

Gimnazija Kranj



Gimnazija Kranj

IZGUBE PRI KOLESARJENJU

RAZISKOVALNO PODROČJE: APLIKATIVNI INOVACIJSKI PREDLOGI IN PROJEKTI

Raziskovalna naloga

Raziskovalec: Žiga Rekelj

Mentor: prof. mag. Oliver Ogris

Kranj, februar 2023

ZAHVALA

Rad bi se zahvalil svojemu mentorju prof. Oliverju Ogrisu za napotke in usmerjanje skozi potek raziskovalnega dela. Velika zahvala gre mojemu očetu, univ. dipl. inž., za izdelavo aerodinamičnega ščita, uporabljenega v raziskovalni nalogi. Zahvaljujem se mu tudi za vso pomoč pri izvajanju poskusov, merjenju in spodbudi pri raziskovanju. Zahvaljujem se še Gimnaziji Kranj za dodatno programsko opremo in merilne naprave ter Kolesarskemu klubu Kranj za uporabo zunanjega velodroma. Posebna zahvala gre moji profesorici kemije ge. Petri Flajnik, za posojeno knjigo, ki je bila glaven vir podatkov uporabljenih v raziskavi.

Posebna zahvala gre moji profesorici biologije ge. Urši Petrič za vse nasvete, koordiniranje ter pomoč pri raziskovalni nalogi.

Za lektoriranje raziskovalne naloge je poskrbela profesorica slovenščine ga. Eva Jelenc. Zato se ji iskreno zahvaljujem.

KAZALO VSEBINE

ZAHVALA	2
POVZETEK	5
1. UVOD	6
1.1 Namen raziskovalne naloge	6
1.2 Raziskovalno vprašanje	6
1.3 Hipoteza	6
2. TEORETIČNI DEL	7
3. EKSPERIMENTALNI DEL	9
3.1 Poskus v zvezi z aerodinamičnim uporom	9
3.1.1 Uporabljeni pripomočki	9
3.1.2 Metoda dela	9
3.2 Poskus v zvezi s pospeševanjem kolesarja	12
3.2.1 Uporabljeni pripomočki	12
3.2.2 Metoda dela	12
4. REZULTATI IN ANALIZA	13
4.1 Rezultati meritev aerodinamičnega upora in računanje izgub zaradi zračnega upora	13
4.2 Rezultati meritev izgub pri pospeševanju in ocena izgub moči	21
5. RAZPRAVA IN ZAKLJUČEK	23
5.1 Vrednotenje rezultatov meritev aerodinamičnega upora	23
5.2 Vrednotenje rezultatov o pravilnosti aerodinamičnega zakona	24
5.3 Vrednotenje rezultatov izračunanih izgub zaradi pospeševanja kolesarja	25
6. PRILOGE	26
7. TEHNIČNA DOKUMENTACIJA	27
8. VIRI IN LITERATURA	29

KAZALO SLIK

SLIKA 1.. Zunanji velodrom.....	9
SLIKA 2.. Določitev pozicije telesa glede na kota θ in φ	10
SLIKA 3.. Primer slike za izračun ploščine kolesarja s ščitom).....	11
SLIKA 4.. Osciliranje kolesa.....	12
SLIKA 5.. Izračun ploščin likov, podan izpis program izračuna za ščit.....	18
SLIKA 6.. Pospeševanje kolesarja.....	22
SLIKA 7...Testiranje porabe moči z ščitom.....	26
SLIKA 8...Natančne mere mojega ščita.....	27
SLIKA 9...Moj ščit.....	27
SLIKA 10.Optimiziran kolesarski ščit.....	28

KAZALO TABEL

TABELA 1.. Meritve zračnega upora za položaj $\theta = 42^\circ$, $\varphi = 73^\circ$	13
TABELA 2.. Meritve zračnega upora za položaj $\theta = 21^\circ$, $\varphi = 102^\circ$	14
TABELA 3.. Meritve zračnega upora za položaj $\theta = 0^\circ$, $\varphi = 110^\circ$	15
TABELA 4.. Meritve zračnega upora s ščitom.....	17
TABELA 5.. Izračunane ploščine.....	18
TABELA 6.. Uvedeni koeficienti upora.....	19
TABELA 7.. Izgube moči.....	20
TABELA 8.. Razmerja izračunane vrednosti ter izmerjene vrednosti.....	20
TABELA 9.. Meritve oscilacij.....	21

KAZALO GRAFOV

GRAF 1.. Primerjava porabe povprečnih moči za različne postavitve telesa.....	16
GRAF 2.. Primerjava porabe povprečnih moči med najučinkovitejšo postavitvijo telesa in ščitom.....	17

POVZETEK

V cestnem kolesarstvu je poleg telesne pripravljenosti kjučnega pomena izbira prave opreme. Izbira najboljšje opreme lahko kolesarju na dirki prinese zmago, saj tako skozi potek dirke privarčuje največ prepotrebne energije. Energijo kolesar lahko privarčuje le, če izgube pri kolesarjenju minimalizira. Daleč največje izgube se pojavljajo zaradi aerodinamičnega upora, pospeševajna kolesa in ostale opreme.

Ker se tudi sam ukvarjam s kolesarstvom, sem se odločil preveriti izgube, ki nastanejo zaradi aerodinamičnega upora in pospeševanja kolesa. Pri daleč največjem porabniku kolesarjeve energije, aerodinamičnem uporu, sem se odločil narediti korak dlje, in sicer izdelati napravo, ki še dodatno zmanjša vplive aerodinamičnega upora.

Prvi del raziskovalne naloge obsega merjenje in računanje zračnega upora. Meritve upora sem opravil na zunanjem velodromu, kjer sem z vnaprej določeno hitrostjo in postavitevijo telesa odpeljal celoten krog in meril kjučne parametre za ugotavljanje zračnega upora. Zadnji poskus sem opravil z aerodinamično izboljšavo — ščitom.

Drugi del raziskovalne naloge obsega izgube pri kolesarjenju zaradi pospeševanj kolesarja. Za potreben izračun izgub, sem na oprijemalnih zanihal eno kolo kolesa, iz česar sem pridobil vztrajnostni moment kolesa. Nazadnje sem iz vnaprej izbranih hitrosti in časov pospeševanja izračunal kotne hitrosti, kotne pospeške in kasneje izgube pri takšnih pospeševanjih.

Ključne besede: aerodinamični upor, izgube pri pospeševanju

1. UVOD

1.1 Namen raziskovalne naloge

Osnovni namen raziskovalne naloge je ugotoviti, kako izgube pri kolesarjenju vplivajo na kolesarja med dirko in kako minimalizirati izgube zaradi aerodinamičnega upora. Z upoštevanjem zračnega upora zjamemo od 80% do 90% vseh izgub, pri hitrostih večjih od $15\frac{km}{h}$ (Wilson, Schmidt 2020). Za uspešno znižanje aerodinamičnih izgub je potrebno poglobljeno znanje aerodinamike, v katero sem se poglobil v tej raziskavi. Raziskovanje prvega dela naloge je potekalo predvsem eksperimentalno, saj sem na zunanjem velodromu meril vplive upora na različne drže kolesarja ter različne hitrosti.

Drugi največji porabnik kolesarjeve energije je pospeševanje. Za ugotavljanje teh izgub sem izbral metodo, ki povezuje zakone nihanja z vztrajnostnim momentom telesa. Iz tega podatka se da teoretično napovedati izgube pri pospeševanju v naprej določenih časih in hitrostih.

Za raziskovalno nalogo sem se odločil, ker me je zanimalo koliko energije porabi kolesar med dirko zaradi zaviralnih dejavnikov. Poleg tega pa me je k raziskovanju gnala misel, kako lahko sam zmanjšam porabo energije na kolesarski dirki — z glavnim poudarkom na zračnem uporu.

1.2 Raziskovalno vprašanje

- A). Kako je zračni upor pri kolesarjenju povezan z izgubami moči (P), glede na različne hitrosti (v) in pozicijo kolesarja (φ, θ) ter kako na zračni upor vpliva ščit?
- B). Kako je izguba moči (P) povezana s pospeševanjem kolesarja?

1.3 Hipoteza

Glede na raziskovalni vprašanji sem si pred raziskovanjem postavil naslednje hipoteze:

1. Zračni upor na kolesarja vpliva s kubom hitrosti (v), v skladu z enačbo $P=F_U v=\frac{1}{2}\rho S c_u v^3$.
2. Zračni upor lahko močno zmanjšamo z optimalno pozicijo kolesarja na kolesu (zmanjšamo S).
3. Ščit zmanjša izgube zaradi upora, saj zmanjša površino (S) ter koeficient zračnega upora (c_u).
4. Izgube zaradi pospeševanja kolesarja so lahko ključnega pomena za zmago na dirki.

