica medzi laminárnym a turbulentným prúdením, je definovaný pomocou tzv. **Reynoldsovho čísla**, ktoré je určené rýchlosťou tekutiny, geometrickými parametrami telesa a fyzikálnymi vlastnosťami tekutiny. Reynoldsovo číslo je definované pomocou vzťahu (2.12):

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{v D}{\nu}, \quad \mu = \rho \nu. \quad (2.12)$$

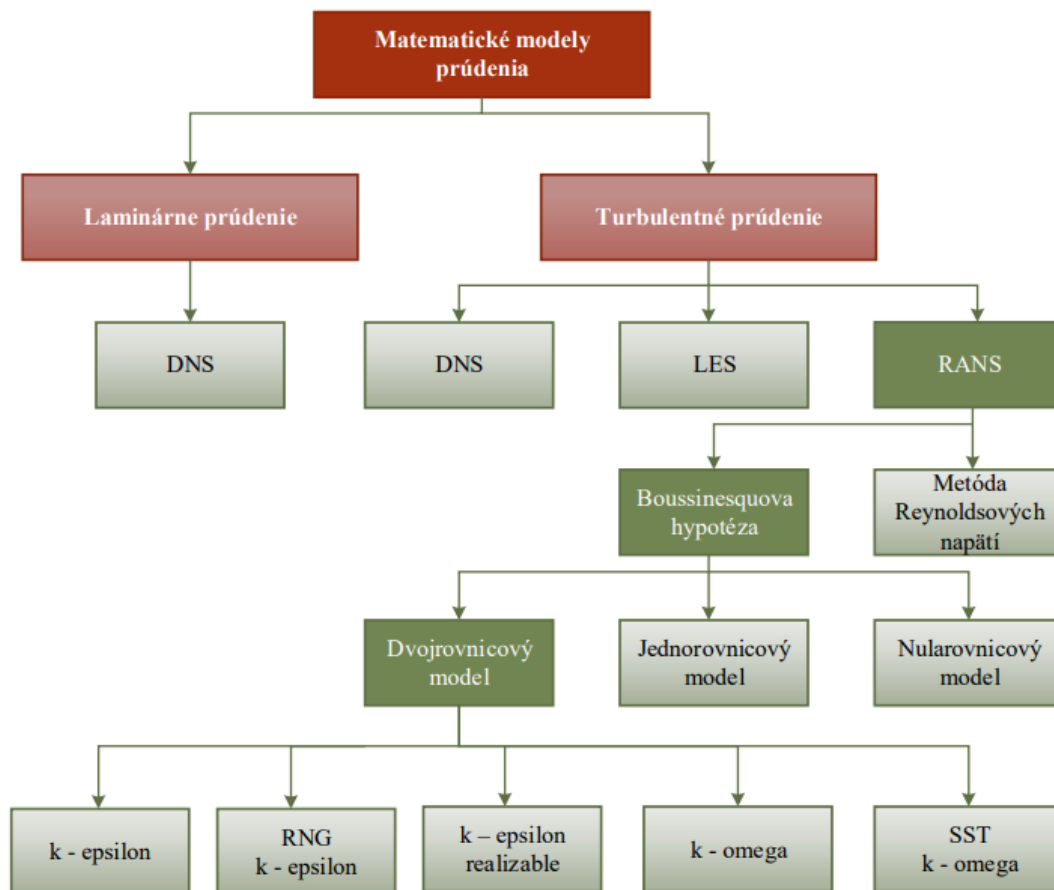
V tomto vzťahu  $\rho$  predstavuje hustotu tekutiny,  $v$  definuje rýchlosť tekutiny,  $D$  udáva charakteristický rozmer telesa a  $\mu$  s  $\nu$  predstavujú dynamickú, resp. kinematickú viskozitu tekutiny. Táto bezrozmerná charakteristika v podobe Reynoldsovho čísla nadobúda číselné hodnoty,

pričom už spomínaná hranica medzi laminárnym a turbulentným prúdením je reprezentovaná Reynoldsovým číslom s hodnotou približne 2320 [8]. Treba však podotknúť, že uvedená hodnota je platná jedine pre izotermické prúdenie nestlačiteľnej tekutiny v kruhovom potrubí. Inak táto kritická hodnota veľmi silno závisí od podmienok, za ktorých prúdenie prebieha. Aby sme dostali výsledný Standard  $k - \epsilon$  model, potrebujeme urobiť ešte niekoľko krokov. Prvým takýmto krokom je Reynoldsovo stredovanie, resp. dopracovanie sa k Reynoldsovým rovniciam. Turbulentné prúdenie má náhodný charakter. Fyzikálne veličiny ako napríklad rýchlosť, tlak alebo teplota sú teda náhodnou funkciou času. Ak však použijeme štatistické metódy, prúdenie môžeme považovať za stabilné. Pôvodné fyzikálne veličiny vystupujúce v rovnicach (2.11) nahradíme strednou hodnotou spolu s flukтуаčnou zložkou. Aplikovaním tohto princípu na Navier-Stokesove rovnice dostávame stredované Navier-Stokesove rovnice, ktoré spolu so stredovanou rovnicou kontinuity nazývame Reynoldsove rovnice. Tieto rovnice riešia stredované turbulentné prúdenie, ktoré už svojou povahou nie je náhodnou funkciou času [8]. Systém matematických rovníc, ktorý dostaneme stredovaním Navier-Stokesových rovníc, nie je uzavretý a preto treba pridať určité empirické vzťahy a dodatočné rovnice na to, aby bol systém riešiteľný. Takýto úplný riešiteľný systém nazveme modelom turbulencie. Za základ v skupine turbulentných modelov považujeme tzv. Boussinesquovu hypotézu, ktorá nám zabezpečí, že počet neznámych vzhľadom na počet rovníc sa výrazne zredukuje a ak budeme vedieť vyjadriť, resp. zadať neznámu turbulentnú viskozitu, dostaneme uzavretý systém rovníc. Turbulentné modely založené na Boussinesquovej hypotéze turbulentnej viskozity riešia hodnotu tejto turbulentnej viskozity pomocou dodatočných rovníc. Podľa počtu dodatočných rovníc delíme tieto modely na nularovnicové, jednorovnicové a dvojrovnicové. Nami používaný Standard  $k - \epsilon$  model patrí do kategórie dvojrovnicových modelov. Tento model bol navrhnutý Launderom a Spaldingom v roku 1974 [15]. Ide o jeden z najznámejších a v inžinierskych aplikáciách často používaných modelov hlavne kvôli ekonomike výpočtovej náročnosti a dostatočnej presnosti pre široký rozsah typov turbulentného prúdenia, z tohto dôvodu sme si ho zvolili pre naše výpočty aj my napriek tomu, že článok [11] vyhodnotil model *SST*  $k - \omega$  za najlepší pre počítačové simulácie prúdenia v okolí cyklistu. Rovnice odvodené pre tento model sú založené na empirickej skúsenosti a rôznych úvahách autorov modelu. Základný predpoklad tohto modelu je, že prúdenie je plne turbulentné a efekt molekularnej viskozity je zanedbateľný [19]. Názov  $k - \epsilon$  je odvodený z toho, že tento model rieši dodatočnú parciálnu diferenciálnu rovnicu pre turbulentnú kinetickú energiu  $k$  a druhú dodatočnú parciálnu diferenciálnu rovnicu pre rýchlosť disipácie  $\epsilon$  [8]. K pôvodnej sústave rovníc (3 Reynoldsove rovnice a rovnica kontinuity) pridáme ďalšie dve rovnice pre  $k$  a  $\epsilon$  [20]:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{\mathbf{v}} \cdot \nabla k = \nabla \cdot \left( c_1 \frac{k^2}{\epsilon} \nabla k \right) + \frac{2c_1 k^2}{\epsilon} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \bar{d}_{ji}^2 - \epsilon, \quad (2.13a)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \bar{\mathbf{v}} \cdot \nabla \epsilon = \nabla \cdot \left( c_2 \frac{k^2}{\epsilon} \nabla \epsilon \right) + 2c_3 k \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \bar{d}_{ji}^2 - c_4 \frac{\epsilon^2}{k}. \quad (2.13b)$$

$c_1$  až  $c_4$  predstavujú empirické konštanty, ktoré sa môžu meniť v závislosti od využitej metódy. Takýmto spôsobom dokážeme získať uzavretý systém šiestich rovníc o šiestich neznámych - trojzložkový vektor rýchlosti  $\mathbf{v}$ , tlak  $p$ , turbulentná kinetická energia  $k$  a rýchlosť disipácie  $\epsilon$ . Výsledný systém rovníc vyriešime numericky v softvéri ANSYS Fluent, kde je implementované riešenie systému na základe metódy konečných objemov. Myšlienkový postup a dopracovanie sa k Standard  $k-\epsilon$  modelu prúdenia odvodenému v tejto kapitole zachytáva nasledujúci obrázok:



Obr. 2.1: Znázornenie myšlienkového postupu dopracovania sa ku Standard  $k-\epsilon$  modelu.



## Kapitola 3

# Špecifiká prúdenia vzduchu v cyklistike a odporová plocha

### 3.1 Odporová plocha a koeficient odporu

V kapitole 4 v rámci experimentálnej časti počítame v softvéri ANSYS Fluent odporovú silu, z ktorej následne počítame odporovú plochu, preto ju v tejto kapitole zadefinujeme pomocou matematického vzorca pre lepšie pochopenie jednotlivých vzťahov medzi veličinami vstupujúcimi do matematického vzorca. Na úvod je treba podotknúť, že aerodynamický odpor má jednoznačne najvyšší podiel na odporových silách v cyklistike (napr. trenie kolies vzhľadom na cestu je pri aktuálnych materiáloch a šírke plášťov takmer zanedbateľné). Článok [16] uvádza, že pri rýchlostiach nad 40 km/h môže byť podiel aerodynamického odporu na celkových odporových silách až do 90% a zároveň telo cyklistu a vybavenie, ktoré má na sebe, ako napríklad prilba či cyklistický dres, tvoria 64%-82% celkového odporu. Samozrejme, veľa závisí aj od posedu cyklistu na bicykli či samotnej postavy cyklistu - jej tvaru, poprípade výšky. Bicykel a jeho komponenty sa podieľajú na výslednom odpore zvyšnou menšou časťou, preto aj v našom experimente bol kladený dôraz predovšetkým na kvalitnú geometriu cyklistiky, nakoľko 3D skener mal taktiež problémy so zachytením malých detailov a komponentov na bicykli.

