Mladi raziskovalci Slovenije 2022 56. srečanje

VPLIV TEMPERATURE ZRAKA NA ZRAČNI UPOR RAKETE

IZDELAVA ZRAČNEGA TUNELA IN MERJENJE ZRAČNEGA UPORA

Fizika in astronomija Raziskovalna naloga

> OŠ Bojana Ilicha, Maribor Avtorja: Milica Marković, Dino Đonlagić Mentor: Vitomir Horvat

Maribor, april 2022

KAZALO

Vsebina

1. UVOD
1.1 Nameni 8
1.2 Hipoteze
2. OSNOVNI KONCEPTI
2.1 Zračni tok10
2.2.1 Sila zračnega upora10
2.2.2 Računanje sile zračnega upora13
3. IZDELAVA ZRAČNEGA TUNELA
3.1 Vgradnja komponent
3.2 Izdelava ohišja
4. IZDELAVA RAKETE
5. IZVEDBE MERITEV IN REZULTATI
5.1 Poskus 1
5.1.1 Rezultati 1. poskusa
5.2 Poskus 2
5.2.1 Rezultati 2. poskusa
5.3 Poskus 3
5.3.1 Rezultati 3. poskusa25
5.4 Poskus 4
5.4.1 Rezultati 4. poskusa
6. ZAKLJUČEK
7. DRUŽBENA ODGOVORNOST
8. PRILOGE
8.1 Slike
8.2 Koda za mikrokrmilnik na matični plošči (Arduino) s senzorjem Whadda WPSE477 FSR37
8.3 Koda za mikrokrmilnik na matični plošči (Arduino) s senzorjem »Joy-it SEN-HX711-01«
8.4 Tehnične risbe in uporabljeni materiali
8.4.1 Mere in izbira materialov zračnega tunela
8.4.2 Mere rakete (»nacionalke«)
9. VIRI

KAZALO SLIK

Slika 1: Vilični mehanizem in sile (lasten vir).	. 11
Slika 2: Vilični mehanizem za prenos sile zračnega upora na senzor izven merilne celice (lasten vir)).11
Slika 3: Lega konice viličnega sitema na senzorju (lasten vir).	. 12
Slika 4: Tabela gostote zraka glede na temperaturo(lasten vir)	. 14
Slika 5 : Merilna komora z uporabo šeleshamer papirja in stiropora (lasten vir)	. 17
Slika 6: Zadnji del tunela (lasten vir).	. 18
Slika 7: Risba 3D modela spodnjega dela rakete in špica (lasten vir)	. 19
Slika 8: Lažja raketa na vozičku (lasten vir).	. 20
Slika 9: Dinamometer ob poskusu z lažjo raketo (lasten vir)	. 20
Slika 10: Velika raketa na vrvicah (lasten vir).	. 21
Slika 11: Mala raketa na vrvicahma (lasten vir)	. 21
Slika 12: Sile, ki delujejo na vilični sistem v tretjem poskusu (lasten vir)	. 23
Slika 13: Prvi vilični mehanizem in prenos sile na senzor (lasten vir)	. 24
Slika 14: Sila v odvisnosti od časa pri enakomernem delovanju ventilatorja. Rezultati meritve tretjeg	ga
poskusa, kjer je bila hitrost zraka konstanta.(lasten vir)	. 26
Slika 15: Sila v odvisnosti od časa pri zagonu ventilarja iz mirovanja (lasten vir)	. 27
Slika 16: Shema vezave žic med arduinom in senzorjem.	. 28
Slika 17: Sila v odvisnosti od časa. Rrezultati meritev četrtega poskusa, kjer je bila hitrost konstanta	ı in
temperatura 23,1 °C (lasten vir).	. 29
Slika 18: Rezultati meritve četrtega poskusa, kjer je bila hitrost zračnega toka konstantna in	
temperatura 16 °C (lasten vir).	. 32
Slika 19:Skica povezave žic med arduinom in senzorjem.	. 33
Slika 20: Začetni del tunela (lasten vir)	. 36
Slika 21: Celoten zračni tunel (lasten vir).	. 36
Slika 22: Mere spodnje in stranske vezane plošče merilne komore in pleksi stekla (lasten vir)	. 41
Slika 23: Zgornja vezana plošča (lasten vir).	. 41
Slika 24:Povečava zgornje vezane plošče na območju montaže viličnega mehanizma (lasten vir)	. 42
Slika 25: Vezana plošča s kvadratno luknjo, ki povezuje merilno komoro in začetni ter zadnji del	
tunela (lasten vir)	. 43
Slika 26: Plošče okrog slamic (lasten vir).	. 44
Slika 27: Plošče, ki obdajajo tulce (lasten vir).	. 45
Slika 28: Vezana plošča s okroglo luknjo (lasten vir)	. 46
Slika 29: Vezane plošče oblike trapeza (lasten vir)	. 47
Slika 30: Trikotniki iz vezanih plošč (lasten vir).	. 48
Slika 31: Naris letvice-1 (lasten vir)	. 48
Slika 32: Stranski ris letvice-1 (lasten vir).	. 49
Slika 33: Tloris letvice-1 (lasten vir)	. 49
Slika 34: Naris letvice-2 (lasten vir)	. 50
Slika 35: Stranski ris letvice-2 (lasten vir).	. 50
Slika 36: Tloris letvice-2 (lasten vir)	. 50
Slika 37: Naris letvice-3 (lasten vir)	. 51
Slika 38: Stranski ris letvice-3 (lasten vir).	. 51
Slika 39: Tloris letvice-3 (lasten vir)	. 52
Slika 40: Naris slamic (lasten vir).	. 52

Slika 41: Stranski ris slamic (lasten vir)	52
Slika 42: Naris stirodura (lasten vir).	53
Slika 43: Stranski ris stirodura (lasten vir).	53
Slika 44: Tloris stirodura (lasten vir)	54
Slika 45: Naris striopora (lasten vir).	55
Slika 46: Stranski ris stiropora (tudi penjen PVC) (lasten vir)	55
Slika 47: Stranski ris stiroporja na vrhu merilne komore (lasten vir)	55
Slika 48: Naris tulca (lasten vir)	56
Slika 49: Stranski ris tulca (lasten vir).	56
Slika 50: Naris viličnega sistema-risali na 2 mm debelo pločevino (lasten vir)	57
Slika 51: Naris ploščice med viličnim mehanizmom (lasten vir)	58
Slika 52: Stranski ris ploščice med viličnim mehanizmom (lasten vir).	58
Slika 53: Tloris ploščice med viličnim mehanizmom (lasten vir)	59
Slika 54: Naris spodnjega dela rakete (lasten vir).	60
Slika 55: Stranski ris spodnjega dela rakete (lasten vir)	61
Slika 56: Tloris spodnjega dela rakete (lasten vir).	61
Slika 57: Povečava stranskega risa krilc spodnjega dela rakete (lasten vir)	62
Slika 58: Naris špica rakete (lasten vir)	63
Slika 59: Stranski ris špica rakete (lasten vir).	63
Slika 60: Tloris špica rakete (lasten vir)	64

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujemo mentorju za potrpežljivost, usmerjanje in podporo pri izdelavi raziskovalne naloge ter za čas vložen v delo in raziskovanje.