2. TEORETIČNI DEL

Telo, ki se giblje skozi tekočino (kapljevina, plin), mora konstantno premagovati silo upora. Če se telo giblje skozi zrak, pravimo, da takemu telesu nasprotuje aerodinamična sila zračnega upora. Poznamo dve vrsti uporov v tekočinah. Prvga opisuje tako imenovan linearni zakon upora, drugega pa kvadratni zakon upora. Zakona sta imeni dobila glede na sorazmernost s potenco hitrosti telesa (Nave, 2016).

Kateri zakon upora uporabiti pri gibanju teles skozi tekočino nam razjasni Reynoldsovo število. Takrat ko je Reynoldsovo število manjše od 1, uporabimo linearni zakon upora, ko pa je večje od 1000, je v veljavi kvadratni zakon upora. Vmesno stanje pa je analitično nerešljivo (Nave, 2016).

Izračun Reynoldsovega števila:

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu}$$

Kjer je ρ gostota tekočine, v hitrost telesa, l lastnosti telesa povezani z obliko in μ dinamična viskoznost tekočine. Reynoldsovo število za zrak je pri hitrostih kolesarja ($10 \frac{m}{s}$) približno 1.19×10^6 (Wilson, Schmidt, 2020). Upoštevajoč ta podatek je povsem korektno sklepati, da se za kolesarjevo premikanje skozi tekočino uporablja kvadratni zakon zračnega upora.

Izračun sile po kvadratnem zakonu upora:

$$F_u = \frac{1}{2} \rho c_u v^2 S$$

Kjer je ρ gostota tekočine, v hitrost telesa, c_u koeficient upora za določeno telo ter S površina na katero deluje zračni upor (Nave, 2016).

Kolesarju podatek o sili, ki nasprotuje njegovemu gibanju ne pove prav dosti, zato je treba silo upora pretvoriti v izgubljeno moč, ki je potrebna za premagovanje sile zračnega upora (ne za višanje kinetične ali potencialne energije), ki jo proizvaja kolesar.

Moč v odvisnosti od hitrosti kolesarja podaja naslednja enačba:

$$P = F_u v = \frac{1}{2} \rho c_u S v^3$$

V drugem delu raziskovalne naloge pa je govora o vrtečem se kolesu, kar namiguje na prisotnost centripetalne sile, ki je usmerjena proti središču kroženja. Centripetalna sila ima posebno lastnost, da se pri gibanju telesa velikost sile ne spreminja, spreminja se le smer vektorja centripetalne sile. Ker se pri gibanju telesa pojavlja sila, pomeni, da je gibanje enakomerno pospešeno (Tsokos, 2017).

Če kolo iz ravnovesne lege izamaknemo za majhen kot, bo to kolo začelo nihati okoli ravnovesja. Popis takega pojava nam omogoča poznavanje lastnosti nihanj, natančneje čas ene oscilacije. Iz enačbe za nihajni čas lahko izračunamo vztrajnostni moment telesa okrog togo vpete točke.

Enačba:

$$t_0 = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgd}} \Rightarrow J = \frac{t_0^2 mgd}{4\pi} \text{ (Nave, 2016)}$$

Kjer je t_0 nihajni čas, m je masa telesa, g je gravitacijski pospešek in d je razdalja do vpete točke.

Za uspešen izračun izgube moči zaradi pospeševanja, moramo izračunati vztrajnostni moment kolesa, vendar ne okoli togo vpete točke, ampak okoli masnega središča. To storimo z uporabo tako imenovanega Huygens-Steinerjevega teorema, ki pravi, da je vztrajnostni moment okoli togo vpete točke (J) enak vsoti vztrajnostnemu momentu telesa okoli geometrijske osi (J_C) in produktu mase telesa (m) s kvadratom razdalje do masnega središča (r).

Huygens-Steinerjev teorem:

$$J = J_C + mr^2 \text{ (Abdulghany, 2017)}$$

Za pravilno oceno izgube energije zaradi pospeševanja je treba podatke pretvoriti v izgubljeno moč po enačbi:

$$P = J_C \alpha \omega$$

Kjer sta α kotni pospešek in ω kotna hitrost.

Podana enačba za moč opisuje celotno kinetično energijo telesa (kolesa) v nekem času. Kinetična energija pa je sestavljena iz dveh energij, in sicer kinetične translacijske ter kinetične rotacijske (Tsokos, 2017).

$$\sum W_K = W_{K \text{ TRANSLACIJSKA}} + W_{K \text{ ROTACIJSKA}}$$

$$P = \frac{\Delta W_K}{\Delta t} = \frac{\Delta(\frac{1}{2}J\omega^2)}{\Delta t} + \frac{\Delta(\frac{1}{2}mv^2)}{\Delta t}$$

3. EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 Poskus v zvezi z aerodinamičnim uporom

3.1.1 Uporabljeni pripomočki

- cestno kolo s kolesarsko opremo, kolesarska oprava
- kolesarski računalnik Bryton Rider 750
- kolesarski merilnik moči Stages Power L-Shimano Ultegra R8100 Gen 3
- programska oprema Logger Pro
- računalnik
- aerodinamični ščit
- merilni trak
- kotomer (za določitev vnaprej določenih pozicij telesa)
- fotoaparati
- programska oprema AutoCAD