Aerodynamické sily pôsobiace na telo cyklistu vznikajú vzájomným pôsobením tela cyklistu s prúdiacim vzduchom. Tieto sily sú tvorené tlakovým a trecím členom - výsledné sily dostaneme zintegrovaním normálových a tangenciálnych napätí pozdĺž celého povrchu tela cez infinitezimálne plošky povrchu tela. Bicykle a cyklisti patria z hľadiska aerodynamiky do kategórie tzv. „bluff bodies“, čo by sa dalo voľne preložiť ako telesá/objekty, ktoré majú taký tvar, že neumožňujú ľahké a efektívne prúdenie vzduchu okolo seba, čo vedie k vyššiemu

odporu vzduchu a vzniku vírov, pričom tlakové sily sú zvyčajne oveľa väčšie ako trecie sily. Opačom takýchto objektov sú tzv. „streamlined bodies”, ktoré sú navrhnuté tak, aby minimalizovali odpor vzduchu a umožnili plynulejší tok okolo seba. Aerodynamické sily sú tiež ovplyvnené typom prúdenia (laminárne/turbulentné). Čo sa týka aerodynamiky v okolí cyklistu, jedná sa o veľmi komplexnú problematiku nielen kvôli zložitej geometrii a charakteru „bluff body”, ale taktiež kvôli pohybujúcim sa zložkám, ako sú napríklad nohy a kolesá [16], čo sme v našej práci vzhľadom na zložitosť problému zanedbali.

V oblasti aerodynamiky v cyklistike zvyčajne rozkladáme aerodynamické sily pôsobiace na cyklistu do smerov, ktoré zodpovedajú osiam tela cyklistu. V iných aerodynamických alebo napr. leteckých aplikáciách sa používa dekompozícia v smeroch osí pôsobenia vetra. Nás bude zaujímať hlavne odporová sila, ktorá pôsobí v protismere jazdy cyklistu a je rovnobežná so zemou. Odporová sila je definovaná nasledovným vzťahom:

$$F_d = \frac{1}{2}\rho C_d A v^2. \quad (3.1)$$

V tomto vzťahu  $\rho$  predstavuje hustotu prúdiacej tekutiny (v tomto prípade vzduchu), ktorá závisí od tlaku, teploty a relatívnej vlhkosti, pričom v našej práci uvažujeme  $\rho = const.$ , nakoľko pri jazde trvajúcej niekoľko minút až hodín sa veličiny ovplyvňujúce hustotu vzduchu zvyčajne výrazne nemenia, pokiaľ nepríde k náhlej zmene počasia.  $A$  je čelná plocha, na ktorú pôsobí prúdiaca tekutina, rýchlosť prúdiacej tekutiny nám určuje  $v$ , pričom si môžeme všimnúť, že vo vzťahu vystupuje jej druhá mocnina, čo značí, že s narastajúcou rýchlosťou sa odporová sila zvyšuje kvadraticky. Posledný vystupujúci člen  $C_d$  je jeden z tých, ktorý nás spolu s čelnou plochou najviac zaujíma. Tieto dva členy vyjadríme ako jeden výsledný člen, ktorý nazveme **odporová plocha** [16]:

$$C_d A = \frac{2F_d}{\rho v^2}. \quad (3.2)$$

Tento člen sa v praktických aplikáciách používa najmä kvôli tomu, že nie je potrebné počítat čelnú plochu a taktiež poskytuje informáciu o aerodynamických vlastnostiach daného objektu, v našom prípade cyklistu. Na základe vzťahu (3.2) potom v kapitole 4 vypočítame odporovú plochu cyklistu, keďže hustota spolu s rýchlosťou cyklistu sú dané a odporovú silu numericky vypočítame v softvéri ANSYS Fluent. Keď sa pozrieme na jednotky jednotlivých veličín vystupujúcich vo vzťahu (3.2), môžeme si všimnúť, že samotný koeficient odporu  $C_d$  je bezrozmerná veličina, ktorá nám v určitom tekutom prostredí kvantifikuje odpor telesa. Jednotky veličiny  $C_d A$  budú teda v metroch štvorcových. Zo vzťahu (3.1) je dobre vidieť, že čím menší je koeficient odporu, tým menšia je aj výsledná odporová sila a teda objekty s nižším koeficientom odporu budú mať nižší aj celkový odpor v danom prostredí. V našom

prípade je čelná plocha  $A$  nemenná, preto iba koeficient odporu môže spôsobiť zmenu vo výslednej odporovej sile, avšak v reálnom živote sa zmenou pozície na bicykli či pedálovaním neustále mení aj čelná plocha.

Koeficient odporu tiež závisí od tvaru a orientácie obtekaného telesa, pričom uvedieme aj pár príkladov týchto koeficientov pre jednoduché objekty [17]:

- guľa: **0.47**
- kocka (prúdenie pôsobiacie kolmo na stenu kocky): **1.05**
- tyč (prúdenie pôsobiacie na podstavu tyče): **0.82**

### 3.2 Špecifiká aerodynamiky v cyklistike

V histórii nájdeme mnoho príkladov, kedy o víťazovi pretekov rozhodovali tisíciny sekundy či niekoľko sekúnd na viacdňových pretekoch. Ako sa môžeme dočítať v článku [16], Primož Roglič v roku 2019 vyhral na sedemdňových pretekoch Tirreno-Adriatico nad Adamom Yatesom iba s rozdielom 0,31 sekundy. Na olympijských hrách v Riu de Janeiro v roku 2016 v disciplíne dráhová cyklistika vyhrala Kristina Vogel v dvoch častiach, v prvej s rozdielom 0,016 sekundy a v druhej s rozdielom 0,004 sekundy pred Becky James. Na pretekoch Tour de France, ktorých trvanie je v dĺžke troch týždňov, sa v roku 1989 podarilo vyhrať Američanovi Gregovi LeMondovi (obr. 3.1a) nad Laurentom Fignonom (obr. 3.1b) iba o 8 sekúnd. Rozho-



(a) Greg LeMond počas záverečnej individuálnej časovky na Tour de France 1989 [1]



(b) Laurent Fignon počas záverečnej individuálnej časovky na Tour de France 1989 [2]

Obr. 3.1: Porovnanie cyklistického vybavenia z aerodynamického hľadiska.

dujúcou bola posledná etapa - individuálna časovka, kde LeMond predviedol o 58 sekúnd lepší výkon ako Fignon. LeMondovi dopomohli k víťazstvu viaceré vychytávky, ktoré zmenšili jeho aerodynamický odpor a tým pádom mohol túto energiu pretaviť do čistého výkonu. Využil

najmä aerodynamickejší tvar rámu bicykla, cyklistický dres z materiálu Lycra, aerodynamickú prilbu či predstavce. Ich odlišné vybavenie môžeme porovnať na obrázku 3.1. Všetky tieto príklady nám dokazujú, že niekedy rozhodujú naozaj zlomky sekundy a preto je veľmi potrebné venovať pozornosť okrem fyzickej pripravenosti a trénovanosti aj materiálnemu zabezpečeniu tak, aby bolo čo najviac aerodynamické.

Odvtedy sme svedkami neustáleho pokroku, nových testov a materiálneho vybavenia, ktoré má výrazne lepšie aerodynamické vlastnosti. Takéto pokroky prinášajú niekedy až futuristické vybavenie či jednoznačné určenie pozícií a vzdialeností medzi jednotlivými cyklistami v „pelotóne“ pre čo najväčšie zníženie odporu, ako môžeme vidieť na obrázkoch 3.2a a 3.2b:



(a) Fotografia tímu Jumbo Visma v tímovej časovke v roku 2019 na Tour de France [16]



(b) Jonas Vingegaard s novou prilbou od značky Giro na pretekoch Tirreno-Adriatico 2024 [3]

Obr. 3.2: Najnovšie trendy v cyklistike z aerodynamického hľadiska.

V našej práci a experimente uvažujeme bezvetrie, t.j. uvažujeme iba rýchlosť cyklistu, ktorý prekonáva odpor vzduchu, v reálnom živote však neoddeliteľnú súčasť cyklistiky zohráva vietor. Modelovanie účinkov vetra na cyklistu je veľmi komplexný a náročný problém, nakoľko vietor mení v čase často v priebehu sekúnd svoju rýchlosť aj smer. Podľa článku [16] najhorší vplyv na cyklistu majú protivietor (vietor pôsobiaci v protismere jazdy cyklistu) a bočný vietor (vietor pôsobiaci pod uhlom  $90^\circ$  na smer jazdy cyklistu).

## Kapitola 4

# Experimenty v softvéri ANSYS

## Fluent

### 4.1 3D sken

V tejto sekcii sa budeme venovať metodike skenovania na získanie 3D modelu použiteľného v softvéri ANSYS Fluent na modelovanie prúdenia vzduchu a výpočet odporovej plochy. Skenovali sme cyklistku, ktorej výška je 170 cm, oblečenú v cyklistickom drese od výrobcu NyNa, s.r.o., vyrobeného z polyamidu a elastanu. Pre čo najlepšie zachytenie reality bola výstroj doplnená o klasickú cyklistickú prilbu Giro a cyklistické tretry Shimano. Cyklistka sedela na cestnom bicykli Trek Emonda SL6 s klasickými hliníkovými kolesami. Bicykel sme upevnili pomocou cyklistického trenažéra TACX Vortex Smart a predné koleso sme podložili špeciálnou podložkou na to určenou, aby sa zachovala štandardná pozícia bicykla a nedošlo k žiadnemu náklonu vzhľadom na upevnenie zadného kolesa v trenažéri. Pre potreby skenovania bolo nutné, aby sa cyklistka nehýbala. Jedno skenovanie trvalo približne 40 minút, pričom zrealizované boli 4 pokusy (rôzna vzdialenosť, ne/zahrnutie textúry), z ktorých sa následne vybral najkvalitnejší sken, ktorý bolo potrebné ďalej upravovať vzhľadom na určitú nepresnosť skeneru a prebytočné body vo výslednom mračne bodov.