Zahvaljujemo se tudi učiteljema Juretu Piklu in Vanetu Cafniku za pomoč pri enačbah in računanju ter iskanju primernih materialov za izdelavo zračnega tunela, ravnateljici Astrid Videc in šoli za finančno podporo, Jani Šerc za lektoriranje.

Ne smemo pozabiti na zahvalo družinskim članom, ki so nas ves čas podpirali in verjeli v nas.

Povzetek

Izhodišče

Temperatura zraka vpliva na hitrost leta rakete, z direktnim vplivom na zračni upor kar spremeni hitrost rakete.

Namen dela v raziskovalni nalogi je iskanje povezave med temperaturo zraka in zračnim uporom rakete.

Metode dela

Za namen izvedbe meritev smo se odločili za gradnjo zračnega tunela. Pred gradnjo zračnega tunela smo spoznali različne izvedbe zračnih tunelov in skonstruirali tunel, za katerega smo smatrali, da smo ga sposobni izdelati. Za namen izvedbe zračnega tunela smo raziskali gibanje tekočin in spoznali, kako lahko zračni tok naredimo čim bolj laminaren.

Silo zračnega upora smo merili z merilno celico. Pri vsakem poskusu smo zajeli približno 500 meritev in iz le-teh izračunali povprečno silo.

Merilna celica je bila pritrjena izven merilne komore. Silo zračnega upora smo prenesli izven merilne komore s pomočjo viličnega mehanizma. Zaradi uporabe viličnega mehanizma smo se morali seznaniti tudi z navorom.

Zračni upor smo merili v zračnem tunelu pri različnih temperaturah. Z namenom spremljanja količin, ki vplivajo na izid meritev, smo merili temperaturo in hitrost zraka v merilni komori.

Ugotovitve

V četrtem poskusu smo uspeli dokazati, da se sila zračnega upora spremeni v odvisnosti od temperature. Z izračunom koeficienta zračnega upora smo dokazali, da je koeficient skoraj enak v obeh primerih oz. je razlika koeficientov zanemarljiva.

Zaključek

Ugotovili smo, da je ob previdnem spremljanju pogojev mogoče izmeriti spremembo velikosti sile zračnega upora zaradi spremembe temperature. Z meritvami in izračunom smo potrdili hipotezo, da je zračni upor rakete večji pri nižji temperaturi zraka in obratno.

Abstract

Initial position

The temperature of the ambient air influences the airspeed of a rocket by directly influencing air resistance, which changes the airspeed of the rocket. The purpose of this work is to determine the connection between the ambient air temperature and the drag experienced by the rocket.

Methods

To perform our measurements we decided to build a wind tunnel. Prior to construction, we investigate different styles and designs of wind tunnels before deciding on a design which fell within our construction abilities. We investigated fluid dynamics to determine how to make the airflow in our wind tunnel as laminar as possible. We measured the drag on the rocket with a measurement cell. For every test run we collected 500 data points and averaged them to obtain the average force experienced by the rocket during each test run. The meeasurement cell was attached outside of the measurement chamber. The force transfer from the rocket to the measurement cell was performed using a lever mechanism, which necessitated learning about torque. The air resistance was measured in the wind tunnel at different temperatures of air. For the purposed of monitoring quantities which could influence the measurement result we measured both the air temperature and the flow velocity in the measurement chamber.

Results

In our fourth trial we show the change of the air resistance with temperature. By calculating the drag coefficient, we should that the coefficient itself is practically the same throughout our measured temperature range, i.e. that the differences between the values of the drag coefficients is negligible.

Conclusion

We determine that with carful monitoring of measuremnt conditions it is possible to measure the difference in the experienced air resistance due to difference in the ambient air temperature. With our measurements and calculations we confirmed our hypothesis that the drag experienced by the rocket is larger at lower temperatures and vice versa.

6

1. UVOD

Zaradi velikega veselja do izdelovanja in raziskovanja raket smo se odločili, da bomo raziskali, kako temperatura zraka vpliva na višino leta rakete. Prva ideja za merjenje višine leta rakete v odvisnosti od temperature je bila izdelati kolikor je mogoče podobne rakete, v katere bi vstavili GPS oddajnik. Rakete bi izstrelili pri različnih temperaturah z iste nadmorske višine. Zaradi neprimernih, tj. nespremenljivih temperaturnih pogojev smo ugotovili, da poskusa v časovnem obdobju raziskovalne naloge ne bo mogoče izvesti z izstrelitvijo rakete. Posledično smo se odločili za izdelavo zračnega tunela, s pomočjo katerega smo merili silo zračnega upora na raketo. Meritve smo nameravali izvajati pri sobni in pri zimskih zunanjih temperaturah. V teoretičnem delu naloge bomo predstavili zračni tok, sile, ki delujejo na raketo in vpliv gostote zraka ob različnih temperaturah na raketo. V praktičnem delu naloge bomo predstavili izdelavo rakete, zračnega tunela, merilnih pripomočkov in instrumentov, izvedbo meritev, primerjavo in interpretacijo rezultatov. (Apogee Components,2011)

1.1 Nameni

Nameni naše raziskovalne naloge so:

- raziskati povezavo med temperaturo zraka in silo zračnega upora,
- preučiti delovanje sil na raketo med letom,
- preučiti dinamiko tekočin, ki vpliva na let rakete,
- izdelati zračni tunel, merilne pripomočke in instrumente za merjenje sile zračnega upora na raketo,
- izdelati raketo za izvajanje meritev.

1.2 Hipoteze

- Sila zračnega upora je zaradi večje gostote zraka večja pri nižji temperaturi in manjša pri višji temperaturi.
- Raketa bo zaradi manjše sile zračnega upora letela višje pri višji temperaturi in nižje pri nižji temperaturi. (Apogee Components,2011)
- Silo zračnega upora je mogoče izmeriti v zračnem tunelu z uporabo šolskih instrumentov in pripomočkov.
- Z dovolj domišljije se da izdelati merilne pripomočke in naprave, s katerimi bomo dosegli zadostno natančnost za potrditev prvih treh hipotez.

2. OSNOVNI KONCEPTI

V raziskovalni nalogi smo izdelali raketo, zračni tunel, merilne pripomočke in merilne instrumente. Raketo smo postavili v zračni tunel, kjer smo simulirali zunanje pogoje. V naslednjem delu naloge bomo razložili, kaj so zračni tok, vpliv gostote zraka na silo zračnega upora in ostale sile, ki vplivajo na let rakete.