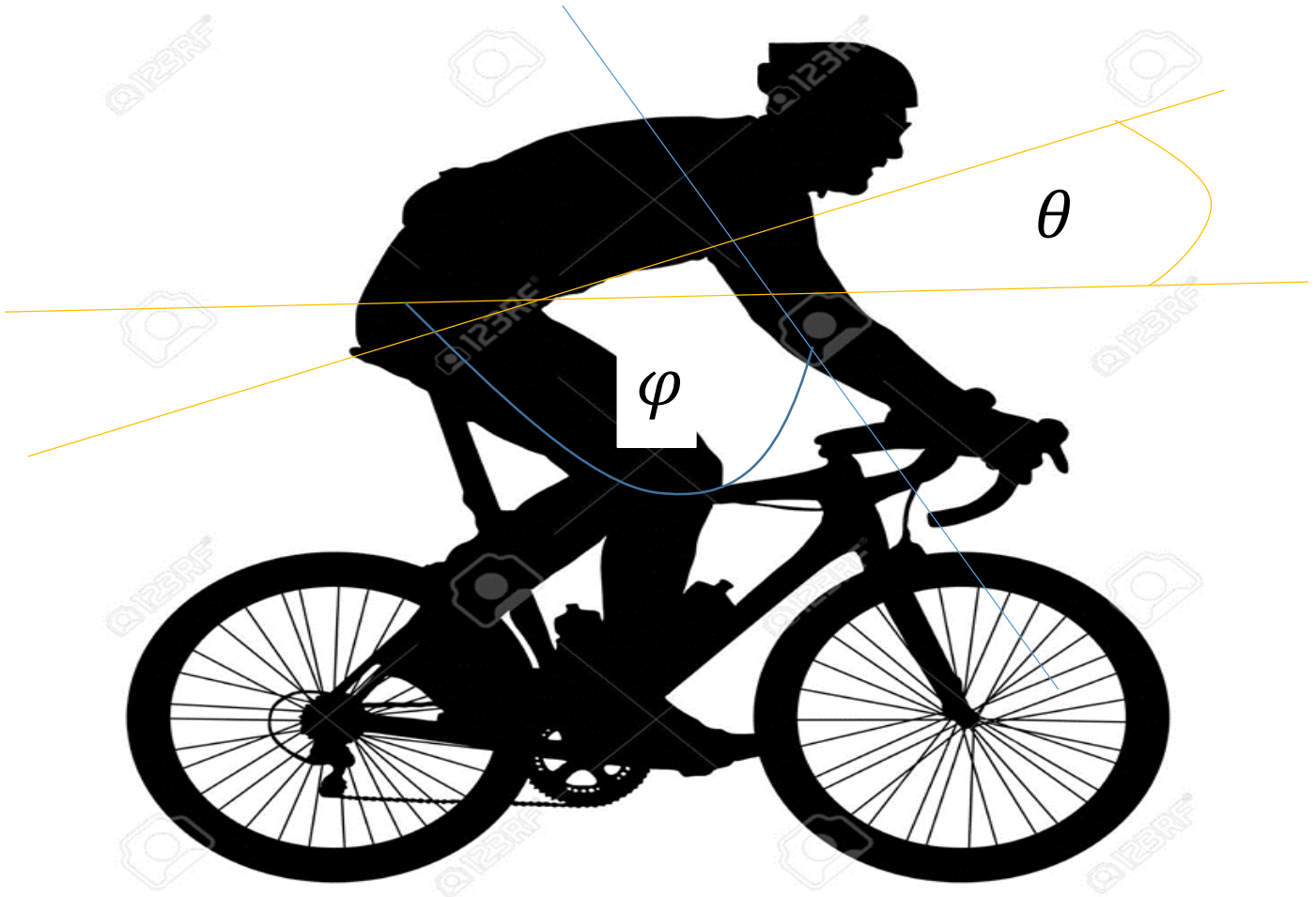
3.1.2 Metoda dela

1. Pred izvedbo eksperimenta cestno kolo ustrezno opremimo s kolesarskim računalnikom (Bryton Rider 750) ter merilnikom moči (Stages Power L-Shimano Ultegra R8100 Gen 3).
2. Pred začetkom določimo hitrosti, s katerimi bomo izvedli eksperimente ($35 \frac{km}{h}$, $40 \frac{km}{h}$, $45 \frac{km}{h}$) in postavitev telesa na kolesu, glede na vnaprej določena kota (θ in φ).
3. Z vso opremo in aerodinamičnim ščitom se odpravimo na zunanji velodrom.
4. Z vsako od teh treh hitrosti in treh postavitev telesa odpeljemo en krog v dolžina 410m, kar pomerimo z merilnimi inštrumenti na kolesarskem računalniku.
5. Nazadnje na cestno kolo namestimo aerodinamični ščit in z njim odpeljemo en krog z vsako od vnaprej določenih hitrosti. ¹



Slika 1: Zunanji velodrom

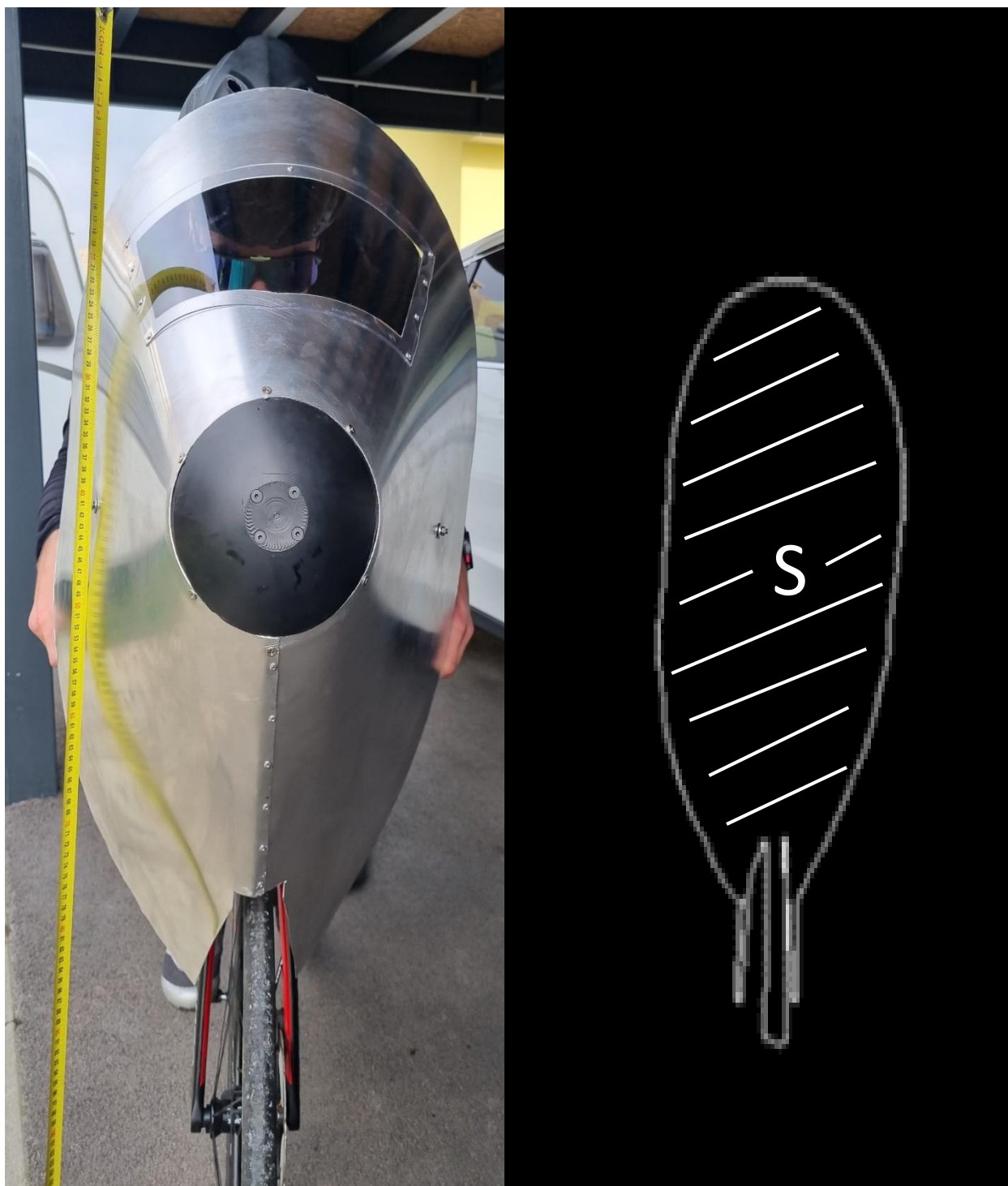
¹ Postopek 4. In 5. ponovimo trikrat



Slika 2: Določitev pozicije telesa glede na kota θ in φ

Drugi del eksperimenta služi potrditvi veljavnosti uporabljenega zakona o izgubljeni moči zaradi aerodinamičnega upora-sorazmernost s kubom hitrosti.

1. S fotoaparatom slikamo kolesarja. Slikamo površino, na katero deluje zračni upor (glej sliko 3). Slikamo vsako od različnih pozicij in nazadnje še sestav s ščitom. Pri vsaki fotografiji slikamo z navpično postavljenim merilnim trakom.
2. Pridobljene fotografije vnesemo v programsko opremo AutoCAD. Slike umerimo na pravilno velikost, tako da v AutoCAD programu zarišemo premico s poljubno dolžino in le to primerjamo z dolžino merilnega traku na sliki. Sliko povečujemo ali zmanjšujemo dokler se dolžini ne ujemata.
3. Uporabimo ravne premice, da natančno obrišemo silhuete kolesarja.
4. Ko imamo izrisane like, uporabimo program za izračun ploščine tega lika.
5. V literaturo pogledamo vrednosti koeficientov upora za različne pozicije in ščit ter preko vnaprej določenih hitrosti izračunamo izgube moči.



Slika 3: Primer slike za izračun ploščine kolesarja s ščitom

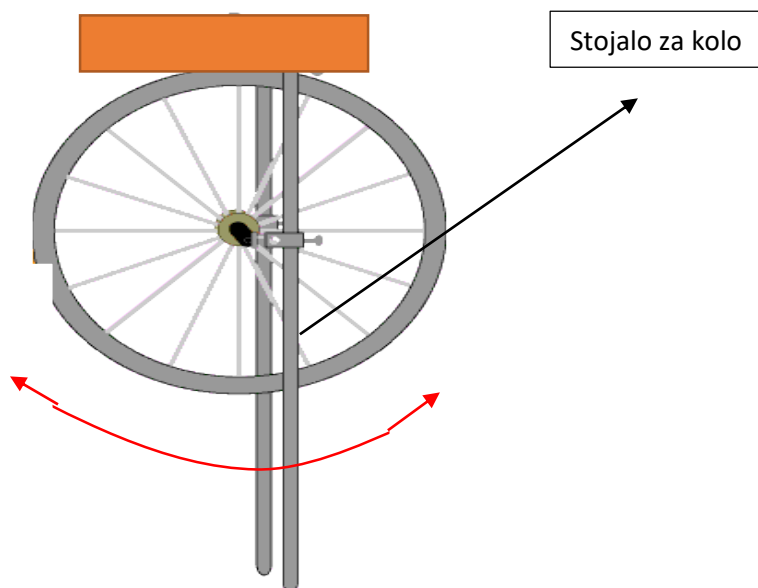
3.2 Poskus v zvezi s pospeševanjem kolesarja

3.2.1 Uporabljeni pripomočki

- Zadnje kolo cestnega kolesa
- Elektronska štoparica
- Računalnik
- Stojalo za kolo
- Vrvica (za vpetje kolesa)
- Elastika (za vpetje kolesa)

3.2.2 Metoda dela

1. Zadnje kolo kolesa s tanko kratko vrvico, ki ima zanemarljivo maso, tego vpne na kolesarsko stojalo.²
2. Kolo za majhen kot³ izmaknemo iz ravnovesne lege in pustimo, da oscilira merjenih 10 oscilacij.