#### 4.1.1 Použité zariadenie a jeho parametre

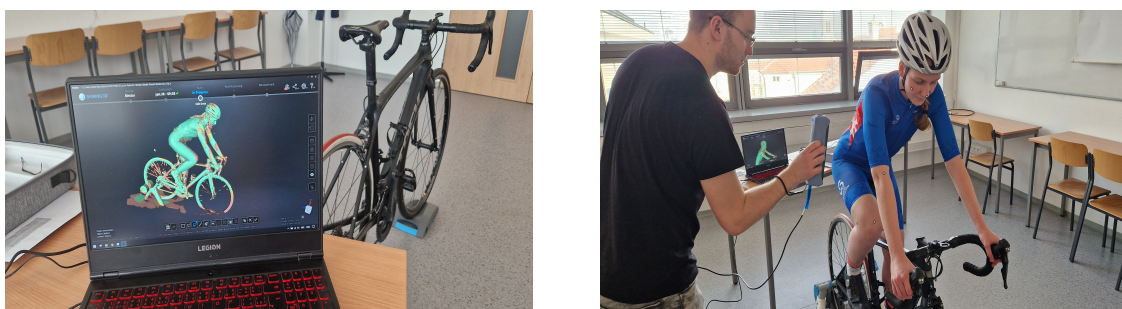
Na účely 3D skenovania sme použili 3D skener **Einstar** od výrobcu **Shining3D** s nasledujúcimi parametrami [12]:

- Vzdialenosť bodov: 0.1 mm  $\sim$  0.3 mm

- Pracovná vzdialenosť:
  - Prípustná: 160 mm – 1400 mm
  - Optimálna: 400 mm
- Maximálne zorné pole: 434 mm x 379 mm (pri optimálnej pracovnej vzdialenosti)
- Rýchlosť skenovania: 980 000 bodov/s, max. 14 snímok/s
- Zdroj svetla: Štruktúrované infrčervené svetlo s VCSEL (vertikálny povrchovo emitujúci laser)
- Hmotnosť: 500g
- Rozmery: 220 mm x 46 mm x 55 mm
- Rozsah prevádzkovej teploty: 0 °C – 40 °C
- Rozsah prevádzkovej vlhkosti vzduchu: 10% – 90%
- Odporúčaná konfigurácia:
  - Operačný systém: Windows 10/11, 64 bit
  - Grafická karta: NVIDIA GTX1060
  - Procesor: I7-11800H
  - Pamäť:  $\geq$  32 GB

Skenovanie cyklistky prebiehalo v miestnosti s izbovou teplotou ( $\sim 22^\circ\text{C}$ ) a 50% vlhkosťou vzduchu. Podľa návodu [18] bolo skener najprv potrebné pripojiť pomocou USB kábla k počítaču spĺňajúcemu potrebné parametre. Nevyhnutnú súčasť skenovania tvoril softvér **EXStar** potrebný na nastavenie jednotlivých parametrov pre konkrétny sken, poprípade kalibráciu a taktiež následnú úpravu 3D modelu. Výsledná kvalita skenu závisí od viacerých parametrov, ako napríklad priehľadnosť, lesk, povrch odrážajúci svetlo, veľmi členitý povrch a iné. Človek sám o sebe je relatívne komplikovaný objekt pre takéto skenovanie, ak má navyše oblečený dres/prilbu a sedí na bicykli, tento objekt sa stáva komplexným s veľkým množstvom detailov, záhybov látky, úzkych káblov na bicykli atď. Z tohto dôvodu sa nám počas skenovania stávalo, že skener sa v určitých momentoch „stratil v priestore“ a bolo potrebné počkať, kým zaregistruje známe body, ktoré už boli naskenované. Na zníženie pravdepodobnosti takéhoto správania skenera sme použili malé reflexné nálepky na najproblematickejších miestach bicykla/cyklistky (predovšetkým lakte, kolená, rám bicykla), ktoré si skener zapamätal

a vedel sa podľa nich zorientovať v priestore. Samozrejme, nedalo sa úplne vyhnúť nedokonalému správaniu skenera, preto v určitých momentoch, kedy sa skener „stratil“ a znovu „našiel“, vznikali nedokonalosti modelu, ako napríklad dvojité naskenovanie ruky/nohy v dvoch vrstvách tesne nad sebou. Z tohto dôvodu bolo potrebné upraviť získaný 3D model a odstrániť prebytočné body, aby výsledný model dostatočne dobre zachytil cyklistku spolu s bicyklom a zároveň obsahoval čo najmenej bodov kvôli výpočtovej náročnosti. Procesu úpravy mračna bodov sa budeme venovať v nasledujúcej podkapitole (4.1.2). Na obrázku 4.1 možno vidieť priebeh samotného skenovania.



Obr. 4.1: Priebeh skenovania cyklistky 3D skenerom.

#### 4.1.2 Úprava mračna bodov a výsledný 3D model

Úprava mračna bodov tvorila nevyhnutnú súčasť pre skvalitnenie modelu a jeho dotvorenie do reálnej podoby a tiež pre efektivitu výpočtu - čím menej bodov potrebných na vytvorenie výpočtovej siete - modelu, tým nižšiu výpočtovú náročnosť bude mať model, ako sme už spomenuli v podkapitole 4.1.1. V softvéri EXStar sme manuálne vyselektovali body, ktoré sa naskenovali dvojmo alebo tie, ktoré vo výslednom modeli nebudú potrebné pre výpočet, resp. výrazne neovplyvnia výsledky (špice na kolesách, káble) - podľa článku [16] sú totižto ľudské telo, prilba a oblečenie cyklistu zodpovedné až za 64% - 82% z celkového odporu pôsobiaceho na cyklistu, bicykel a jeho komponenty teda významne menej prispievajú k celkovému odporu, pričom špice na bicykli a káble vedúce k brzdám či radeniu sú príliš malé komponenty, takže v tomto prípade zohrávajú v celkovom odpore zanedbateľnú úlohu. Z tohto dôvodu boli tiež skenerom zachytené iba niektoré malé časti týchto komponentov, preto by spomínané komponenty nebolo možné efektívne domodelovať. Z výsledného upraveného mračna bodov sme v softvéri EXStar vytvorili výslednú výpočtovú sieť tak, aby výsledný objekt - cyklistka, neobsahoval žiadne diery a následne sme túto výpočtovú sieť uložili vo formáte STL, ktorý bolo možné načítať do softvéru ANSYS Fluent ako vstupnú geometria.

## 4.2 Experimenty

V tejto podkapitole si popíšeme metodiku experimentu a softvér, v ktorom sme experiment vykonávali, jeho vlastnosti a možnosti využité na výpočty. Samotný experiment pozostáva z dvoch častí:

- Výpočet s jednoduchou geometriou človeka upraveného do cyklistickej pozície totožnej s pozíciou cyklistky naskenovanej pomocou 3D skeneru
- Výpočet s komplexnou geometriou cyklistky naskenovanej pomocou 3D skeneru

V prvej časti vypočítame odporovú silu pri rôznych parametroch výpočtových sietí, z ktorej následne určíme odporovú plochu, tlak pôsobiaci na jednotlivé časti tela cyklistu a taktiež rýchlosť vzduchu v reze prechádzajúcom osou tela cyklistu. V druhej časti vypočítame tie isté charakteristiky ako v prvej časti, iba s tým rozdielom, že použijeme parametre siete s najlepšími vlastnosťami pre jednoduchú geometriu. Následne porovnáme výsledky pre obe geometrie. Nakoľko oba modely sú v rovnakej pozícii, naším predpokladom je, že výsledky by sa nemali výrazne líšiť, avšak stále do výpočtu vstupujú rozdielne faktory ako bicykel (ten nie je zahrnutý v jednoduchej geometrii) či komplexnosť modelu (záhyby na ľudskom tele/oblečení, prilba, cyklistické tretry).

Experiment prebiehal v softvéri ANSYS Fluent. Ako uvádza tutoriál [6], ANSYS Fluent poskytuje komplexné možnosti modelovania pre širokú škálu laminárneho, turbulentného, stlačiteľného či nestlačiteľného prúdenia. Umožňuje riešiť stacionárne aj nestacionárne úlohy. ANSYS Fluent na riešenie Navier-Stokesových rovníc poskytuje 3 spôsoby spomenuté v kapitole 2.

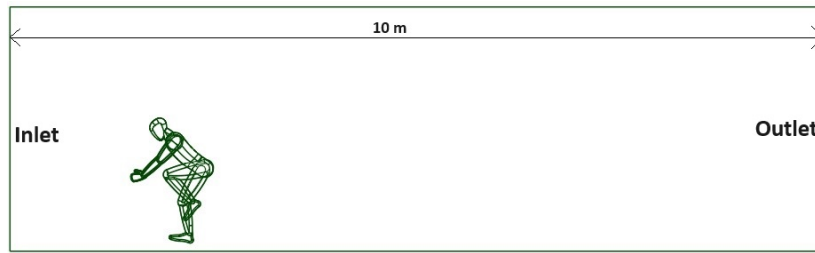
Ako sme už spomínali, experiment je rozdelený na dve časti, ktoré teraz v nasledujúcich podkapitolách podrobne opíšeme, zhrnieme základné poznatky a výsledky experimentov a najdôležitejšie atribúty taktiež zobrazíme pomocou obrázkov či grafov.