2.1 Zračni tok

Zrak je tekočina, kar pomeni, da delci naravno tečejo iz območij z višjim tlakom v tista, kjer je tlak nižji. Zračni tok je gibanje zraka. Potrebuje prostor, skozi katerega se lahko premika in silo, ki ga bo premikala. V inženirstvu je pretok zraka meritev količine zraka na enoto časa, ki teče skozi določeno napravo. Zračni tok delimo na turbulentni in laminarni. Laminarni zračni tok se pojavi, ko zračni tok poteka v vzporednih plasteh, brez motenj med plastmi. Gibanje delcev zraka je zelo urejeno in ne ustvarja vrtincev. Turbulentni zračni tok je režim toka, za katerega so značilne kaotične spremembe lastnosti. To so hitre spremembe tlaka in hitrosti zračnega toka v prostoru in času. V nasprotju z laminarnim zračnim tokom se zrak ne premika več po plasteh, temveč ustvarja vrtince. Pretok zraka v prostoru je nemiren in neenakomeren. Hitrost tekočine se v točki nenehno spreminja tako v velikosti kot v smeri. (Gregorek, 1970) (U.S. Environmental Protection Agency, 2011) (oborudow.ru., b.d.) (VapourTec., 2021)

2.2 Sile na raketo v zračnem tunelu

2.2.1 Sila zračnega upora

Raketa se med letom ne premika skozi prazen prostor, ampak se zaletava v molekule zraka. Posledica zaletavanja predmetov (v našem primeru rakete) v molekule zraka je sila zračnega upora. (Maroševič, Mati Djuraki, Jerman, Gojkošek, 2014)

Sila zračnega upora deluje v smeri zračnega toka. Odvisna je od oblike telesa (koeficient C), gostote plina ali kapljevine (ρ) in relativne hitrosti telesa (v) skozi medij, v našem primeru zrak. (Gregorek, 1970)

Ker smo želeli izdelati merilno napravo, ki bo primerna za merjenje sile zračnega upora različnih raket in avtomobilov ter vzgona letalskih kril, smo se odločili za uporabo viličnega sistema za prenos sile na senzor t.j. merilno celico, ki je pritrjena zunaj merilne komore zračnega tunela.



Slika 1: Vilični mehanizem in sile (lasten vir).

(Science Learning Hub, b.d.)



Slika 2: Vilični mehanizem za prenos sile zračnega upora na senzor izven merilne celice (lasten vir).

Vilični sistem je bil med izvajanjem meritev postavljen navpično v ravnotežni legi. Konica viličnega sistema, ki je pritiskala na merilno celico, se med izvajanjem poskusa ni zaznavno premikala in se je ves čas dotikala merilne celice.



Slika 3: Lega konice viličnega sitema na senzorju (lasten vir).

Na vilični mehanizem vplivata dva navora. Navor sile zračnega upora $(\overline{M_{zu}})$, ki poskuša vilični mehanizem zavrteti v eno smer in navor sile senzorja, ki temu vrtenju nasprotuje. Sistem je bil v mirovanju, kar pomeni, da je bila vsota vseh navorov enaka nič.

$$\overrightarrow{M_{zu}} = \overrightarrow{M_s}$$

 $\overrightarrow{M_{zu}} = navor sile zračnega upora$ $\overrightarrow{M_s} = navor sile senzorja$

Navor v fiziki opredelimo kot produkt sile in ročice. Navor je prav tako kot sila - vektorska količina.

$$\vec{M} = \vec{F} \times \vec{r}$$

 $\vec{M} = navor$ $\vec{r} = dolžina ročice$ $\vec{F} = sila$

$$\overrightarrow{F_s} \times \overrightarrow{r_s} = \overrightarrow{F_{zu}} \times \overrightarrow{r_{zu}}$$

 $\overrightarrow{F_s} = sila senzorja$

 $\overrightarrow{F_{zu}} = sila zračnega upora$ $\overrightarrow{r_s} = ročica sile sinzorja$ $\overrightarrow{r_{zu}} = ročica sile zračnega upora$

Silo zračnega upora lahko torej izračunamo po naslednji enačbi:

$$\overline{F_{zu}} = \frac{\overline{F_s} \times \overline{r_s}}{\overline{r_{zu}}}$$

Oba senzorja uporabljena v raziskovalni nalogi izpišeta podatek v gramih (oba senzorja sta namenjena merjenju mase oz. tehtanju), zato je potreben izračun ekvivalentne sile. Delujeta na način tehnice zato je v naslednji enačbi uporabljen gravitacijski pospešek. Enačba za izračun sile se glasi:

$$F_s = m \cdot g$$

F_s = sila senzorja
m = podatek o sili izražen v enoti za merjenje mase
g = gravitacijski pospešek

2.2.2 Računanje sile zračnega upora

Poznamo linearni in kvadratni zakon za izračun sile zračnega upora.

Linearni zakon je sledeč:	Kvadratni zakon je naslednji:
$F_{zu} = \eta \cdot k \cdot d \cdot v$	$F_{zu} = C_{zu} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot S$
 η -koeficient viskoznosti k –koeficient, odvisen od oblike telesa d -prečna dimenzija telesa v -hitrost 	F_{zu} =sila zračnega upora C_{zu} =koeficient zračnega upora
	$\rho =$ gostota zraka
	v —nitrost S=površina

Reynoldsovo število nam pove, kateri zakon zračnega upora uporabimo v specifičnem primeru.

Reynoldsovo število za naš primer je sledeče:

$$Re = \frac{\rho \cdot d \cdot v}{\eta}$$

 $\rho = gostota sredstva$ d = prečna dimenzija telesa v = hitrost $\eta = koeficient viskoznosti$

Viskoznost zraka pri 20° je:

 $\eta = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

Velja:

Re < 2300 – velja linearni zakon

Re > 2300 - velja kvadratni zakon

temperatura(°C)	Gostota zraka (kg/m ³)	
35	1.1455	
30	1.1644	
25	1.1839	
20	1.2041	
15	1.2250	
10	1.2466	
5	1.2690	
0	1.2922	
-5	1.3163	
-10	1.3413	
-15	1.3673	
-20	1.3943	
-25	1.4224	

Slika 4: Tabela gostote zraka glede na temperaturo(lasten vir).

V zgornji tabeli je prikazana sprememba gostote zraka glede na temperaturo. (Engineering ToolBox, 2003)

V nadaljevanju naloge (glej točko 5.4) smo ugotovili naslednje podatke:

 $\rho(23^{\circ}C) = 1,192 \frac{kg}{m^3}$ d = 0,05m(d = 2 \cdot r = 2 \cdot 0,025m) v = 5,28 m/s

Sedaj lahko izračunamo naše Reynoldsovo število:

$$Re = \frac{\rho \cdot a \cdot v}{\eta}$$

$$Re = \frac{1,192 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,05m \cdot 5,28 m/s}{1,8 \cdot 10^{-5} \left[\frac{N \cdot s}{m^2}\right]}$$

Ker je 17483 večje od 2300, bomo uporabili kvadratni zakon za izračun zračnega upora:

$$F_{zu} = C_{zu} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot S$$

 $Re \doteq 17483$

Iz enačbe lahko ugotovimo, da na silo zračnega upora vplivajo koeficient zračnega upora, gostota zraka, hitrost in površina rakete.