Slika 4: Osciliranje kolesa

² Zagotoviti moramo, da masno središče kolesa ostane na geometrijski osi

³ Zagotovitev veljavnosti poenostavljene enačbe nihanja

4. REZULTATI IN ANALIZA

4.1 Rezultati meritev aerodinamičnega upora in računanje izgub zaradi zračnega upora

Tabela 1: Meritve zračnega upora za položaj $\theta = 42^\circ$, $\varphi = 73^\circ$

$v \left[\frac{km}{h} \right] \pm 0,1 \frac{km}{h}$	$t [s] \pm 1s$	Položaj (θ, φ) [$^\circ$] $\pm 0,1^\circ$	$P[W] \pm 3\%$	$\bar{P}[W] \pm 5\%$
45,0	32	42, 73	475	510
	33		535	
	32		519	
$v \left[\frac{km}{h} \right] \pm 0,1 \frac{km}{h}$	$t [s] \pm 1s$	Položaj (θ, φ) [$^\circ$] $\pm 0,1^\circ$	$P[W] \pm 3\%$	$\bar{P}[W] \pm 5\%$
40,0	36	42, 73	342	345
	35		349	
	35		345	
$v \left[\frac{km}{h} \right] \pm 0,1 \frac{km}{h}$	$t [s] \pm 1s$	Položaj (θ, φ) [$^\circ$] $\pm 0,1^\circ$	$P[W] \pm 3\%$	$\bar{P}[W] \pm 5\%$
35,0	40	42, 73	221	238
	40		251	
	40		243	

Tabela 2: Meritve zračnega upora za položaj $\theta = 21^\circ$, $\varphi = 102^\circ$

$v \left[\frac{km}{h} \right] \pm 0,1 \frac{km}{h}$	$t [s] \pm 1s$	Položaj (θ, φ) [$^\circ$] $\pm 0,1^\circ$	$P[W] \pm 3\%$	$\bar{p}[W] \pm 5\%$
45,0	32	21, 102	467	447
	32		429	
	32		444	
$v \left[\frac{km}{h} \right] \pm 0,1 \frac{km}{h}$	$t [s] \pm 1s$	Položaj (θ, φ) [$^\circ$] $\pm 0,1^\circ$	$P[W] \pm 3\%$	$\bar{p}[W] \pm 5\%$
40,0	35	21, 102	290	306
	35		327	
	35		302	
$v \left[\frac{km}{h} \right] \pm 0,1 \frac{km}{h}$	$t [s] \pm 1s$	Položaj (θ, φ) [$^\circ$] $\pm 0,1^\circ$	$P[W] \pm 3\%$	$\bar{p}[W] \pm 5\%$
35,0	41	21, 102	190	203
	40		217	
	40		203	

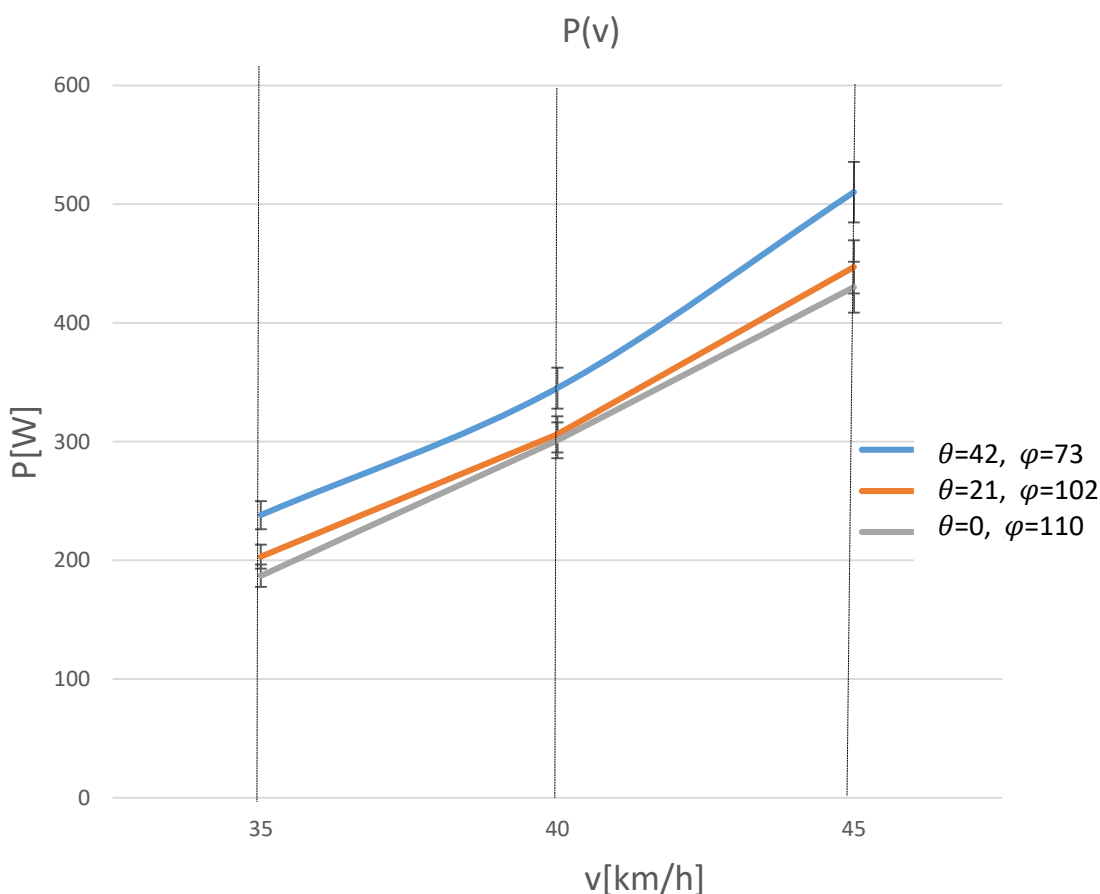
Tabela 3: Meritve zračnega upora za položaj $\theta = 0^\circ$, $\varphi = 110^\circ$

$v \left[\frac{km}{h} \right] \pm 0,1 \frac{km}{h}$	$t [s] \pm 1s$	Položaj (θ, φ) [$^\circ$] $\pm 0,1^\circ$	$P[W] \pm 3\%$	$\bar{P}[W] \pm 5\%$
45,0	32	0, 110	436	430
	32		426	
	32		430	
$v \left[\frac{km}{h} \right] \pm 0,1 \frac{km}{h}$	$t [s] \pm 1s$	Položaj (θ, φ) [$^\circ$] $\pm 0,1^\circ$	$P[W] \pm 3\%$	$\bar{P}[W] \pm 5\%$
40,0	36	0, 110	319	301
	36		299	
	35		285	
$v \left[\frac{km}{h} \right] \pm 0,1 \frac{km}{h}$	$t [s] \pm 1s$	Položaj (θ, φ) [$^\circ$] $\pm 0,1^\circ$	$P[W] \pm 3\%$	$\bar{P}[W] \pm 5\%$
35,0	41	0, 110	182	187
	40		188	
	40		192	

Napaka pri hitrosti vonžje je bila določena na podlagi grafa odstopanja hitrosti od vnaprej določene hitrosti. Napake za čas, kot in moč so, kakršne je na merilnih inštrumentih navedel proizvajalec. Pri napaki za povprečno moč, ki sem jo nadalje uporabil za oceno izgube energije, je ocenjena napaka na 5%, zaradi napak samih inštrumentov in vplivov zunanjih dejavnikov, ki popačijo točnost izgub, kot so naprimer veter, neželjeno pospeševanje med testom, napaka zaradi pritiska koles, različne zunanje temperature in podobno.

Naj poudarim, da podatki za povprečne moči, ki so pokazatelji izgub, ne zajemajo le aerodinamičnega upora pri določenih hitrostih, ampak tudi ostale izgube, kot so kotalno trenje, trenje v ležajih, trenje zaradi verižnice in podobno.

Primerjava porabe moči za premagvanje izgub, pri različnih postavitvah telesa:



Graf 1: Primerjava porabe povprečnih moči za različne postavitve telesa

Napake povprečne moči ($\pm 5\%$) so na grafu označene, medtem ko so napake zaradi hitrosti, zaradi zanemarljivosti v primerjavi z napako povprečne moči, niso označene. Enako velja za graf primerjave postavitve s ščitom (glej graf 2).