### 4.2.1 Výpočet s jednoduchou geometriou

Náš experiment sme začali jednoduchším prípadom - model človeka v cyklistickej pozícii bez akéhokoľvek cyklistického vybavenia či oblečenia. Pozícia človeka bola prispôbená tak, aby zodpovedala pozícii cyklistky naskenovanej 3D skenerom. Tohto človeka sme umiestnili do oblasti tvaru kvádra s rozmermi 4 x 3 x 10 metrov, kde bolo modelované prúdenie, pričom cyklista bol umiestnený vo vzdialenosti približne 2 metre od inletu, ako je možné vidieť na obrázku 4.2.

Typy okrajových podmienok zadávame nasledovne:





Obr. 4.2: Znáozornenie výpočtovej oblasti.

- telo cyklistu - **wall**
- stena predstavujúca podložku (bottom) - **wall**
- stena, na ktorú sa zadáva počiatočná rýchlosť vzduchu (inlet) - **velocity-inlet**
- stena za chrbtom cyklistu (outlet)- **pressure-outlet**
- zvyšné steny - **symmetry**

Experiment uskutočňujeme pre viacero výpočtových sietí, konkrétne 4 a pre potreby písania práce si ich aj očísľujeme - sieť s parametrami automaticky generovanými ANSYSom (sieť **2**), následne 2x jemnejšiu sieť (sieť **3**), 4x jemnejšiu sieť (sieť **4**) a nakoniec 2x hrubšiu sieť (sieť **1**) oproti sieti preddefinovanej ANSYSom. Postup vytvorenia siete prebiehal v dvoch častiach. Najprv sme vytvorili povrchovú sieť, následne sme definovali okrajové podmienky, pridali sme tzv. „hraničné vrstvy” (boundary layers) na upravenie siete v blízkosti stien objektu - cyklistu, nakoľko v blízkosti stien je kľúčové presné zachytenie javov, ako sú napríklad viskózne efekty, turbulencie či rýchlosť (tok zažíva v blízkosti stien výrazné gradienty rýchlosti). Zadanie tohto parametra nám zabezpečilo jemnejšiu sieť v blízkosti stien a teda presnejšie zachytenie javov na týchto kritických miestach. Nakoniec sme vygenerovali objemovú sieť, pričom sme použili elementy typu poly-hexcore, ktoré podľa článku [5] kombinujú viac typov elementov (šesťsteny a mnohosteny) podľa toho, do ktorej oblasti sa z hľadiska výpočtu a geometrie aký element najviac hodí a optimalizujú výpočty.

Následne sme prešli do nastavení parametrov samotného výpočtu, kde sme si zvolili model, na základe ktorého prebehnú výpočty - Standard  $k - \epsilon$  s použitím štandardných stenových funkcií definovaných Launderom a Spaldingom [4], pričom stenové funkcie sú empirické rovnice používané na fyzikálny opis správania sa prúdenia v blízkosti stien. Tu sme taktiež chceli docieľiť zjemnenie siete v blízkosti stien výpočtovej oblasti na presné zachytenie javov na kritických miestach. Konštanty vystupujúce v modeli boli automaticky preddefinované ANSYSom. Ďalej sme určili prúdiacu tekutinu - vzduch s konštantnou hustotou  $1,225 \text{ kg/m}^3$ . Nevyhnutné bolo aj určenie rýchlosti prúdenia, resp. v našom prípade rýchlosť cyklistu, ktorý

prekonáva odpor vzduchu v bezvetří. Túto rýchlosť sme zadali ako okrajovú podmienku na inlet v protismere jazdy cyklistu s hodnotou 10 m/s, teda pre lepšiu predstavivosť 36 km/h, čo pre skúsenejšieho cyklistu predstavuje na rovine v bezvetří ľahké tempo. Na outlet sme zadali okrajovú podmienku - tlak s hodnotou 0 Pa. Nastavili sme si vypísanie hodnoty odporovej sily do súboru po každej desiatej iterácii, uvažovali sme stacionárne prúdenie. Následne stačilo inicializovať a spustiť výpočet - nastavili sme ho na maximálny počet 1000 iterácií. Zastavovacie kritériá sme ponechali prednastavené ANSYSom, teda ak súčasne pre všetky neznáme platilo, že výsledné hodnoty medzi jednotlivými iteráciami sa líšili o menej ako  $10^{-4}$ , výpočet sa zastavil. Výsledky pre jednotlivé siete spolu s grafickými výstupmi uvádzame v nasledujúcich odsekoch. Pri vykresľovaní výsledkov sme sa inšpirovali oficiálnym ANSYS tutoriálom [7]. Pre každú sieť sú vyobrazené dva pohľady zamerané na veľkosť elementov pri stenách, dva pohľady, na ktorých je vyobrazené pôsobenie tlaku (zboku a spredu) na cyklistu, jeden obrázok, ktorý zachytáva rýchlosť prúdiaceho vzduchu vo výpočtovej oblasti a nakoniec graf odporovej sily v závislosti od počtu iterácií. Vo výsledkoch pre jednotlivé siete uvedieme len čiastočné pozorovania a komentáre a komplexné zhrnutie výsledkov urobíme až na záver.

### Výsledky pre sieť 1

Prvá sieť pozostávala z najmenšieho počtu elementov, konkrétne 98 504. Výpočet bol nastavený na 1 000 iterácií, po 540 iteráciách však riešenie skonvergovalo. Na obrázku 4.3 môžeme vidieť graf zachytávajúci závislosť odporovej sily od počtu iterácií. Vidíme, že na začiatku dosahuje odporová sila veľmi veľké hodnoty a s narastajúcim počtom iterácií sa odporová sila výrazne zníži a pohybuje sa okolo jednej hodnoty, konkrétne okolo hodnoty 19,5 N. Posledná hodnota v súbore, ktorý nám počas výpočtu vygeneroval ANSYS Fluent, je zaokrúhlene na 3 desatinné miesta 19,479 N. Po dosadení odporovej sily do vzťahu (3.2) dostávame výsledok pre **odporovú plochu  $C_d A$  pre sieť 1** s hodnotou **0,318 m<sup>2</sup>**. Na obrázku 4.7 môžeme vidieť veľkosť elementov pri stenách objektu či výpočtovej plochy. Najmä pri hlave cyklistu si môžeme všimnúť, že rozmer prvých elementov v smere kolmom na plochu (pre jednoduchosť tento rozmer označíme ako „výška elementu“) je väčší ako tento rozmer pre druhé, poprípade tretie elementy. Pri postupnom zjemňovaní siete by sme mali dosiahnuť to, že výšky elementov pri stenách budú výrazne menšie, aby vedeli lepšie zachytiť prúdenie v kritických oblastiach. Obrázok 4.11 zachytáva pôsobenie tlaku na jednotlivé časti tela cyklistu, pričom si môžeme všimnúť, že pochopiteľne najväčší tlak pôsobí na tie časti tela, ktoré sú priamo vystavené nárazom vzduchu do tela cyklistu, teda najmä oblasti v prednej časti tela.

Naopak, výrazne menší tlak pôsobiaci na telo cyklistu si môžeme všimnúť po bokoch tela a úplne najmenšiu hodnotu tlaku môžeme pozorovať pri panve zohnutej nohy. Rozmedzie hodnôt tlaku pôsobiaceho na cyklistu je približne -212 Pa až 64 Pa. Rýchlosť prúdenia vzduchu vo výpočtovej oblasti a vplyv cyklistu na rýchlosť prúdenia zachytáva obrázok 4.15. Vidíme, že vzduch dosahuje najvyššiu rýchlosť nad hlavou cyklistu a taktiež v oblasti nôh, čo bude spôsobené tým, že rez ide cez os tela cyklistu a teda v tomto reze môžeme podľa obrázku 4.11 vidieť, že sa tam akurát nachádza medzera medzi nohami cyklistu, keďže reálne nesedí na bicykli. Naopak najmenšie rýchlosti dosahuje vzduch za chrbtom, resp. zadnou časťou tela cyklistu. Najvyššia rýchlosť prúdenia dosahuje hodnotu približne 14 m/s.

## Výsledky pre sieť 2

Druhá sieť pozostávala z 244 581 elementov. Výpočet bol nastavený na 1 000 iterácií, pričom týchto 1 000 iterácií aj prebehlo. Na obrázku 4.4 môžeme vidieť graf zachytávajúci závislosť odporovej sily od počtu iterácií. Vidíme, že na začiatku dosahuje odporová sila stále veľké hodnoty a s narastajúcim počtom iterácií sa odporová sila výrazne zníži a pohybuje sa okolo jednej hodnoty, konkrétne okolo hodnoty 15,8 N. Posledná hodnota v súbore, ktorý nám počas výpočtu vygeneroval ANSYS Fluent, je zaokrúhlená na 3 desatinné miesta 15,801 N. Po dosadení odporovej sily do vzťahu (3.2) dostávame výsledok pre **odporovú plochu  $C_d A$  pre sieť 2** s hodnotou **0,258 m<sup>2</sup>**. Na obrázku 4.8 môžeme vidieť veľkosť elementov pri stenách objektu či výpočtovej plochy. Najmä pri hlave cyklistu si môžeme všimnúť, že výšky prvých elementov sú už približne rovnaké ako výšky druhých, poprípade tretích elementov. Pri spodnej hranici výpočtovej oblasti si môžeme všimnúť, že výška prvého elementu je už menšia ako výška druhého elementu. Obrázok 4.12 zachytáva pôsobenie tlaku na jednotlivé časti tela cyklistu. Kvalitatívne sa výstup oproti prvej sieti nezmenil, trochu sa zmenilo rozmedzie hodnôt tlaku pôsobiaceho na cyklistu na -246 Pa až 64 Pa (najvyššia dosiahnutá hodnota sa zmenila len na druhom desatinnom mieste). Rýchlosť prúdenia vo výpočtovej oblasti a vplyv cyklistu na rýchlosť prúdenia zachytáva obrázok 4.16. Výstup sa oproti sieti 1 kvalitatívne výrazným spôsobom nezmenil, môžeme si akurát všimnúť ešte nižšiu rýchlosť vzduchu za chrbtom cyklistu, pretože za chrbtom sa tvorí akási „bublina“ kvôli tomu, že vzduch tečie okolo bočných častí tela a kým znovu dosiahne určitú rýchlosť priamo za trupom cyklistu, ktorý je relatívne široký a musí byť teda vzduchom obtečený, chvíľku to trvá a na základe tohto pozorovania môžeme tvrdiť, že pri jemnejšej sieti sa táto „bublina“ s nízkou rýchlosťou vzduchu môže ešte zväčšovať. Podobný jav možno sledovať aj pri jazde auta či motocykla, preto napr. pri jazde cyklistu za autom či motocyklom stačí vynaložiť na jazdu

pri nezmenenej rýchlosti omnoho menšie množstvo energie, pretože auto „rozráža“ vzduch a cyklista jazdí v „bubline“, kde svojou rýchlosťou prekonáva omnoho menší odpor vzduchu [9]. Najvyššia rýchlosť prúdenia dosahuje hodnotu približne 14,6 m/s.