Izrazimo lahko koeficient zračnega upora, ki bo ključen v nadaljevanju naloge:

$$C_{zu} = \frac{2 \cdot F_{zu}}{\rho \cdot v^2 \cdot S}$$

3. IZDELAVA ZRAČNEGA TUNELA

3.1 Vgradnja komponent

V celotni nalogi smo za 3D konstruiranje uporabili aplikacijo »Solidworks« in za 3D tiskanje tiskalnik modela »Flashforge Creator Pro«. Za material smo izbrali polilaktidno plastiko, ker je ta bila edina prikladna plastika, ki smo jo imeli na zalogi.

Ventilator, uporabljen v poskusu, je »K sileo 315 L VENTILATOR«. Ventilator v nekaterih pogledih odstopa od idealne izbire, vendar smo ga izbrali, ker ima zadostno moč in zaradi donacije ni predstavljal stroška. Vsako deseto sekundo delovanja se mu zmanjša moč, s katero sesa zrak. Zmanjševanje moči traja približno eno sekundo. Posledično smo pri meritvah upoštevali povprečno hitrost zraka. Opazimo tudi, da tresljaji, ki jih povzroča pri delovanju, vplivajo na rezultate meritev.

Najprej smo silo skušali izmeriti tako, da smo raketo položili na voziček, ki je silo preko vrvice prenašal na dinamometer. V drugem poskusu smo uporabili FRS senzor (WPSE477), vgrajen neposredno v merilno komoro. Ugotovili smo, da senzor ni dovolj občutljiv za neposredno meritev. Da bi povečali silo na senzor, smo vpeljali vilični mehanizem, ki je deloval kot multiplikator sile. Ker rezultati meritev niso bili konsistentni, smo se odločili, da uporabimo merilno celico, vgrajeno izven komore, v kombinaciji z viličnim mehanizmom.

Da bi uprizorili dim oz. paro, smo se odločili za uporabo elektronske cigarete in 3D natisnjenih cevk. Uporabili smo električno cigareto (»vape«) »Innokin Proton Scion 2 Kit 235 W 2 ml«, v katero smo natočili 70% rastlinski glicerin. Zanj smo se odločili, saj je nestrupena organska spojina, ki nima vonja in se uporablja tudi v gledališčih in filmski industriji. Da bi dim bil bolj opazen, smo vgradili led lučke.

Z namenom zagotavljanja laminarnega toka smo v zračni tunel vgradili slamice in tulce, ki so postavljene v smeri gibanja zraka. Slamice smo vgradili v prvi del tunela tja, kjer prihaja zrak v tunel, medtem ko smo v izhodnem delu pred ventilatorjem smo namestili papirne tulce. (Electronogy, 2019)

Z anemometrom »VOLTCRAFT AN-10« smo merili hitrost in temperaturo zraka. Podatek o hitrosti smo potrebovali, da smo dokazali enake pogoje pri merjenju. (Pernar, b.d.)

3.2 Izdelava ohišja

Na 4 mm debele vezane plošče smo narisali in nato izžagali sestavne dele ohišja tunela. Skonstruirali smo ga tako, da je sestavljen iz treh glavnih delov.

Prvi del tunela omogoča vstop zraka. Namen tega dela tunela je zagotavljanje laminarnega toka zraka, kar dosežemo z vgradnjo slamic.

V drugem delu tunela (t. i. merilni komori) je prostor za raketo. Prvotno je bil sestavljen iz treh vezanih plošč (spodaj, zgoraj in zadaj), na frontalnem delu je odprtino pokrivalo pleksi steklo, da bi raketo lahko vidno spremljali. Zračni tok smo ponazorili s pomočjo dima in led lučk, ki so v tem predelu tunela.

Lučke smo sprva namestili na letvice v merilni komori. Pozneje smo hoteli zmanjšati prostornino z namenom povečanja hitrost zraka, zato smo lučke raje premestili v električni kanal. Volumen in s tem prečni presek tunela smo zmanjšali z vgradnjo tri centimetrov debelega stiropora. Z vgradnjo penjenega PVC-ja smo poskrbeli za gladko in črno površino, ki nam je v kombinaciji s paro in led lučkami omogočala boljšo ponazoritev zračnega toka.



Slika 5 : Merilna komora z uporabo šeleshamer papirja in stiropora (lasten vir).

Na zgornji plošči je devet lukenj. Šest lukenj je namenjenih viličnemu sistemu (glej točko 3.2). Luknja pri koncu merilne komore je namenjena anemometru. Zraven nje je tudi luknja za kabel led lučk. Na začetku osrednjega dela tunela je luknja za cevko, po kateri se pretaka dim.

V zadnjem delu tunela ventilator sesa zrak, ki potuje skozi tulce, ki zagotavljajo laminaren zračni tok. Dele tunela smo sestavili z vijaki in krilatimi maticami, saj nismo želeli, da nam zrak uhaja.



Slika 6: Zadnji del tunela (lasten vir).

Notranjost tunela smo popolnoma pobarvali v črno, da bi dim prišel do izraza. Zunanjost je črno-modra. Želeli smo imeti kontrast barv za lažjo ponazoritev dima v notranjosti. (Babič in Božič,2003) (Electronogy, 2019) (Erwin in Garber, b.d.) (Kagan, 2021) (LabRat Scientific, 2019) (LabRat Scientific, 2019) (thelearningpartnership.com., b.d.) (University of Michigan Engineering, 2014) (YouTube, 2015)

4. IZDELAVA RAKETE

Prvo raketo smo se odločili 3D natisniti, saj je računalnik bolj natančen od človeških rok. Raketa je sestavljena iz 3D natisnjene konice in nosilca motorjev s štirimi krilci ter PVC trupa. Odločili smo se za izdelavo večje rakete zaradi večje površine in posledično večjega zračnega upora.



Slika 7: Risba 3D modela spodnjega dela rakete in špica (lasten vir).

Po neuspelem poskusu smo se odločili za uporabo lažje rakete. Uporabili smo že izdelano raketo »nacionalko«, ki smo jo skonstruirali prejšnje leto za tekmovanje. Ta raketa je za 20 cm nižja in 560g lažja od prvotne rakete. Z uporabo takšne rakete smo uspeli izvesti osnovni poskus.

5. IZVEDBE MERITEV IN REZULTATI

5.1 Poskus 1

Pri prvotnem poskusu smo uporabljali voziček. Tega smo zgradili iz »Fischertechnik« kompleta. Nanj smo najprej pritrdili veliko raketo, ki smo jo 3D natisnili, nato še manjšo in lažjo raketo.



Slika 8: Lažja raketa na vozičku (lasten vir).



Slika 9: Dinamometer ob poskusu z lažjo raketo (lasten vir).

5.1.1 Rezultati 1. poskusa

Zaradi velike mase rakete in posledično velikega trenja pri premikanju vozička, smo se odločili poskus izvesti z manjšo in lažjo raketo. Pri obeh poskusih, torej pri poskusu s težjo in pri poskusu z lažjo raketo, je bilo trenje tako veliko, da je bil zračni upor rakete v primerjavi s trenjem skoraj zanemarljiv. Zato se je dinamometer z merilnim območjem 10N in natančnostjo 0,5N komaj kaj premaknil. Ugotovili smo, da to ni primeren način merjenja sile zračnega upora. Zato smo se odločili raketi obesiti v naslednjem poskusu.