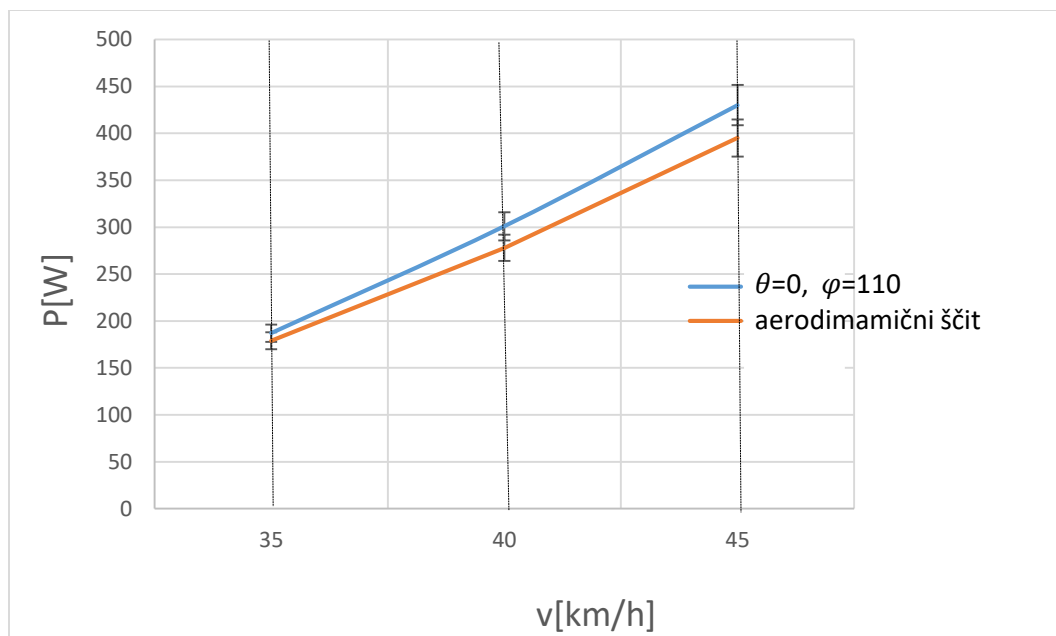
Do sedaj smo pregledali rezultate meritev izgub, če spreminjamo le postavitev kolesarja. Oglejmo si še, kaj se zgodi, ko na kolo namestimo aerodinamični ščit.

Tabela 4: Meritve zračnega upora s ščitom

$v \left[\frac{km}{h} \right] \pm 0,1 \frac{km}{h}$	$t [s] \pm 1s$	$P[W] \pm 5\%$
45,0	33	395
40,0	36	278
35,0	39	179

Kot se vidi iz rezultatov meritev s ščitom, je aerodinamična naprava učinkovitejša od vseh postavitev teles brez izboljšav. Zato je smiselno primerjati najučinkovitejšo postavitev telesa ($\theta=0$, $\varphi=110$) s ščitom.

Primerjava porabe moči za premagvanje izgub, med najučinkovitejšo postavitvijo kolesarja in ščitom:



Graf 2: Primerjava porabe povprečnih moči med najučinkovitejšo postavitvijo telesa in ščitom

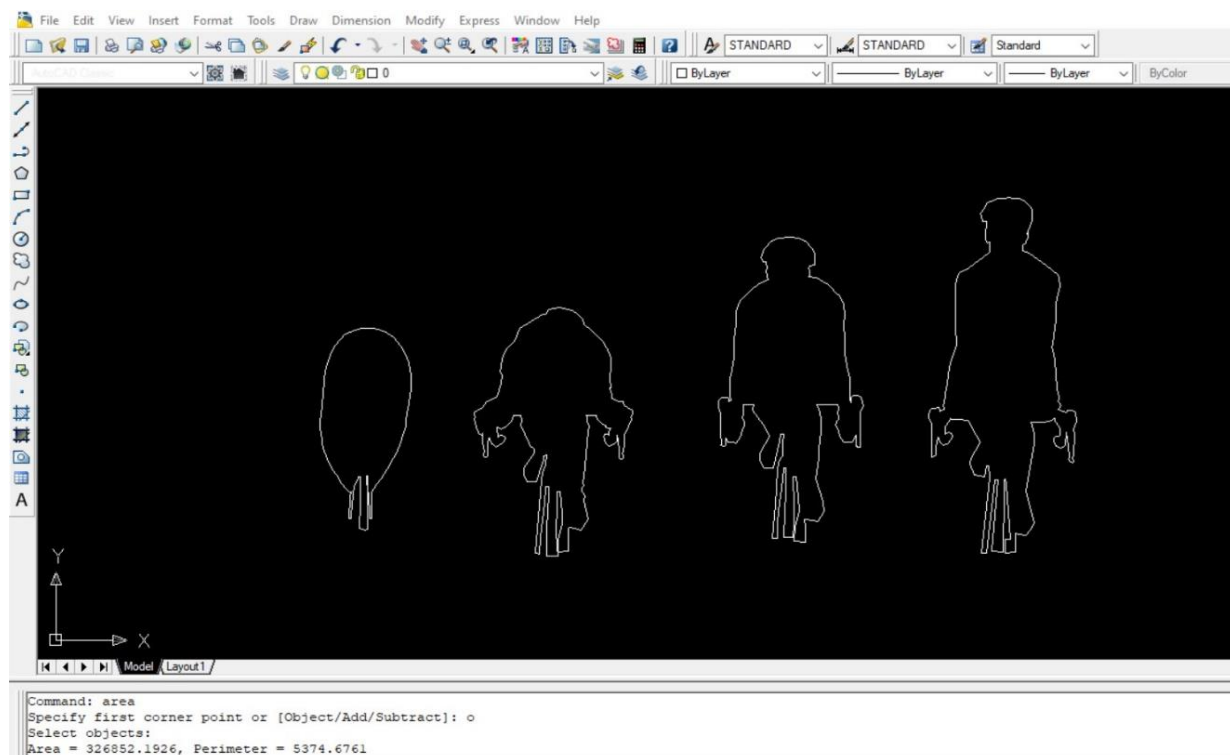
Naslednji korak prvega dela naloge je preverjanje veljavnosti aerodinamičnega zakona. V obstoječem zakonu nastopa koeficient upora, ki je bil za vsako postavitev telesa ter za aerodinamični ščit ocenjen s pomočjo literature.

Vrednosti koeficientov upora (Wilson, Schmidt 2020):

- Postavitev telesa $\theta = 42^\circ$, $\varphi = 73^\circ$: $c_U=0,86\pm0,08$
- Postavitev telesa $\theta = 21^\circ$, $\varphi = 102^\circ$: $c_U=0,85\pm0,08$
- Postavitev telesa $\theta = 0^\circ$, $\varphi = 110^\circ$: $c_U=0,84\pm0,08$
- Aerodinamični ščit: $c_U=0,82\pm0,08$

Tabela 5: Izračunane ploščine

	Postavitev telesa $\theta = 42^\circ$, $\varphi = 73^\circ$	Postavitev telesa $\theta = 21^\circ$, $\varphi = 102^\circ$	Postavitev telesa $\theta = 0^\circ$, $\varphi = 110^\circ$	Aerodinamični ščit
Ploščina[m ²] ($\pm 0,0001\text{m}^2$)	0,4477	0,3909	0,3682	0,3269



Slika 5: Izračun ploščin likov, podan izpis program izračuna za ščit

Za nadaljnje izračune je potrebno podati vse pomembne kontrolirane spremenljivke, ki veljajo le za prvi del raziskovalne naloge — del v zvezi z aerodinamičnim uporom.

KONTROLIRANE SPREMENLJIVKE:

- stalen zračni tlak (vpliv na gostoto zraka): $p_0=1008,4\text{kPa}\pm 0,1\text{Pa}$
 - brezvetrje (anemometer)
 - stalna temperatura (vpliv na gostoto zraka): $T=11^\circ\text{C}\pm 1^\circ\text{C}$
 - enaka dolžina: $d=410\text{m}\pm 10\text{m}$
 - enak tlak v zračnicah: $p=7,2\text{bar}\pm 0,2\text{bar}$
- stalna gostota zraka: $Vp=RnT=R\frac{m}{M}T \Rightarrow \rho=\frac{m}{V}=\frac{pM}{RT}=1,24\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\pm 0,01\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Sedaj imamo na voljo vse potrebne podatke za izračun upora po formuli:

$F_U(v)=\frac{1}{2}\rho c_U S v^2$, uvedemo novo spremenljivko: $k_U=\frac{1}{2}\rho c_U S$ ter novi zakon zapišemo v obliki:

$$F_U(v)=k_U v^2$$

Za izračun izgube energije zaradi zračnega upora potrebujemo moč, zato silo upora pretvorimo v moč po enačbi:

$$P(v)=F_U v=k_U v^3$$

Tabela 6: Uvedeni koeficienti upora

	Postavitev telesa $\theta = 42^\circ, \varphi = 73^\circ$	Postavitev telesa $\theta = 21^\circ, \varphi = 102^\circ$	Postavitev telesa $\theta = 0^\circ, \varphi = 110^\circ$	Aerodinamični ščit
Koeficient $k_U [\frac{\text{kg}}{\text{m}}]$	$0,23871\pm 0,024$	$0,20600\pm 0,021$	$0,19176\pm 0,020$	$0,16620\pm 0,018$