### Výsledky pre sieť 3

Tretia sieť pozostávala z 624 733 elementov. Výpočet bol nastavený na 1 000 iterácií, pričom týchto 1 000 iterácií aj prebehlo. Na obrázku 4.5 môžeme vidieť graf zachytávajúci závislosť odporovej sily od počtu iterácií. Vidíme, že na začiatku dosahuje odporová sila stále veľké hodnoty, ale s narastajúcim počtom iterácií rýchlo klesá a pohybuje sa okolo jednej hodnoty, konkrétne okolo hodnoty 13,6 N. Posledná hodnota v súbore, ktorý nám počas výpočtu vygeneroval ANSYS Fluent, je zaokrúhlene na 3 desatinné miesta 13,589 N. Po dosadení odporovej sily do vzťahu (3.2) dostávame výsledok pre **odporovú plochu  $C_dA$  pre sieť 3** s hodnotou **0,222 m<sup>2</sup>**. Na obrázku 4.9 môžeme vidieť veľkosť elementov pri stenách objektu či výpočtovej plochy. Tu už aj pri hlave aj pri spodnej hranici výpočtovej oblasti môžeme vidieť, že výška prvého elementu je menšia ako výška druhého, resp. tretieho elementu. Obrázok 4.13 zachytáva pôsobenie tlaku na jednotlivé časti tela cyklistu. Kvalitatívne sa výstup oproti predošlým sieťam nemení, trochu sa zmenilo rozmedzie hodnôt tlaku pôsobiaceho na cyklistu na -265 Pa až 64 Pa (najvyššia dosiahnutá hodnota oproti sieti 2 sa zmenila na prvom desatinnom mieste). Rýchlosť prúdenia vo výpočtovej oblasti a vplyv cyklistu na rýchlosť prúdenia zachytáva obrázok 4.17. Vidíme, že obrázok sa v porovnaní s tým istým obrázkom pri sieti 2 takmer nezmenil, akurát sa potvrdil náš predpoklad, že „bublina“ za chrbtom cyklistu sa zväčšila. Najvyššia rýchlosť prúdenia dosahuje hodnotu približne 14,6 m/s, oproti sieti 2 sa hodnota zmenila až na treťom desatinnom mieste. Ostáva nám už iba uviesť výsledky pre najjemnejšiu sieť, ktorá bola výpočtovo najnáročnejšia vzhľadom na vysoký počet elementov.

### Výsledky pre sieť 4

Posledná sieť 4 pozostávala z 2 387 474 elementov. Výpočet bol nastavený na 1 000 iterácií, po 480 iteráciách však riešenie skonvergovalo. Na obrázku 4.6 môžeme vidieť graf zachytávajúci závislosť odporovej sily od počtu iterácií, kde hodnota odporovej sily rýchlo klesne k hodnote približne 13,5 N. Posledná hodnota v súbore, ktorý nám počas výpočtu vygeneroval ANSYS Fluent, je zaokrúhlene na 3 desatinné miesta 13,537 N. Po dosadení odporovej sily do vzťahu (3.2) dostávame výsledok pre **odporovú plochu  $C_dA$  pre sieť 4** s hodnotou **0,221 m<sup>2</sup>**. Vidíme, že odporová plocha pre sieť 3 a sieť 4 sa už takmer nelíši, preto už jemnejšiu sieť nemusíme robiť. Na obrázku 4.10 môžeme vidieť veľkosť elementov pri stenách objektu či

výpočtovej plochy. Pri tejto sieti si môžeme všimnúť už naozaj veľmi malú výšku prvého elementu pri stenách, teda v kritických oblastiach, pričom pri ďalších elementoch sa táto výška pomaly zväčšuje. Obrázok 4.14 zachytáva pôsobenie tlaku na jednotlivé časti tela cyklistu. Kvalitatívne sa výstup oproti predošlým sieťam nemení, trochu sa zmenilo rozmedzie hodnôt tlaku pôsobiaceho na cyklistu na -251 Pa až 64 Pa (najvyššia dosiahnutá hodnota oproti sieti 3 sa zmenila na druhom desatinnom mieste). Rýchlosť prúdenia vo výpočtovej oblasti a vplyv cyklistu na rýchlosť prúdenia zachytáva obrázok 4.18. Vidíme, že obrázok sa v porovnaní s tým istým obrázkom pri sieti 3 už takmer nezmenil. Najvyššia rýchlosť prúdenia dosahuje hodnotu približne 14,6 m/s, čo sa taktiež oproti sieti 3 zmenilo len v desatinných miestach. Pre lepšie vizuálne porovnanie zobrazíme všetky obrázky spolu pre jednotlivé siete.

### Zhrnutie výsledkov pre výpočet s jednoduchou geometriou

V tabuľke 4.1 môžeme vidieť zhrnutie najdôležitejších parametrov a výsledkov jednotlivých sietí. Zhrnutie urobíme v 4 oblastiach - hodnota odporovej plochy, veľkosť elementov

Parametre	Odporová sila [N]	Odporová plocha [m <sup>2</sup> ]	Počet elementov siete
sieť 1	19,479	0,318	98 504
sieť 2	15,801	0,258	244 581
sieť 3	13,589	0,222	624 733
sieť 4	13,537	0,221	2 387 474

Tabuľka 4.1: Výsledné hodnoty parametrov pre jednotlivé siete.

pri stenách v kritických oblastiach, tlak pôsobiaci na jednotlivé časti tela cyklistu a nakoniec rýchlosť vzduchu prúdiaceho v reze osou tela cyklistu.

Hodnota odporovej plochy pre jednotlivé siete sa menila. So zjemňovaním siete sa hodnota odporovej plochy postupne znižovala, čo bolo spôsobené práve väčším počtom elementov. Pre sieť 3 a sieť 4 sme si však všimli, že tieto hodnoty si boli už navzájom tak blízke, že pre jemnejšiu sieť už výpočty nebolo potrebné robiť a aj z hľadiska výpočtovej techniky by to už bolo veľmi náročné. Treba povedať, že počítali sme odporovú plochu, nakoľko presnú čelnú plochu cyklistu nepoznáme, keď si však predstavíme priemerného človeka na bicykli, tak veľmi zhruba by mohol zaberáť čelnú plochu 1,7 m x 0,5 m, čo predstavuje hodnotu 0.85 m<sup>2</sup>. Keďže táto hodnota je menšia ako 1 a pri každej sieti nám hodnota odporovej plochy vyšla tiež menšia ako 1, môžeme predpokladať, že samotný koeficient odporu bude nadobúdať o trochu väčšiu hodnotu (zmena maximálne v rámci prvého desatinného miesta) ako odporová plocha. Samozrejme, táto úvaha je iba približná a závisí od tvaru postavy človeka, posedu na

bicykli, samotnom bicykli atď.

Čo sa týka veľkosti elementov pri stenách, kde je potrebné čo najlepšie zachytiť prúdenie, nakoľko v týchto oblastiach dochádza napr. k výrazným zmenám rýchlosti prúdenia, so zjemňovaním siete sme krásne videli, ako postupne dosahujeme to, čo sme chceli a teda, že výška prvých elementov od stien bude veľmi maličká a postupne pri ďalších elementoch bude narastať. Jemnou sieťou v oblastiach, kde nastávajú výrazné zmeny, vieme problematické javy oveľa lepšie zachytiť ako pri hrubšej sieti.

Tlak pôsobiaci na jednotlivé časti tela cyklistu sa pri zjemňovaní siete kvalitatívne výrazne nemenil. Mohli sme si všimnúť, že najnižšia hodnota tlaku bola dosiahnutá v oblasti panvy pri pokrčenej nohe a najvyššie hodnoty boli dosiahnuté pochopiteľne na plochách priamo vystavených nárazom vzduchu.

Pre rýchlosť vzduchu prúdiaceho v reze osou tela cyklistu sme si mohli všimnúť najväčšie hodnoty rýchlosti tesne nad hlavou cyklistu, v oblasti medzi nohami cyklistu a potom ešte jeden zaujímavý jav, ktorým je zväčšovanie sa „bubliny“ za chrbtom cyklistu pri zjemňovaní siete, v ktorej prúdi vzduch výrazne pomalšie oproti zvyšku výpočtovej oblasti. Inak sa táto charakteristika pri zjemňovaní siete výrazne nemenila.

V každom prípade sme videli, že pri sieti 4 sa už hodnota odporovej plochy oproti sieti 3 takmer nezmenila, preto pre komplexnú geometriu použijeme parametre najjemnejšej siete jednoduchej geometrie.

#### **4.2.2 Výpočet s komplexnou geometriou**

Komplexnú geometriu sme načítali vo formáte STL do softvéru ANSYS Fluent ako vstupnú geometriu, pričom cyklistku sme umiestnili do kvádrovej oblasti s rovnakými parametrami ako v podkapitole 4.2.1, pričom aj cyklistku sme umiestnili na rovnakú pozíciu od inletu. Typy okrajových podmienok ostali nezmenené a ako sme už spomínali na začiatku kapitoly, na vytvorenie výpočtovej siete pre komplexnú geometriu použijeme parametre siete 4. Celý postup výpočtu bol rovnaký ako v podkapitole 4.2.1.