5.2 Poskus 2

V drugem poskusu smo voziček nadomestili z vrvicama, ki sta bili dolgi 30 cm. Najprej smo jih zavezali okoli večje rakete in ju napeljali skozi zgornji luknji ter ju zavezali. Ko smo priklopili ventilator, premik ni bil opazen. Predvidevali smo, da je problem v masi in velikosti rakete, zato smo ponovno uporabili manjšo in lažjo raketo. Opazili smo, da je ventilator raketo povlekel za približno 8 stopinj. Raketa je med poskusom opletala, zato smo se odločili, da bomo naredili vilični mehanizem.



Slika 10: Velika raketa na vrvicah (lasten vir).



Slika 11: Mala raketa na vrvicahma (lasten vir).

5.2.1 Rezultati 2. poskusa

Ko smo priklopili ventilator, premik velike rakete ni bil opazen. Predvidevali smo, da je problem v masi rakete, zato smo ponovno uporabili lažjo raketo. Opazili smo, da je ventilator raketo povlekel za približno 8 stopinj, s pomočjo kotnih stopinj smo želeli izračunati silo. Toda je raketa med poskusom opletala, zato smo se odločili, da bomo naredili vilični mehanizem.

5.3 Poskus 3

V tretjem poskusu smo namesto vrvic izdelali in vgradili vilični mehanizem za prenos in multiplikacijo sil. Izbrali smo senzor »Whadda WPSE477 FSR«. Vilični mehanizem je imel več nalog. To so stabilizacija rakete, prenos in multiplikacija sile na senzor. Multiplikacijo sile smo dosegli z različno dolgimi ročicami viličnega mehanizma. Senzor smo pritrdili na klado, ki je bila pritrjena v vpenjalni mehanizem. Zaradi slabe občutljivosti senzorja, smo vilični sistem obtežili in nagnili za nekaj stopinj (glej sliko 13).



Slika 12: Sile, ki delujejo na vilični sistem v tretjem poskusu (lasten vir).



Slika 13: Prvi vilični mehanizem in prenos sile na senzor (lasten vir).

Položaj konice viličnega mehanizma se je zaradi vibracij ventilatorja ves čas spreminjal. Poskus zato ni bil natančen, saj je uporabljen senzor občutljiv na položaj konice.

Senzor je v povezavi z Arduinom in programom, ki smo ga napisali, silo izpisoval v gramih (senzor je namenjen tehtanju), kar smo nemudoma pretvorili v silo tako, da smo pridobljeno vrednost pomnožili z gravitacijskim pospeškom.

Minimalna vrednost, ki jo senzor »Whadda WPSE477 FSR« zazna, je 20 g. Vilični mehanizem smo premaknili za nekaj stopinj tako, da ni bil v ravnotežni legi (glej sliko 13). Raketo smo nato z dodajanjem uteži v trup obtežili tako, da je konica mehanizma pritiskala na senzor s silo, večjo od 0,2 N, v našem primeru 0,8 N tudi takrat, ko ventilator ni deloval. Meritve sil so relativne, kar pomeni, da moramo uporabiti razliko med začetno in izmerjeno vrednostjo. (Group Velleman, b.d.) (Whadda, 2022)

Podatke smo zajemali 50 sekund v časovnih intervalih desetinke sekunde. Zbranih je bilo približno 500 meritev. Za lažje prikazovanje podatkov smo poleg surovih podatkov uporabili tekoče povprečje, ki se izračuna iz 40 zaporednih meritev. Omenjeno metodo tekočega povprečja smo uporabili povsod, kjer na grafu opazimo tekoče povprečje. (Maroševič, Gojkošek, Tjaša, Grašič Slevec,2015)

5.3.1 Rezultati 3. poskusa

Na sliki 14 je prikazana sila v odvisnosti od časa pri enakomernem delovanju ventilatorja (hitrost zraka je bila stalna).



Slika 14: Sila v odvisnosti od časa pri enakomernem delovanju ventilatorja. Rezultati meritve tretjega poskusa, kjer je bila hitrost zraka konstanta.(lasten vir).

V zgornjem poskusu je bila hitrost zračnega toka konstantna t. j. 17,5 km/h. Temperatura zraka pri poskusu je bila 24,7 °C. Za nihanja v izmerjeni sili je bil kriv senzor, saj je zaradi vibracij neenakomerno izpisoval silo.

V naslednjem poskusu smo raketo z utežmi v trupu obtežili tako, da začetna sila na senzor ni bila enaka nič. Podatke smo zajemali 50 sekund, v časovnih intervalih desetinke sekunde. Tudi pri tem poskusu je bilo zbranih približno 500 meritev. Na sliki 15 je prikazana sila v odvisnosti od časa pri zaganjanju ventilatorja.



Slika 15: Sila v odvisnosti od časa pri zagonu ventilarja iz mirovanja (lasten vir).

V tem poskusu je hitrost zraka naraščala, saj smo opazovali povečevanje sile vse od mirovanja ventilatorja do njegove polne moči. Iz grafa je mogoče sklepati, da se sila povečuje s povečanjem hitrosti zraka. Tudi v tem poskusu sta bila hitrost zračnega toka v končni fazi 17,5 km/h in temperatura 24,7 °C. Za padce vrednosti je razlog enak kot v prejšnjem poskusu.

Zaradi nenatančnih meritev smo iz tega poskusa lahko ugotovili le, da je sila zračnega upora velikosti 0,05N

$$F = m \cdot g = (0,855kg - 0,850kg) \cdot 10\frac{m}{s^2} = 0,05N$$



Slika 16: Shema vezave žic med arduinom in senzorjem.

(Group Velleman, b.d.)

5.4 Poskus 4

V četrtem poskusu smo uporabili primernejši senzor »Joy-it SEN-HX711-01«. Za razliko od prejšnjega senzorja senzor »Joy-it SEN-HX711-01« s pomočjo napisanega programa najprej določi taro, kar pomeni, da so meritve absolutne. Ločljivost tega senzorja je 0,0001 gramov. S pomočjo Arduina in programa, ki smo ga napisali, smo rezultate dobili v gramih. Senzor smo pritrdili na klado, ki je držala vpenjalni mehanizem. Podatke smo zajemali 50 sekund, v časovnih intervalih desetinke sekunde. Zbranih je bilo tako kot v prejšnjem poskusu 500 meritev. Računalnik je zbrane podatke izpisoval v gramih, ki smo jih pretvorili v milinewtone. *(Load Cell??*, 2016) (Maroševič, Gojkošek, Tjaša, Grašič Slevec,2015)



5.4.1 Rezultati 4. poskusa

Slika 17: Sila v odvisnosti od časa. Rrezultati meritev četrtega poskusa, kjer je bila hitrost konstanta in temperatura 23,1 °C (lasten vir).

V zgornjem poskusu je bila povprečna hitrost zračnega toka 5,28 m/s, medtem ko je temperatura bila 23,1°C. Povprečna sila je bila 48,3 mN.