Izračun uvedenega koeficienta upora:⁴

$$k_U=\frac{1}{2}\rho c_U S=\frac{1,24\times 0,82\times 0,3269}{2}=0,16620\frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Izračun napake koeficienta upora:

$$\Delta\rho=0,01\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\Rightarrow \delta\rho=\frac{\Delta\rho}{\rho}=\frac{0,01}{1,24}=0,8\%\cong 1\%$$

$$\delta c_U=9,76\%, \delta S=0,03\%$$

$$\delta k_U=\delta\rho+\delta c_U+\delta S=10,59\%\cong 11\%$$

$$\Delta k_U=k_U\delta k_U=0,025\frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$k_U=0,23869\frac{\text{kg}}{\text{m}}\pm 0,025\frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

⁴ Prikazan je izračun koeficienta za aerodinamični ščit, za izračun ostalih velja enak postopek

⁵ Za vsako od količin v enačbi za koeficient je na enak način absolutna napaka prevedena v relativno

Za določitev izgub moči pomnožimo koeficient (k_U) z željeno hitrostjo. Za najboljši pokazatelj upora sem si izbral hitrost $45 \frac{km}{h}$, saj tu upor pride do največjega izraza izmed treh testiranih hitrosti.

Izračun izgube kolesarjeve moči:⁶

$$P(v) = k_U v^3 = 0,16620 \times (12,5)^3 = 324,61 W$$

Izračun napake izgube moči:

$$\delta k_U = 10,59\%, \delta v = 0,8\%$$

$$\delta P = \delta k_U + 3 \times \delta v = 12,99\%$$

$$\Delta P = P \delta P = 42,17 W$$

$$P = 324,61 W \pm 42,17 W \Rightarrow P = 320 W \pm 40 W$$

Tabela 7: Izgube moči

	Postavitev telesa $\theta = 42^\circ, \varphi = 73^\circ$	Postavitev telesa $\theta = 21^\circ, \varphi = 102^\circ$	Postavitev telesa $\theta = 0^\circ, \varphi = 110^\circ$	Aerodinamični ščit
Izguba moči P[W]	470±60	400±50	370±50	320±40

Primerjava izračunane izgube moči z izmerjeno porabo moči:

$$\text{Razmerje} = \frac{\text{izračunana vrednost}}{\text{izmerjena vrednost}}$$

Postopek izračuna:⁷

$$\text{Razmerje} = \frac{324,6}{395} = 82,2\%$$

Napaka razmerja:

$$\delta \text{Razmerja} = \delta \text{izračunane vrednosti} + \delta \text{izmerjene vrednosti} = 12,99\% + 5\% = 17,99\%$$

$$\Delta \text{Razmerja} = \delta \text{Razmerja} \times \text{Razmerja} = 14,8\% \cong 15\%$$

Tabela 8: Razmerja izračunane vrednosti ter izmerjene vrednosti

	Postavitev telesa $\theta = 42^\circ, \varphi = 73^\circ$	Postavitev telesa $\theta = 21^\circ, \varphi = 102^\circ$	Postavitev telesa $\theta = 0^\circ, \varphi = 110^\circ$	Aerodinamični ščit
Razmerje[%]	91,4±13,5	90,0±13,3	87,1±12,9	82,2±14,8

⁶ Enak izračun moči velja za vsa telesa, prikazan je postopek izračuna za aerodinamični ščit

⁷ Enak postopek velja za vsa telesa, prikazan je postopek izračuna za aerodinamični ščit

4.2 Rezultati meritev izgub pri pospeševanju in ocena izgub moči

Pri izvajanju poskusa za ugotavljanje izgub pri pospeševanju sem pazil na konstantnost:

- enako kolo: $r=0,345\text{m}\pm 0,001\text{m}$ ($\delta r = 0,29\%$)
- konstantna sobna temperatura: $T=22,0^\circ\text{C}\pm 0,5^\circ\text{C}$
- masa kolesa: $m=1,645\text{kg}\pm 0,001\text{kg}$ ($\delta m = 0,06\%$)
- zunanji vplivi (zračni tokovi)

Gravitacijski pospešek za Kranj, kraj, kjer je potekal poskus znaša: $g=9,80638\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\pm 0,00001\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ (Adams, 2014) ($\delta g = 0,0001\%$), konstanta π je določena na 10 decimalk natančno, zato sem π vzel z ničelno napako.

Tabela 9: Meritve oscilacij

t[s] (štetih 10 oscilacij) ($\pm 0,01\text{s}$)	$\bar{t}[\text{s}]$ (štetih 10 oscilacij) ($\pm 0,01\text{s}$)	$t_0[\text{s}]$ (ena oscilacija) ($\pm 0,01\text{s}$) ($\delta t_0=0,66\%$)
15,15	15,11	1,511
15,21		
15,12		
15,09		
14,99		

Nihajoče gibanje kolesa opisuje enačba:

$$t_0=2\pi\sqrt{\frac{J}{mgr}} \Rightarrow J=\frac{t_0^2 mgr}{4\pi}$$

Izračun vztrajnostnega momenta nihajočega se telesa:

$$J=\frac{(1,511)^2 \times 1,645 \times 9,80636 \times 0,345}{4\pi}=1,01\text{kgm}^2$$

Izračun napake vztrajnostnega momenta telesa:

$$\delta J = 2\delta t_0 + \delta m + \delta g + \delta r = 2 \times 0,66\% + 0,06\% + 0,0001\% + 0,29\% = 1,6701\%$$

$$\Delta J = \delta J \times J = 0,02\text{kgm}^2$$

$$J=1,01\text{kgm}^2 \pm 0,02\text{kgm}^2$$

Za izračun vztrajnostnega momenta kolesa je treba uporabiti Steinerjev teorem⁸:

$$J_K = J - mr^2 = 1,01 - 1,645 \times (0,345)^2 = 0,81\text{kgm}^2$$

$$\Delta J_K = \Delta J - \Delta mr^2 \approx \Delta J = 0,02\text{kgm}^2$$

$$J_K = 1,01\text{kgm}^2 \pm 0,02\text{kgm}^2$$

⁸ Predvidevam, da je masno središče na sredini kolesa

Izgube pri pospeševanju od $0 \frac{km}{h} \rightarrow 30 \frac{km}{h}$, v času $t=30s$:

Izgube moči izračunamo po enačbi:⁹

$$P = J_k \alpha \Delta \omega$$

$$\Delta \omega = \frac{v}{r} = \frac{8,33}{0,345(1 \pm 0,29\%)} = 24,15 s^{-1} \pm 0,07 s^{-1}$$

$$\alpha = \frac{\Delta \omega}{t} = \frac{24,15 \pm 0,07}{30} = 0,81 s^{-2} \pm 0,0003 s^{-2}$$

$$P = (1,01 \pm 0,02) \times (0,81 \pm 0,0003) \times (24,15 \pm 0,07) = 19,80 W \pm 0,50 W$$

Izgube pri pospeševanju od $30 \frac{km}{h} \rightarrow 45 \frac{km}{h}$, v času $t=30s$:

$$\omega(45) = 36,232 s^{-1} \pm 0,07 s^{-1} \rightarrow \alpha = \frac{\omega(45) - \omega(30)}{\Delta t} = 0,4026 s^{-2} \pm 0,005 s^{-2}$$

$$P = 14,70 W \pm 0,50 W$$

Teoretična ocena koliko moči porabijo šprinterji za pospeševanje v povprečnem šprintu skupine:

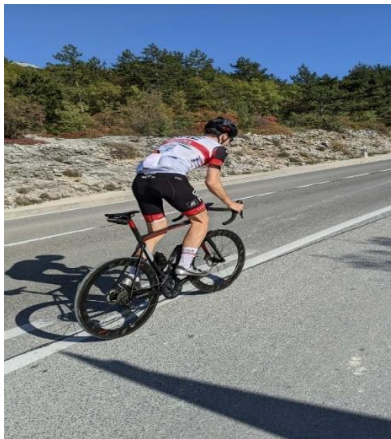
$$\rightarrow v_z = 65 \frac{km}{h}, v_k = 75 \frac{km}{h}, \Delta t = 10s \text{ (Wilson, Schmidt, 2020)}$$

$$\omega(65) = 52,335 s^{-1} \pm 0,07 s^{-1}, \omega(75) = 60,386 s^{-1} \pm 0,07 s^{-1} \rightarrow \alpha = 0,8051 \pm 0,003 s^{-2}$$

$$P = 49,10 W \pm 1,20 W$$

Naj izpostavim, da izračuni veljajo le za eno kolo kolesa. Če privzamemo enako maso obeh koles lahko izgubljeno moč zaradi pospeševanja zgolj množimo z 2.