#### **Výsledky pre komplexnú geometriu a porovnanie s jednoduchou geometriou**

Výpočtová sieť pozostávala z 4 408 147 elementov. Výpočet bol nastavený na 1 000

iterácií, po 480 iteráciach však riešenie skonvergovalo. Na obrázku 4.19 môžeme vidieť graf zachytávajúci závislosť odporovej sily od počtu iterácií. Na začiatku dosahuje odporová sila vysoké hodnoty, ale po niekoľkých desiatkach iterácií sa odporová sila výrazne zníži a pohybuje sa okolo jednej hodnoty, konkrétne okolo hodnoty 15 N. Posledná hodnota v súbore, ktorý nám počas výpočtu vygeneroval ANSYS Fluent, je zaokrúhlene na 3 desatinné miesta 14,667 N. Po dosadení odporovej sily do vzťahu (3.2) dostávame výsledok pre **odporovú plochu**  $C_d A$  s hodnotou **0,239 m<sup>2</sup>**, čo sa podľa predpokladov výrazne nelíši od výsledkov pre jednoduchú geometriu.

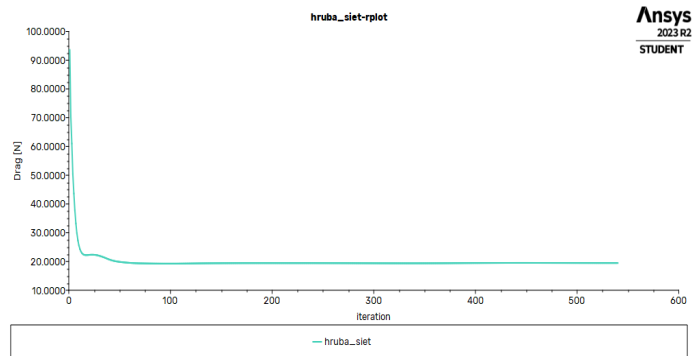
Na obrázku 4.20 môžeme vidieť veľkosť elementov pri stenách objektu či výpočtovej plochy. Z oboch obrázkov vidíme, že výška prvého elementu pri stenách je naozaj malá, táto sieť je teda naozaj vyhovujúca.

Obrázok 4.21 zachytáva pôsobenie tlaku na jednotlivé časti tela cyklistky, pričom tak ako pri jednoduchej geometrii, najväčší tlak pôsobí na tie časti tela, ktoré su priamo vystavené nárazom vzduchu do tela cyklistky, teda najmä oblasti v prednej časti tela. Naopak, výrazne menší tlak pôsobiaci na telo cyklistky si môžeme všimnúť po bokoch tela. Rozmedzie hodnôt tlaku pôsobiaceho na cyklistku je približne -267 Pa až 66 Pa, čo predstavuje porovnateľné rozmedzie v porovnaní s jednoduchou geometriou.

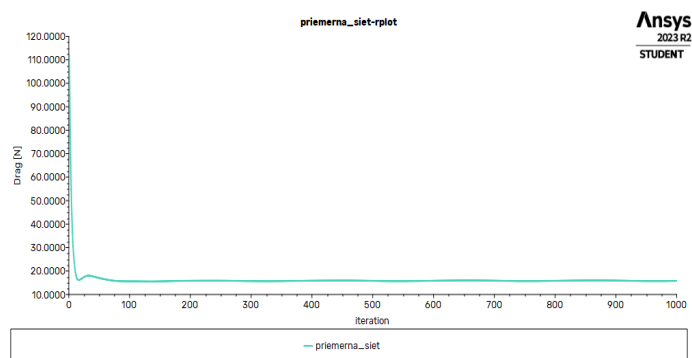
Vidíme, že na obrázku 4.21 je v oblasti panvy nižší tlak, nedosahuje však taký nízky extrém ako v prípade jednoduchej geometrie. Môže to byť spôsobené aj tým, že cyklistka má ruky v mierne inej pozícii alebo riadidlami bicykla, ktoré môžu ovplyvniť prúdenie vzduchu.

Rýchlosť prúdenia vo výpočtovej oblasti a vplyv cyklistky na rýchlosť prúdenia zachytáva obrázok 4.22. Vidíme, že aj v tomto prípade dosahuje vzduch v tomto reze najvyššiu hodnotu rýchlosti nad hlavou cyklistky, resp. v medzere, ktorá vzniká medzi nohami. Naopak, oblasti s najmenšími hodnotami rýchlosti sú neprekvapivo za telom cyklistky. Najvyššia rýchlosť prúdenia dosahuje hodnotu približne 13 m/s.

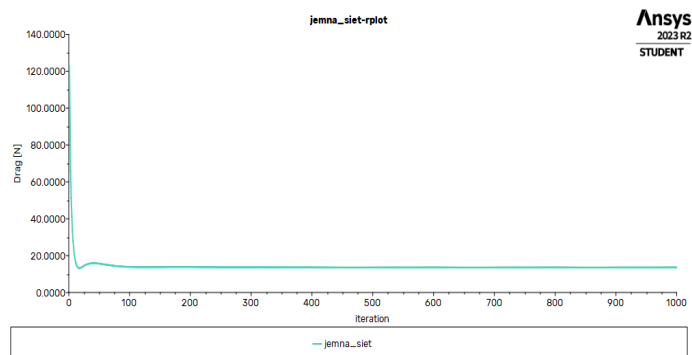
Na záver teda môžeme zhodnotiť, že naše počiatočné predpoklady sa naplnili a výsledky pre jednoduchú a komplexnú geometriu sa zásadne nelíšili. Čo sa týka hodnoty odporovej plochy, pre obe geometrie sme dostali podobné numerické výsledky, čo potvrdilo naše predpoklady.



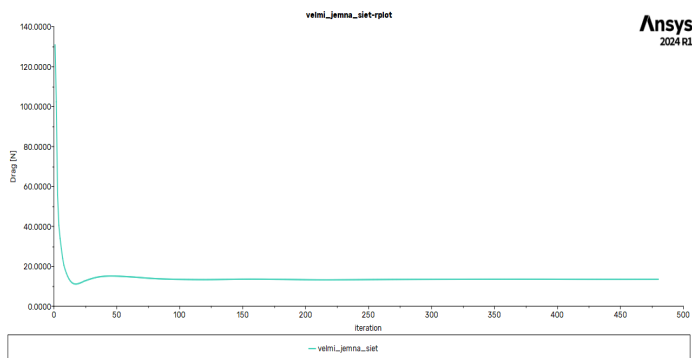
Obr. 4.3: Graf závislosti odporovej sily od počtu iterácií pre sieť 1.



Obr. 4.4: Graf závislosti odporovej sily od počtu iterácií pre sieť 2.

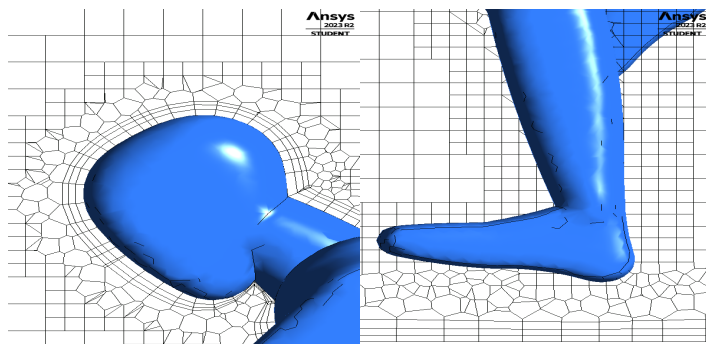


Obr. 4.5: Graf závislosti odporovej sily od počtu iterácií pre sieť 3.

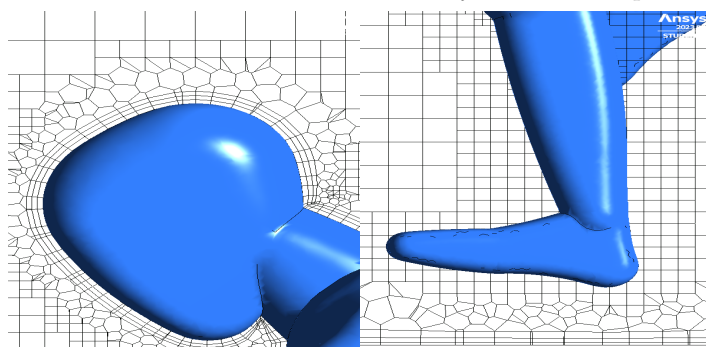


Obr. 4.6: Graf závislosti odporovej sily od počtu iterácií pre sieť 4.

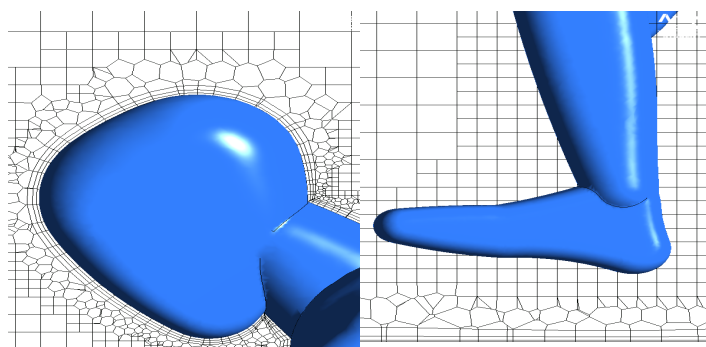




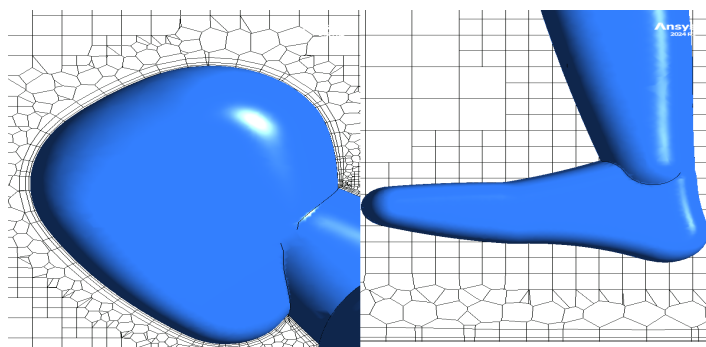
Obr. 4.7: Veľkosť elementov siete v kritických oblastiach pre sieť 1.