Ker poznamo mere viličnega sistema in silo senzorja, lahko izračunamo silo zračnega upora.

$$F_{zu} = \frac{F_s \cdot r_s}{r_{zu}}$$
$$F_{zu} = F_s \cdot \frac{92}{130}$$

$$F_{zu} = F_s \cdot 0,708$$

 $F_{zu} = 0,0483 N \cdot 0,708$
 $F_{zu} \doteq 0,0342 N$

Za izračun koeficienta zračnega upora je potrebna tudi ploščina rakete. Ker ima raketa na koncu trupa krilca, smo to prišteli k enačbi. V našem primeru imamo 3 krilca in izpostavljen del krilc je visok 4 cm ter širok 2 mm.

$$S = \pi \cdot r^{2} + (3 \cdot 0.04m \cdot 0.0002m)$$
$$S = \pi \cdot (0.025m)^{2} + (3 \cdot 0.04m \cdot 0.0002m)$$
$$S = 0.0022035m^{2}$$

Sedaj lahko izračunamo koeficient zračnega upora.

$$F_{zu} = 0,0342 N$$

$$\rho(23^{\circ}C) = 1,192 \frac{kg}{m^3}$$

$$v = 5,28 m/s$$

$$S = 0,0022035m^2$$

$$C_{zu} = \frac{2 \cdot F_{zu}}{\rho \cdot v^2 \cdot S}$$

$$C_{zu} = \frac{2 \cdot 0,0342 N}{1,192 \frac{kg}{m^3} \cdot (5,28\frac{m}{s})^2 \cdot 0,0022035m^2}$$

$$C_{zu} = 0,934 \text{(Babič in Božič,2003)}$$

Izračunan koeficient je nepričakovano visok. Eden izmed razlogov za nepričakovano visok koeficient zračnega upora je lahko postavitev rakete. Če raketa ni bila postavljena popolnoma pravokotno na zračni tok, se je prečni presek rakete povečal. Pojavile so se dodatne turbulence in sile, ki so značilne za letalsko krilo. Sila vzgona, ki se pojavi pri prečni postavitvi rakete, sicer ne bi smela vplivati na rezultate merjenja, ker je pravokotna na mehanizem in posledično mehanizma ne premika. Dodatne turbulence pa seveda vplivajo na silo zračnega upora. V naslednjem poskusu je povprečna hitrost zračnega toka bila 5,26 m/s in temperaturo smo znižali na 16,1 °C. Rezultati so sledeči:



Slika 18: Rezultati meritve četrtega poskusa, kjer je bila hitrost zračnega toka konstantna in temperatura 16 °C (lasten vir).

Povprečna sila v zgornjem poskusu je bila 48,815 mN. Sedaj lahko izračunamo silo zračnega upora.

$$F_{zu} = \frac{F_s \cdot r_s}{r_{zu}}$$

$$F_{zu} = F_s \cdot \frac{92}{130}$$

$$F_{zu} = F_s \cdot 0,708$$

$$F_{zu} = 0,0488 \text{ N} \cdot F_{zu} \doteq 0,0345 \text{ N}$$

0,708

Če primerjamo silo zračnega upora iz prejšnje meritve, lahko kljub nekoliko manjši hitrosti zračnega toka uspemo dokazati, da je sila zračnega upora višja pri nižji temperaturi. Razlika med silama iz poskusa pri nižji temperaturi in poskusa pri višji temperaturi je 0.0003 N. Koeficient zračnega upora v poskusu s 16,1 °C je približno enak koeficientu zračnega upora v poskusu s 23,1 °C.

$$F_{zu} = 0,0345 \ N$$

$$\rho(16^{\circ}C) = 1,220 \ \frac{kg}{m^3}$$

$$v = 5,26 \ m/s$$

$$S = 0,0022035m^2$$

$$C_{zu} = \frac{2 \cdot F_{zu}}{\rho \cdot v^2 \cdot S}$$

(Wikimedia Foundation, 2017)

 $C_{zu} = \frac{2 \cdot 0.0345 N}{1.220 \frac{kg}{m^3} \cdot (5.26 \frac{m}{s})^2 \cdot 0.0022035 m^2}$ $C_{zu} = 0.943$

(Research Center Glenn, 2021)

Koeficient zračnega upora v poskusu s 16,1 °C se od koeficienta zračnega upora v poskusu s 23,1 °C razlikuje za 0.0099. Koeficienta sta si približno enaka, zato smo dokazali, da je pri nižji temperaturi sila zračnega upora višja.



Slika 19:Skica povezave žic med arduinom in senzorjem.

(Faranux, b.d.) (Mybotic in Instructables, 2017)

6. ZAKLJUČEK

Zaradi nespremenljivih vremenskih pogojev žal nismo izstreljevali raket. Odločili smo se za pristop z meritvami v zračnem tunelu. Spoznali smo kako zahtevno je skonstruirati zračni tunel in meriti zračni upor.

Ugotovili smo, da je ob previdnem spremljanju pogojev mogoče izmeriti spremembo velikosti sile zračnega upora zaradi spremembe temperature.

Z meritvami in izračunom smo potrdili hipotezo, da je zračni upor rakete večji pri nižji temperaturi zraka in obratno. Za meritve so izdelali lastne merilne pripomočke, ki smo jih uspešno uporabili.

Sprašujemo se, zakaj tolikšen količnik upora (C=0,934), ki ni značilen za obliko rakete. Vsekakor se zavedamo, da je nekje v procesu raziskovanja prišlo do napake. Za nastalo odstopanje je možnih več vzrokov. Žal kljub naporom vseh vzrokov za odstopanje nismo našli ali odpravili. Z izračunom količnika zračnega upora za oba temperaturna primera smo potrdili, da to ni vplivalo na izid naših meritev. V kolikor napake ne bomo našli drugje, bomo problem rešili s programsko opremo, kajti v prihodnje želimo raziskati kako na količnik zračnega upora vpliva sprememba oblike telesa.

V prihodnje bi si želeli naše hipoteze dokazati tudi na letališču z raketami, ki zares letijo in z natančnim GPS senzorjem. Sprašujemo se kako bi na naše terenske meritve vplival veter in ostali vremenski pogoji.

7. DRUŽBENA ODGOVORNOST

Člani ekipe, ki je pripravljala to raziskovalno nalogo upamo, da smo pokazali, da se znamo lotiti tudi raketne znanosti. Hkrati s skromnostjo spoznavamo, da je raketna znanost res »rocket science«. Menimo pa tudi, da je to prava pot do inženirja raketnih motorjev, oblikovalca avtomobilov ali morda tudi astronavta.

Naša in podobne raziskave, poleg vpliva na razvoj raketne znanosti, posegajo tudi na področje aerodinamike, ki nam v vsakdanjem življenju kroji porabo energije in s tem čistost zraka, ki ga dihamo.

8. PRILOGE

8.1 Slike



Slika 20: Začetni del tunela (lasten vir).



Slika 21: Celoten zračni tunel (lasten vir).