Pomembno je dodati, da ti izračuni veljajo le za kolo kolesarja, ne upoštevajo pa tudi pospeševanja samega telesa kolesarja. Za upoštevanje te spremenljivke moramo dodati še translacijsko energijo kolesarja: $W_k = \frac{m_{KOLESARJA} \times \Delta v^2}{2}$ (pretvorimo v moč, tako da delimo s časom). Izračunani moči preprosto seštejemo in dobimo celotno izgubo moči zaradi pospeševanja.



Slika 6: Pospeševanje kolesarja

⁹ Izračuni napak so enaki kot v prvem delu rezultatov — del v zvezi z aerodinamičnim uporom

5. RAZPRAVA IN ZAKLJUČEK

5.1 Vrednotenje rezultatov meritev aerodinamičnega upora

Po temeljiti analizi rezultatov meritev aerodinamičnega upora sem ugotovil, da lahko zgolj s prilagoditvijo telesne postavitve na kolesu v najučinkovitejšo postavitev ($\theta = 0^\circ$, $\varphi = 110^\circ$) lahko privarčujemo od 10% do 20% moči (glej stran 17).

Privarčevano energijo lahko preprosto izračunamo kot $E_{\text{PRIVARČEVANA}} = P_{\text{PRIVARČEVANA}} \cdot t$.

Predpostavimo, da lahko neko progo v najmanj optimalnem aerodinamičnem položaju ($\theta = 42^\circ$, $\varphi = 73^\circ$) prevozimo s povprečno močjo 250W (kolesar 1). Enako progo bi kolesar v najbolj optimalnem položaju prevozil s povprečno močjo 200W (kolesar 2). Naj opozorim, da v teh dveh položajih kolesar progo prevozi v enakem času. Vzemimo čas kolesarjenja 3h, kar je povprečen čas mojega treninga med kolesarsko sezono.

Izračun privarčevane energije:

$$E_{\text{PRIVARČEVANA}} = (250\text{W} - 200\text{W}) \times (10\,800\text{s}) = 540\,000\text{ J} = 129\text{ kcal}$$

Izračunali smo privarčevano energijo. Za lažjo primerjavo pogledjmo, koliko energijskih ploščic in gelov (normalna kolesarska hrana med kolesarsko dirko) mora kolesar 1 zaužiti, da bo nadomestil izgube zaradi preproste postavitve telesa.

Energijska vrednost kolesarske ploščice: $150\text{kcal} \pm 30\text{kcal}$

Energijska vrednost kolesarskega gela: $170\text{kcal} \pm 30\text{kcal}$

Na prvi pogled bi preprosto dejali, da mora kolesar 1 zaužiti le en kolesarski gel ali ploščico več kot kolesar 2, da nadomesti vse izgube zaradi položaja na kolesu, vendar takšna interpretacija ni povsem pravilna, saj bo kolesar 1 moral porabiti bistveno več mišične in kardiovaskulatorne kapacitete. Teh izgube pa ne moremo izračunati trivialno. Za zadostno oceno pravih izgub so potrebne nadaljne študije maskulturnih in kardiovaskulturnih stanj med takšno obremenitvijo.

Poleg tega pa sem po analizi podatkov poskusa s ščitom ugotovil, da le ta napram najučinkovitejši poziciji ($\theta = 0^\circ$, $\varphi = 110^\circ$) pri izgubi moči oziroma energije privarčuje od 5 % do 10 %, kar je, kot sem obrazložil v prejšnjem odstavku, ogromna količina privarčevane energije/moči.

V prvem delu raziskave sem torej potrdil dve hipotezi, in sicer:

1. Zračni upor lahko močno zmanjšamo z optimalno pozicijo kolesarja (zmanjšamo S)
2. Ščit zmanjša izgube zaradi upora, saj zmanjša površino (S) in koeficient upora (c_u)

Koeficient upora (c_u) je pri ščitu zmanjšan zaradi oblike samega ščita, ki zmanjša turbulentno gibanje zraka okoli kolesa in kolesarja (Wilson, Schmidt 2020).

MOŽNE IZBOLJŠAVE:

Testiranje v notranjem velodromu (minimalizacija zunanjih vplivov), natančnejše meritve (laserske meritve časa ter dolžine, natančnejši merilnik moči), mehansko odmerjena hitrost vožnje (minimalizacija napak, zaradi pospeševanja) in podlaga z majšim koeficientom kotalnega trenja (v raziskavi uporabljen asfalt).

5.2 Vrednotenje rezultatov o pravilnosti aerodinamičnega zakona

V tem delu raziskave je bilo treba ugotoviti, ali izračunana izguba zaradi zračnega upora ustreza napovedim iz literature, torej če se izračun giblje od 80 % do 90 % izmerjene vrednosti (glej uvod).

Končni rezultat ujemanj lahko podamo kot $87\% \pm 5\%$, tako da z najmanjšo celoštevilsko napako zajamemo vse izračunane primerjave (glej tabela 8).

Končni rezultat se v okviru napak ujema z napovedjo iz literature, torej lahko sklepamo, da kvadratni zakon aerodinamičnega upora ustreza našim meritvam oziroma izračunom.

Torej sem potrdil nadaljno hipotezo:

3. Zračni upor na kolesarja vpliva s kubom hitrosti (v), v skladu z enačbo $P = F_U v = \frac{1}{2} \rho S C_U v^3$

Poleg uporabljene metode za vrednotenje zakona lahko za približno oceno pravilnosti uporabimo zvezo $\frac{P_1}{P_2} = \frac{v_1^3}{v_2^3}$ oziroma $(\frac{v_1}{v_2})^3 = \text{konstanta}$. Na tak način lahko dobimo hitro oceno ali je poraba moči sorazmerna z kubom hitrost.

Po tej metodi z mojimi rezultati dobim $(\frac{v_1}{v_2})^3 = 1,4 \pm 0,1$ in $\frac{P_1}{P_2} = 1,4 \pm 0,1$, kar se ujema v skladu z napako. Torej lahko tudi po tej metodi sklepam, da je moč pri gibanju kolesarja skozi kapljevino (zrak) sorazmerna z kubom hitrosti kolesarja.

MOŽNE IZBOLJŠAVE:

Uporaba boljšega programa za izračun ploščine likov/slik (program, ki izračuna ploščino pokritih pikslov z sliko kolesarja), natančnejša določitev upornostnih koeficientov teles (z merjenjem) in slike kolesarja z višjo resolucijo (natančnejši izračuni ploščin).

5.3 Vrednotenje rezultatov izračunanih izgub zaradi pospeševanja kolesarja

Ugotovil sem, da so izgube zaradi pospeševanja kolesarja mnogo večje, kot bi si sam mislil.

Zamislimo si¹⁰, da v roku ene dirke kolesar z maso 70kg iz $0 \frac{km}{h}$ na $30 \frac{km}{h}$ pospeši enkrat, iz $30 \frac{km}{h}$ na $45 \frac{km}{h}$ pa kar 50 krat (približna ocena števila pospeševanj na dirki) ter nazadnje enkrat iz $65 \frac{km}{h}$ na $75 \frac{km}{h}$ (ciljni šprint).¹¹

Izguba energije zgolj zaradi pospeševanja v navedenem primeru:

$$E_{IZGUBLJENA} = 1 \times [2(\frac{1}{2}J\Delta\omega_1^2) + \frac{1}{2}m\Delta v_1^2] + 50 \times [2(\frac{1}{2}J\Delta\omega_2^2) + \frac{1}{2}m\Delta v_2^2] + 1 \times [2(\frac{1}{2}J\Delta\omega_3^2) + \frac{1}{2}m\Delta v_3^2] \cong 33\,000J$$

Hipotetično izračunana izguba energije znaša 7 900 cal.

Predpostavimo, da kolesar 1 med dirko pospeši 30-krat več (iz $30 \frac{km}{h}$ na $45 \frac{km}{h}$) — kot kolesar 2. V tem primeru bo kolesar 2 v povprečju napram kolesarju 1 privarčeval 2200 cal, poleg tega pa, kot v primeru z minimalizacijo zračnega upora in z modifikacijo kolesarjeve pozicije, tudi tu odgovor ni tako enoznačen, saj kolesar 1 doživi ogromno večje muskularne in kardiovaskularne šoke kot kolesar 2.