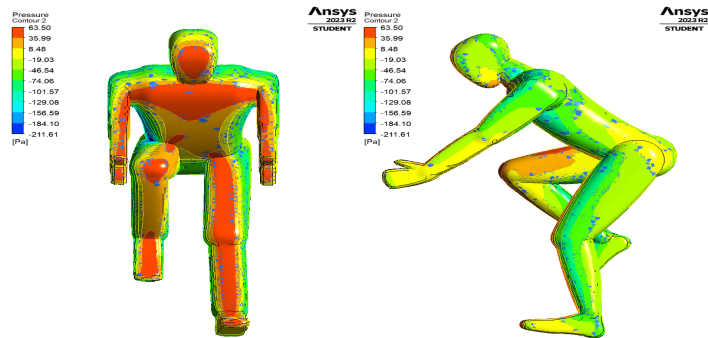
Obr. 4.8: Veľkosť elementov siete v kritických oblastiach pre sieť 2.



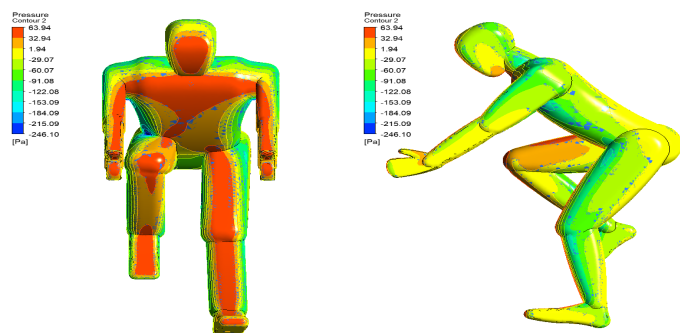
Obr. 4.9: Veľkosť elementov siete v kritických oblastiach pre sieť 3.



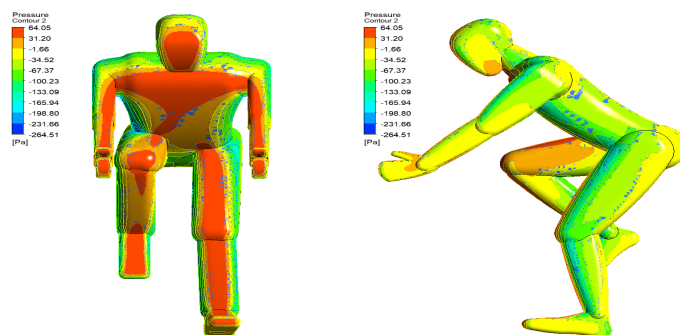
Obr. 4.10: Veľkosť elementov siete v kritických oblastiach pre sieť 4.



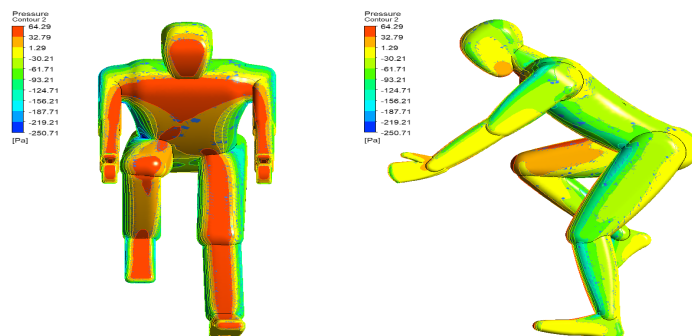
Obr. 4.11: Tlak pôsobiaci na cyklistu pre sieť 1.



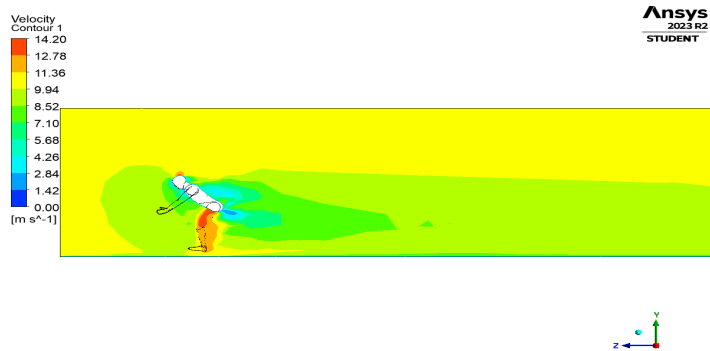
Obr. 4.12: Tlak pôsobiaci na cyklistu pre sieť 2.



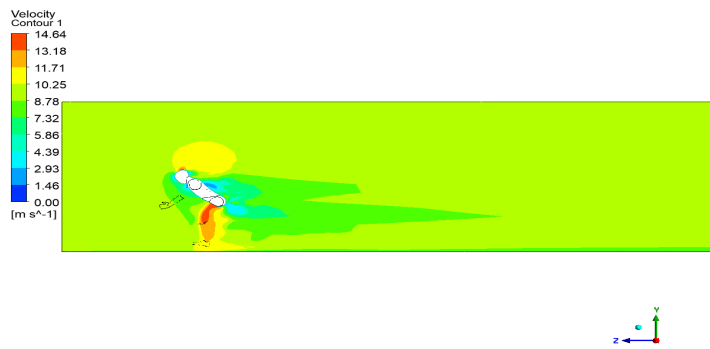
Obr. 4.13: Tlak pôsobiaci na cyklistu pre sieť 3.



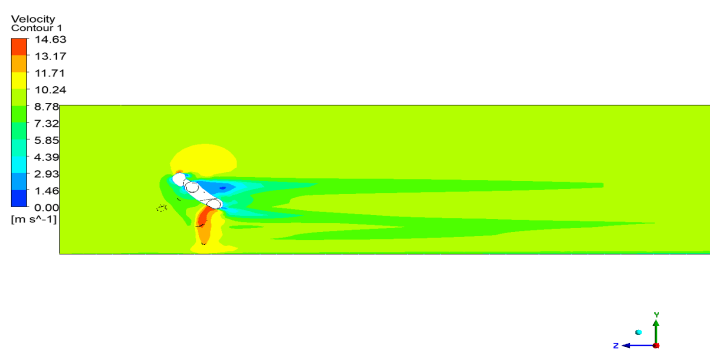
Obr. 4.14: Tlak pôsobiaci na cyklistu pre sieť 4.



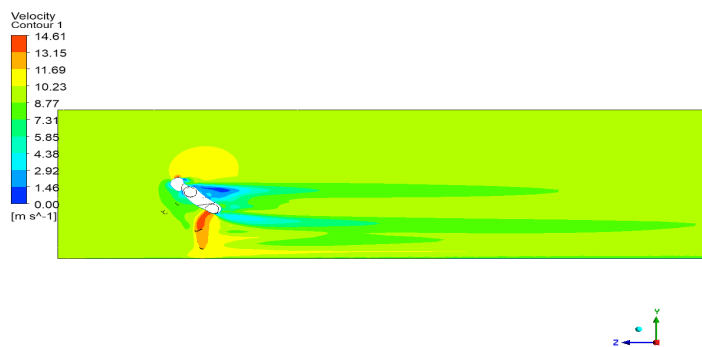
Obr. 4.15: Rýchlosť prúdenia vzduchu v okolí cyklistu v reze prechádzajúcom osou tela cyklistu pre sieť 1.



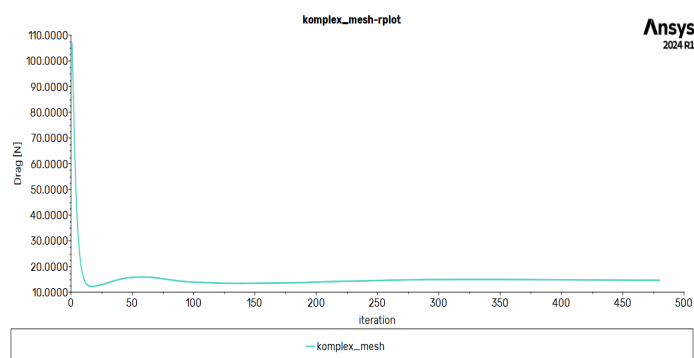
Obr. 4.16: Rýchlosť prúdenia vzduchu v okolí cyklistu v reze prechádzajúcom osou tela cyklistu pre sieť 2.



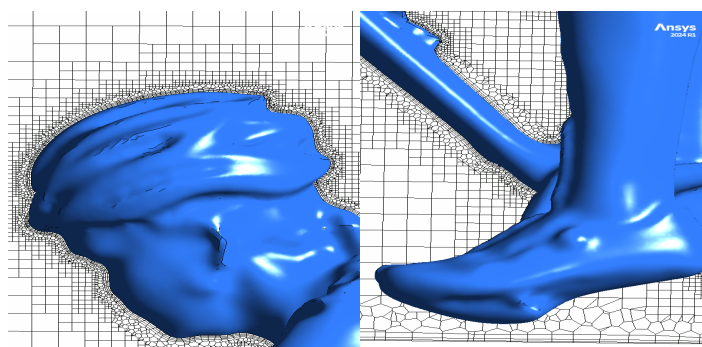
Obr. 4.17: Rýchlosť prúdenia vzduchu v okolí cyklistu v reze prechádzajúcom osou tela cyklistu pre sieť 3.