8.2 Koda za mikrokrmilnik na matični plošči (Arduino) s senzorjem Whadda WPSE477 FSR

```
Analog input, serial output
```

/*

Reads an analog input pin and prints the results to the Serial Monitor. created 29 Dec. 2008 modified 9 Apr 2012 by Tom Igoe modified 9 March 2021 by Midas Gossye (Whadda/Velleman)

This example code is in the public domain.

http://www.arduino.cc/en/Tutorial/AnalogInOutSerial
*/

// These constants won't change. They're used to give names to the pins used: const int analogInPin = A0; // Analog input pin that the FSR is attached to

int sensorValue = 0; // value read from the FSR

```
void setup() {
```

// initialize serial communications at 9600 bps: Serial.begin(9600);

```
}
```

void loop() {
 // read the analog in value:
 sensorValue = analogRead(analogInPin);

// print the results to the Serial Monitor: Serial.print(sensorValue);

// wait 10 milliseconds before the next loop for the analog-to-digital
// converter to settle after the last reading:

delay(100);

}

8.3 Koda za mikrokrmilnik na matični plošči (Arduino) s senzorjem »Joy-it SEN-HX711-01«

```
#include "HX711.h"
```

HX711 scale(4, 5);

float calibration_factor = 1720; // this calibration factor is adjusted according to my load cell

float units;

float ounces;

void setup() {

Serial.begin(9600);

scale.set_scale();

```
scale.tare(); //Reset the scale to 0
```

long zero_factor = scale.read_average(); //Get a baseline reading

```
Serial.print("Zero factor: "); //This can be used to remove the need to tare the scale. Useful in permanent scale projects.
```

Serial.println(zero_factor);

}

```
void loop() {
```

scale.set_scale(calibration_factor); //Adjust to this calibration factor

```
units = scale.get_units(), 10;
```

```
if (units < 0)
```

{

```
units = 0.00;
```

```
}
```

```
ounces = units * 0.035274;
```

Serial.print(units);

```
Serial.println();
```

delay(100);

}

8.4 Tehnične risbe in uporabljeni materiali

8.4.1 Mere in izbira materialov zračnega tunela

Vse vezane plošče, ki smo jih uporabili, so debele 4mm. Najprej smo izdelali merilno komoro, ki ima tri lesene stranice, eno pa iz pleksi stekla. Zgornja stranica je lesena in ima luknje, namenjene komponentam. Mere stranic:



Slika 22: Mere spodnje in stranske vezane plošče merilne komore in pleksi stekla (lasten vir).



Slika 23: Zgornja vezana plošča (lasten vir).



Slika 24: Povečava zgornje vezane plošče na območju montaže viličnega mehanizma (lasten vir).

Na obeh koncih merilne komore smo pritrdili po eno vezano ploščo. Take plošče so še štiri, pred in za delom, kjer so slamice in tulci. Na dveh mestih se plošči torej stikata, mi smo jih pritrdili z vijaki in krilatimi maticami, da bi tunel lahko razstavili. Mere plošč:



Slika 25: Vezana plošča s kvadratno luknjo, ki povezuje merilno komoro in začetni ter zadnji del tunela (lasten vir).

Okrog plasti zalepljenih slamic so štiri lesene vezane plošče, ki so med seboj pritrjene. Mere plošč:



Slika 26: Plošče okrog slamic (lasten vir).

Tako kot slamice tudi tulce obdajajo štiri vezane plošče. Mere plošč:



Slika 27: Plošče, ki obdajajo tulce (lasten vir).

Luknja v tej vezani plošči je namenjena ventilatorju. Na to ploščo smo zalepili podstavek iz stirodura. Mere plošče:



Slika 28: Vezana plošča s okroglo luknjo (lasten vir).

Štiri vezane plošče v obliki trapeza so med ploščo, ki ima kvadratno luknjo, in ploščo, ki ima okroglo luknjo. Druge štiri pa so na začetku tunela, pred slamicami, in so pritrjene na ploščo s kvadratno luknjo. Mere plošč:



Slika 29: Vezane plošče oblike trapeza (lasten vir).

Vezane plošče oblike trapeza smo s pomočjo trikotnih ploščic zalepili na plošči s kvadratnima luknjama. Trikotnike smo vedno zalepili ob straneh. Na začetku tunela, pred slamicami, smo zalepili po dva trikotnika, pri koncu tunela, po tulcih in pred ventilatorjem, smo zalepili po en trikotnik. Torej smo vse skupaj izdelali šest trikotnikov. Mere trikotnikov:



Slika 30: Trikotniki iz vezanih plošč (lasten vir).

Večina lesenih delov tunela je z vijaki pritrjena na letvice v notranjosti tunela, zato so letvice od zunaj neopazne. Letvice se razlikujejo le v dolžinah. Razporedili smo jih po številkah ena, dva in tri. Letvice so vedno po štiri in grejo v kote delov tunela.

Letvice številka ena - mere:



Slika 31: Naris letvice-1 (lasten vir).



Slika 32: Stranski ris letvice-1 (lasten vir).



Slika 33: Tloris letvice-1 (lasten vir).

Letvice številka dve - mere:



Slika 34: Naris letvice-2 (lasten vir).



Slika 35: Stranski ris letvice-2 (lasten vir).



Slika 36: Tloris letvice-2 (lasten vir).

Letvice številka tri - mere:



Slika 37: Naris letvice-3 (lasten vir).



Slika 38: Stranski ris letvice-3 (lasten vir).



Slika 39: Tloris letvice-3 (lasten vir).

Sami slamic nismo izdelali, ampak smo jih kupili. Če bi jih izdelali, ne bi bile tako natančne, poleg tega pa bi zapravili dosti časa.

Mere slamic:



Slika 40: Naris slamic (lasten vir).



Slika 41: Stranski ris slamic (lasten vir).

Iz stirodurja smo izrezali podstavek za ventilator. Mere podstavka:



Slika 42: Naris stirodura (lasten vir).



Slika 43: Stranski ris stirodura (lasten vir).

	500.00		
95.73	308.54	95.73	
			0
			100.

Slika 44: Tloris stirodura (lasten vir).

Da bi zmanjšali prostornino merilne komore in povečali hitrost zračnega toka, smo na zgornjo in spodnjo vezano ploščo zalepili stiropor in penjen PVC. Mere stiroporja:





Slika 46: Stranski ris stiropora (tudi penjen PVC) (lasten vir).



Slika 47: Stranski ris stiroporja na vrhu merilne komore (lasten vir).

Tulce, tako kot slamice, nismo izdelali. Uporabili smo tulce, ki smo jih našli v šoli. Mere tulcev:



Slika 48: Naris tulca (lasten vir).



Slika 49: Stranski ris tulca (lasten vir).

Vilični mehanizem, ki je pritrjen na zgornjo ploščo merilne komore, drži raketo in pritiska na senzor z enako silo, kot zrak vleče raketo. Izrezali smo ga iz 2mm debele pločevine. Mere viličnega sistema:



Slika 50: Naris viličnega sistema-risali na 2 mm debelo pločevino (lasten vir).



Slika 51: Naris ploščice med viličnim mehanizmom (lasten vir).



Slika 52: Stranski ris ploščice med viličnim mehanizmom (lasten vir).



Slika 53: Tloris ploščice med viličnim mehanizmom (lasten vir).