Rezultati govorijo, da je za zmago na kolesarski dirki absolutno potrebno minimalizirati število pospeševanj (izgube) oziroma pospeševati v daljšem času. Ta pospeševanja so neželjena, najbolj energetska učinkovita je vožnja z konstantno hitrostjo.

Torej sem potrdil naslednjo hipotezo:

4. Izgube zaradi pospeševanja kolesarja so lahko ključnega pomena za zmago na dirki

MOŽNE IZBOLJŠAVE:

Natančnejše merjenje časa oscilacij kolesa (svetlobna vrata), bolj togo vpeto kolo (izgube zaradi trenja med vrvico in kolesom), omejena pot oscilacije (odmiki kolesa zgolj v eni dimenziji), natančnejše meritve mase kolesa (natančnejša tehtnica) in natančnejše meritve polmera kolesa (laserski merilnik).

PREDLOGI ZA NADALJNE RAZISKAVE:

- Kardiovaskularni odzivi na obremenitve kolesarja
- Zmanjšanje zračnega upora zaradi vožnje v zavetrju (za večimi kolesarji)
- Merjenje kotalnega trenja pri vožnji s kolesom

¹⁰ Predpostavimo, da kolesar pospešuje v skladu z računi (glej podpodlavje 4.2)

¹¹ Ostalih pospeševanj ne upoštevamo

6. PRILOGE

Za konec naj izpostavim, da je moja aerodinamična izboljšava v obliki ščita izredno nerodna za vsakodnevno uporabo. Predvsem je problematična prerazporeditev mase, ki jo doprinese ščit. Ščit prenese preveliko maso na krmilo, kar na krmilo, ob porušenju ravnovesja krmila, povzroča velik navor. Ukrotitev takšnega dodatnega navora zahteva kar nekaj predhodnih izkušenj, saj v nasprotnem primeru le ta lahko privede do padca. Poleg tega ščit na kolo deluje kot veliko jadro, kar kolesarja dodatno izpostavlja bočnim vetrovom ali velikim motornim vozilom. Taka izpostavljenost je dovolj velika, da lahko neizkušenega kolesarja hitro privede do padca.

Naj še dodam, da ima moj ščit še eno veliko hibo, saj je kolesar, ki uporablja ščit, prisiljen v zelo prisiljeno pozicijo z maksimalnimi nagibi trupa, kar neposredno vpliva na kolesarjevo zmožnost proizvodnje visokih moči.

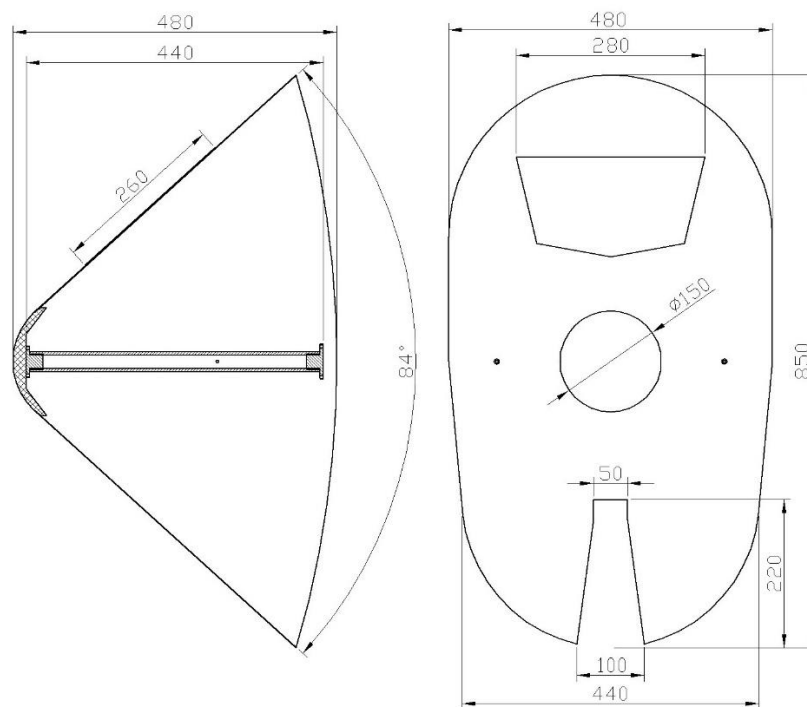
Moj ščit-kot aerodinamična izboljšava vsekakor pripomore k lažji vožnji pri visokih hitrostih, vendar ima kar precej pomanjkljivosti, ki bi jih bilo potrebno odpraviti. Z optimizacijo ščita (lahki materiali, enostavno vpenjanje, manjša površina ščita ...) bi se dalo tak prototip tudi komercializirati.



Slika 7: Testiranje porabe moči z ščitom

7. TEHNIČNA DOKUMENTACIJA

Ščit, uporabljen v raziskavi, je narejen iz aluminija, ogledalce skozi katerega kolesar gleda na vozno površino je narjejeno iz polikarbonatne prozorne plošče in konica ščita je narejena in plastične mase. Moj ščit tehta 750g.

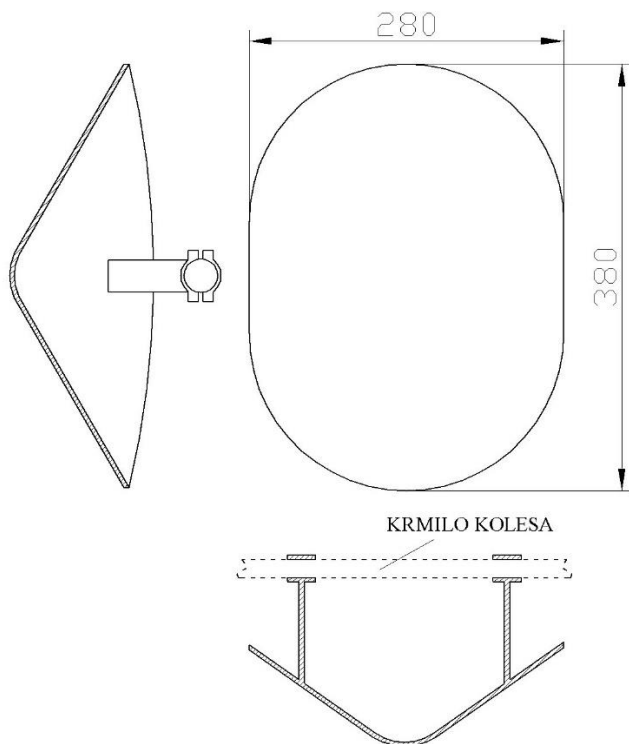


Slika 8: Natančne mere mojega ščita



Slika 9: Moj ščit

Zaradi neprimernosti ščita za vsakdaje potrebe in tržne priložnosti sem izdelal skico optimiziranega ščita, ki zagotavlja optimalen kompromis med energijsko učinkovitostjo ter primernostjo za vsakodnevno uporabo.



Slika 10: Optimiziran kolesarski ščit

Kolesarski ščit, kot tržni izdelek, bi bil primern predvsem za treninge kolesarjev. Saj tako lahko kolesar vozi s visokimi hitrostmi, tudi preko $50 \frac{km}{h}$, ob zmernih porabah energije. Vožnja na treningih pri visokih hitrostih je za tekmovalne kolesarje ključnega pomena, saj na kolesarski dirki hitrosti preko $50 \frac{km}{h}$ niso nič posebnega, zaradi ogromnega zavetrja, ki ga povzroča množica kolesarjev. Nujno potreben trening, zaradi drugačnega obnašanja kolesa ter kolesarja pri taknjih pogojih, je opravljen z vožnjo za kolesarskimi vozili-avtomobil. Taknja vožnja postavlja vprašanja o varnosti, saj se je ne malo kolesarjev poškodovalo pri takšnjih treningih, medtem ko se pri vožnji z mojim optimiziranim ščitom izognemo vsakeršnji polemiki zaradi varnosti.

8.VIRI IN LITERATURA

ABDULGHANY, A. R. (2017) Generalization of parallel axis theorem from rotational inertia. American Journal of Physics, 85 (10), pp. 791-795

ADAMS, B. (2014) Local Acceleration of Gravity [WWW]. Dostop: <https://www.wolframalpha.com/widgets/view.jsp?id=e856809e0d522d3153e2e7e8ec263bf2> (05.02.2023)

NAVE, C. R. (2016) Hyperphysics [WWW]. Dostop: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html> (23.12.2022)

TSOKOS, K. Physics for the IB Diploma Exam Preparation Guide. 6th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2016

WILSON, D. G., SCHMIDT, T. Bicycling Science. 4th ed. Izd. Massachusetts Institute of Technology: The MIT Press, 2020