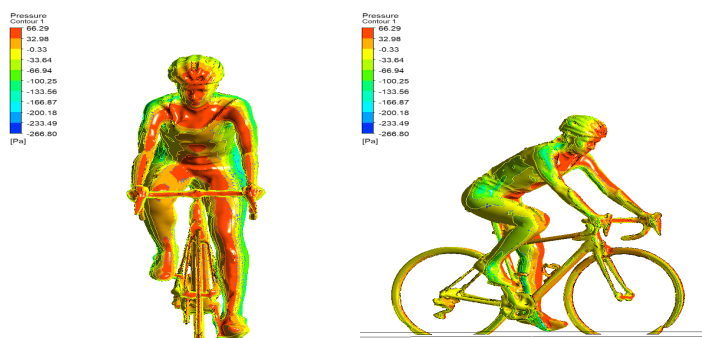
Obr. 4.18: Rýchlosť prúdenia vzduchu v okolí cyklistu v reze prechádzajúcom osou tela cyklistu pre sieť 4.



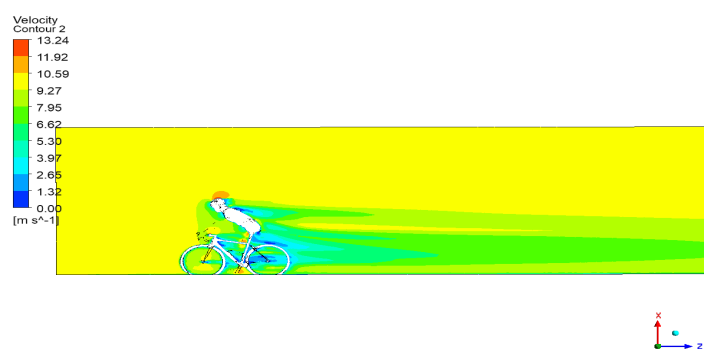
Obr. 4.19: Graf závislosti odporovej sily od počtu iterácií.



Obr. 4.20: Veľkosť elementov siete v kritických oblastiach.



Obr. 4.21: Tlak pôsobiaci na cyklistku.



Obr. 4.22: Rýchlosť prúdenia vzduchu v okolí cyklistky v reze prechádzajúcom osou tela cyklistky.

## Kapitola 5

### Záver

Uvedená práca sa venovala prúdeniu vzduchu v okolí cyklistu, zamerali sme sa na výpočet hodnoty odporovej plochy pre dve rôzne geometrie (jednoduchú a komplexnú), ktorá nám poskytuje obraz o aerodynamických vlastnostiach cyklistu, poprípade bicykla. Naším cieľom bolo vypočítať charakteristiky prúdenia v okolí komplexnej geometrie cyklistky, pričom na jednoduchšej sieti sme zistili, aké parametre použiť pre sieť s komplexnou geometriou. Pre jednoduchú geometriu vyšla odporová plocha pre najjemnejšiu sieť s hodnotou  $0,221 \text{ m}^2$  a pre komplexnú geometriu, pri ktorej sme na vytvorenie siete použili rovnaké parametre ako pri najjemnejšej sieti pre jednoduchú geometriu, vyšla táto hodnota  $0,239 \text{ m}^2$ . Cieľom pre praktické aplikácie je, aby táto charakteristika dosahovala čo najmenšie hodnoty a tým pádom aj odporová sila bude dosahovať nižšie hodnoty, nakoľko hustotu vzduchu či rýchlosť (pretekári chcú ísť čo najrýchlejšie) vo vzťahu pre odporovú silu neovplyvníme. Ďalej by sa dala preto napríklad vypočítať odporová plocha pre posed na časovkárskom bicykli a porovnať s výsledkami tejto práce. Z nami získaných výsledkov môžeme vidieť, že samotný bicykel či prilba kvalitatívne výsledky nezmenili a taktiež je to vidno aj na tlaku pôsobiacom na cyklistu, či rýchlosti prúdenia v reze prechádzajúcom osou tela cyklistu v smere prúdenia. Dve geometrie, pre ktoré sa výsledky dali navzájom porovnať, prispeli k dôveryhodnosti získaných výsledkov, pretože pre jednu geometriu by sme to nemali s čím porovnať, nakoľko sme nerobili experiment vo veternom tuneli. Experiment vo veternom tuneli spolu s počítačovou simuláciou je najčastejší prostriedok overovania si nadobudnutých výsledkov aj v štúdiách, z ktorých sme čerpali. Takýto prístup je určite prínosný a predstavuje aj možnosť rozšírenia našej práce. Taktiež by sa práca dala pri kombinácii s experimentom vo veternom tuneli rozšíriť o použitie viacerých modelov implementovaných v ANSYS Fluent a následne porovnávať kvalitu riešenia jednotlivých modelov. Tematika tejto práce má široké uplatnenie v cyklistickej praxi a dalo by sa pokračovať rôznymi smermi, napr. skúmaním vplyvu

cyklistického posedu, vplyvu materiálneho vybavenia, vplyv pozície v „pelotóne“ či vplyv sprievodných vozidiel na aerodynamiku cyklistu. Tieto oblasti sú už v súčasnom stave problematiky, samozrejme, rozobrané, ako sme mohli vidieť aj v použitej literatúre. V cyklistike je však možné preskúmať veľké množstvo rôznych situácií, veľmi špecifické problémy sa však potom stávajú aj veľmi zložitými na implementáciu parametrov problému do počítačovej simulácie a takisto aj na výpočet. Oblasť aerodynamiky v okolí cyklistu sa však neustále vyvíja, nakoľko predstavuje jednu z možností, ako môžu pretekári ušetriť ešte viac energie a tým pádom jazdiť ešte rýchlejšie, nakoľko aj fyziologické parametre človeka majú určité limity, aj tie sa však neustále posúvajú. Pre zaujímavosť, Peter Sagan vyhral v roku 2018 preteky Paris-Roubaix s priemernou rýchlosťou 43,55 km/h, pričom v roku 2024 vyhral Mathieu van der Poel s priemernou rýchlosťou 47,8 km/h, čo bol rekord pre uvedené preteky. V priebehu 6 rokov to predstavuje výrazný posun vzhľadom na každoročné nepriaznivé podmienky na tejto trati. Môžeme sa teda zamyslieť, či sa cyklisti toľko posunuli z hľadiska fyziologických parametrov alebo v tom zohral úlohu aj výskum a vývoj v oblasti aerodynamiky.

# Bibliografia

1. [B.r.]. <https://cyclehistory.wordpress.com/2015/07/26/le-tour-de-france-stage-21-paris-itt-1989/> [Accessed: 26.4.2024].
2. [B.r.]. <https://www.velominati.com/anatomy-of-a-photo/anatomy-of-a-photo-laurent-fignon-1989-tour-de-france/> [Accessed: 26.4.2024].
3. [B.r.]. <https://www.cyclingnews.com/news/just-when-we-thought-tt-helmets-couldnt-get-any-weirder-unreleased-giro-lid-leaves-us-speechless/> [Accessed: 26.4.2024].
4. [B.r.]. <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node99.htm> [Accessed: 26.4.2024].
5. ANSYS Fluent Mosaic Technology Automatically Combines Disparate Meshes with Polyhedral Elements for Fast, Accurate Flow Resolution. 2020. <https://www.ansys.com/content/dam/resource-center/white-paper/ansys-fluent-mosaic-technology-wp.pdf> [Accessed: 26.4.2024].
6. ANSYS Fluent Theory Guide Release 15.0. 2013.
7. ANSYS Fluent Tutorial Guide Release 18.0. 2017. <https://users.abo.fi/rzevenho/ansys%20fluent%2018%20tutorial%20guide.pdf> [Accessed: 26.4.2024].
8. BLEJCHAŘ, T. *Turbulence-Modelování proudění – CFX*. 1. vydání. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2010. ISBN 978-80-248-2606-6.
9. BLOCKEN, B.; GILLMEIER, S.; MALIZIA, F.; DRUENEN, T. van. Impact of a nearby car on the drag of a cyclist. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2023, roč. 234, s. 105353. ISSN 0167-6105. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2023.105353>.
10. DEFRAEYE, T.; BLOCKEN, B.; KONINCKX, E.; HESPEL, P.; CARMELIET, J. Aerodynamic study of different cyclist positions: CFD analysis and full-scale wind-



- tunnel tests. *Journal of Biomechanics*. 2010, roč. 43, č. 7, s. 1262–1268. ISSN 0021-9290. Dostupné z DOI: [10.1016/j.jbiomech.2010.01.025](https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2010.01.025).
11. DEFRAEYE, T.; BLOCKEN, B.; KONINCKX, E.; HESPEL, P.; CARMELIET, J. Computational fluid dynamics analysis of cyclist aerodynamics: Performance of different turbulence-modelling and boundary-layer modelling approaches. *Journal of Biomechanics*. 2010, roč. 43, č. 12, s. 2281–2287. ISSN 0021-9290. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2010.04.038>.
  12. *Einstar official webpage*. [B.r.]. <https://www.einstar.com/products/einstar-3d-scanner?variant=43551575507118> [Accessed: 26.4.2024].
  13. FROLKOVIČ, P. *Prúdenie kvapalín a plynov*. 1. vydanie. Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2013. ISBN 9788022738613.
  14. KOZUBKOVÁ, M. *Modelování proudění tekutin-FLUENT, CFX*. 1. vydání. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2008.
  15. LAUNDER, B.; SPALDING, D. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1974, roč. 3. ISSN 0045-7825. Dostupné z DOI: [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(74\)90029-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2).
  16. MALIZIA, F.; BLOCKEN, B. Cyclist aerodynamics through time: Better, faster, stronger. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2021, roč. 214, s. 104673. ISSN 0167-6105. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104673>.
  17. NILSSON, H.; STADE AARØNÆS, A. *Dynamic response of pipe rack steel structures to explosion loads*. 2014. <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/199998/199998.pdf> [Accessed: 26.4.2024].
  18. *Shining 3D Einstar\_User Manual\_V1.0.6.0*. [B.r.]. <https://support.einstar.com/support/solutions/articles/60000800205-einstar-user-manual> [Accessed: 26.4.2024].
  19. VLČEK, P. *Modelování turbulentního proudění*. České Vysoké Učení Technické v Praze, [b.r.].
  20. ŠAUŠOVÁ, S. *Modelovanie účinkov vetra v prostredí ANSYS*. Bratislava, 2016.