Slika 54: Naris spodnjega dela rakete (lasten vir).



Slika 55: Stranski ris spodnjega dela rakete (lasten vir).



Slika 56: Tloris spodnjega dela rakete (lasten vir).



Slika 57: Povečava stranskega risa krilc spodnjega dela rakete (lasten vir).



Slika 58: Naris špica rakete (lasten vir).



Slika 59: Stranski ris špica rakete (lasten vir).



Slika 60: Tloris špica rakete (lasten vir).

9. VIRI

Apogee Components. (2011). Peak of flight Newsletter. https://www.apogeerockets.com/.Dostopano8.3.2022,https://www.apogeerockets.com/education/downloads/Newsletter294.pdf

Babič, N., in Božič, N. (2003). *Aerodinamika - sckr.si*. <u>http://raziskov.tsckr.si/</u>. Dostopano 8.3.2022, pridobljeno s <u>http://raziskov.tsckr.si/sess/02_03/naloge/Aerodinamika.pdf</u>

Electronogy. (2019). *Wind tunnel - Part 1 - Aerodynamics*. Dostopano 8.3.2022, pridobljeno s <u>https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=GrsXV_zD_Do&feature=youtu.be</u>.

Engineering ToolBox. (2003). *Air - density, specific weight and thermal expansion coefficient vs. temperature and pressure.* Engineering ToolBox. Dostopano 8.3.2022, pridobljeno s <u>https://www.engineeringtoolbox.com/air-density-specific-weight-d_600.html</u>

Erwin, J., in Garber, D. (b.d.). *ABC-UTC Guide for - abc-utc.fiu.edu*.Dostopano 8.3.2022, pridobljeno s <u>https://abc-utc.fiu.edu/wp-content/uploads/sites/52/2021/05/ABC-UTC-GUIDE_Lu-Zhang_ABC-UTC-2016-C2-FIU07_Final-2.pdf</u>

Faranux. (b.d.). *Load Cell Circuit*. faranux.com. Dostopano 8.3.2022, pridobljeno s <u>https://www.faranux.com/wp-content/uploads/2018/03/a1ca2dcd-figure-5-circuit1-</u>2_1_r1xgwnvii6.jpg

Gregorek, G. M. (1970). *Aerodynamic Drag of Model Rockets*. ftp.demec.ufpr.br. Dostopano 8.3.2022, pridobljeno s <u>http://ftp.demec.ufpr.br/foguete/bibliografia/TR-11%20AERODYNAMIC%20DRAG%20OF%20MODEL%20ROCKET.pdf</u>

Group Velleman. (b.d.). *Manual FSR SENSOR MODULE- Velleman.eu*. whadda.com. Dostopano 8.3.2022, pridobljeno s <u>https://www.velleman.eu/downloads/25/prototyping/manual_wpse477.pdf</u>

Kagan W. (2021). DIY Active Aerodynamics | Pt. 1 of 2 - The Wind Tunnel. Dostopano8.3.2022,pridobljenos

https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=NVUwNEZURpk&feature=youtu.be.

LabRat Scientific. (2019). *Low Speed Wind Tunnel*. Dostopano 8.3.2022, pridobljeno s <u>https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=-bICbiXfQo4&feature=youtu.be</u>.

LabRat Scientific. (2019). *Model Rocket Stability Test in a Wind Tunnel*. Dostopano 8.3.2022, pridobljeno s

https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=twygmUOuZAc&feature=youtu.be.

Load Cell?? (2016). Load cell?? Dostopano 8.3.2022, pridobljeno s <u>https://www.youtube.com/watch?v=nGUpzwEa4vg</u>.

Making a wind tunnel - thelearningpartnership.com. thelearningpartnership.com. (b.d.). Dostopano 8.3.2022, pridobljeno s <u>https://www.thelearningpartnership.com/wp-content/uploads/2021/06/RTTL2-Make-a-Wind-Tunnel.pdf</u>

(Maroševič, Mati Djuraki, Jerman, Gojkošek, 2014) Maroševič, T., Mati Djuraki, D., Jerman, R., Gojkošek, M. (2014). Fizika+8 : učbenik za fiziko v 8. razredu osnovne šole. Ljubljana: Založba Rokus Klett.

Maroševič, T., Gojkošek, M., Tjaša, Č., Grašič Slevec, M. (2015). Fizika+9 : učbenik za fiziko v 9. razredu osnovne šole. Ljubljana: Založba Rokus Klett.

Mybotic in Instructables. (2017, September 24). *Tutorial to interface HX711 balance module with load cell*. Instructables. Dostopano 8.3.2022, pridobljeno s https://www.instructables.com/How-to-Interface-HX711-Balance-Module-With-Load-Ce/

Pernar, J. (b.d.). *Fizika na gimnaziji- Hitrost zraka*. Fizika na gimnaziji. Dostopano 8.3.2022, pridobljeno s <u>http://www2.arnes.si/~sssknm4/vetrovnik/hitrost_zraka_okno.html</u>

Research Center Glenn. (2021). *The drag equation*. NASA. Dostopano 8.3.2022, pridobljeno s <u>https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/drageq.html</u>

Rocket aerodynamics. Science Learning Hub. (b.d.). Dostopano 8.3.2022, pridobljeno s <u>https://www.sciencelearn.org.nz/resources/392-rocket-aerodynamics</u>

University of Michigan Engineering. (2014). *Doug McLean* | *Common Misconceptions in Aerodynamics*. Dostopano 8.3.2022, pridobljeno s <u>https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=QKCK41JLQHU&feature=youtu.be</u>.

U.S. Environmental Protection Agency, (2011). *Building science introduction - air flow*. Building Science Introduction - Air Flow | Building America Solution Center. Dostopano 8.3.2022, pridobljeno s <u>https://basc.pnnl.gov/information/building-science-introduction-air-flow</u>

Virtualna aerodinamična CEV Tlaka. kako deluje: Modeli za merjenje aerodinamične cevi odpornosti V aerodinamični CEVI. oborudow.ru. (b.d.). Dostopano 8.3.2022, pridobljeno s https://oborudow.ru/sl/body/virtualnaya-aerodinamicheskaya-truba-flowvision-kak-eto-rabotaet-modeli/

VapourTec. (2021, March 12). *Laminar and Turbulent Flow*. Vapourtec. Dostopano 8.3.2022, pridobljeno s <u>https://www.vapourtec.com/flow-chemistry/laminar-turbulent/</u>

Whadda. (2022, April 19). FSR (force sensing resistor) sensor. Whadda. Dostopano 8.3.2022, pridobljeno s https://whadda.com/product/fsr-force-sensing-resistor-sensor-wpse477/

Wikimedia Foundation. (2017, October 27). *Koeficient Upora*. Wikipedia. Dostopano 8.3.2022, pridobljeno s <u>https://sl.wikipedia.org/wiki/Koeficient upora</u>

YouTube. (2015). *How WIND TUNNELS Work - F1 explained - Sauber F1 Team*. Dostopano 8.3.2022, pridobljeno s

https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=KC0E0wU6inU&feature=youtu.be.