

LETI, LETI ... LETI?

Področje: FIZIKA IN ASTRONOMIJA

RAZISKOVALNA NALOGA

Učenec: Luka Tomažin

9. razred

Mentor: Samo Škrabanja

Leto izdelave: 2024

Osnovna šola Šmartno



Kazalo

1 UVOD.....	8
2 HIPOTEZE.....	9
3 TEORETIČNI DEL	10
3.1 ZAKAJ LETALO VZLETI?.....	10
3.2 OSNOVNI ZAKONI LETENJA	10
3.3 HITROST, POTREBNA ZA VZLET.....	10
3.4 VPLIV KRILA NA LET	11
3.5 Koeficient upora	11
4 EKSPERIMENTALNI DEL	15
4.1 IZDELAVA VETRNEGA KANALA	15
4.2 Vezava merilnika sile na mikrokrilmilnik micro:bit.....	18
4.2.3 Merjenje dinamičnega vzgona na majhno krilo pri različnih naklonih krila.....	21
4.3 Program za beleženje podatkov	18
5 RAZLAGA MERITEV.....	23
5 REZULTATI MERITEV	19
5.1 Način merjenja in računanja podatkov	19
5.2 Predstavitev podatkov.....	19
5.2.1 Merjenje dinamičnega vzgona na majhno krilo pri različnih hitrostih vетra.....	19
5.2.2 Merjenje dinamičnega vzgona na veliko krilo pri različnih hitrostih vетra.....	20
6 ZAKLJUČEK.....	25
7 VIRI IN LITERATURA	26
8 VIRI SLIK.....	26

Seznam oznak

Hitrost	v_{ms}	[m/s]
Hitrost vetra	v_v	[m/s]
Hitrost v vozilih	v_{kt}	[kt]
Majhna hitrost	v_M	[m/s]
Hitrost zvoka	v_{zv}	[m/s]
Začetna hitrost	$v_{zač}$	[m/s]
Končna hitrost	v_k	[m/s]
Masa	m	[kg]
Dinamični vzgon	F_{DV}	[N]
Sila upora	F_U	[N]
Sila teže	F_G	[N]
Sila potiska	F_{POT}	[N]
Tlak	p	[Pa]
Gostota	ρ	[kg/m^3]
Koeficient upora	c_u	[/]



Koeficient din. vzgona	c_{DV}	[/]
Kinetična energija	W_k	[J]
Potencialna energija	W_p	[J]
Konstanta	K	[/]



Seznam slik

Slika 1: Prelet letala C-17 nad Šmartnim. Povezava do posnetka. Avtor: B. Pogač.	8
Slika 2: Sestavljanje sil v aerodinamično silo (prirejeno po Vir).	10
Slika 3: Profil krila in razdelitev 2 delcev (Čulin, 2004).	10
Slika 4: Različne oblike kril (Černe idr., 1997, str. 169).	11
Slika 5: Letalo X-29 (Prisco J., 2019).	11
Slika 6: Sile, ki delujejo na letalo (Vir).	12
Slika 7: Eifflov tip vetrnega kanala (Vir).	13
Slika 8: Prandtlov tip vetrovnika (Vir).	14
Slika 9: Prva skica projekta (lasten arhiv).	15
Slika 10: Vstopna šoba (lasten arhiv).	15
Slika 11: Difuzor (lasten arhiv).	15
Slika 12: Delovni prostor (lasten arhiv).	16
Slika 13: Končan vetrovnik (lasten arhiv).	16
Slika 14: Spreminjanje kota krila (lasten arhiv).	16
Slika 15: Uporaba puhalnika za ustvarjanje zračnega toka (lasten arhiv).	17
Slika 16: Merilni sistem med delovanjem (lasten arhiv).	17
Slika 17: Vezava micro:bit-a, upornika, senzorja sile in žic na vezavni plošči (lasten arhiv).	18
Slika 18: Vezava sistema za merjenje sile v programu TinkerCAD (zajem zaslona).	18
Slika 19: Program za merjenje sile (zajem zaslona).	18



Seznam tabel in grafov

Tabela 1: Prikaz vrednosti, ki jih je zabeležil micro:bit in izračun odstotka sile teže.....	19
Tabela 2: Meritve hitrosti vetra in povprečne vrednosti odstotka sile teže za malo krilo.....	20
Tabela 3: Meritve hitrosti vetra in povprečne vrednosti odstotka sile teže za veliko krilo.....	20
Tabela 4: Meritve hitrosti vetra in povprečne vrednosti odstotka sile teže za malo krilo pri različnih vpadnih ali naklonskih kotih krila.....	21
Graf 1: Graf odvisnosti odstotka dinamičnega vzgona od hitrosti vetra za malo krilo.....	20
Graf 2: Graf odvisnosti odstotka dinamičnega vzgona od hitrosti vetra za veliko krilo.	21
Graf 3: Graf odvisnosti odstotka dinamičnega vzgona vpadnega ali naklonskega kota za malo krilo pri enaki hitrosti.	22
Graf 4: Odvisnost dinamičnega vzgona v njutnih od hitrosti zraka v km/h (Vlr).....	23
Graf 5: Odvisnost koeficiente vzgona od naletnega kota in prikaz zloma krivulje pri kritični vrednosti naletnega kota (Knez S., Podgornik R, 2007).....	24



Zahvala

Rad bi se zahvalil mentorju Samu Škrabani za pomoč, svetovanje in podporo pri izdelavi raziskovalne naloge.



Povzetek

Leti, leti ... Leti?

Namen naloge je bil ugotoviti, katere sile delujejo na letalo, kaj vse poleg sil še vpliva na let, kakšne so povezave z zračnim tlakom. Izkazalo se je, da ima letenje kar nekaj povezave s tlakom, saj sta na obeh straneh krila različna tlaka, kar pa dosežemo z ukrivljenostjo. Zanimalo me je tudi, če večja ploskev pomeni večji vzgon, kar se je izkazalo za eno od pomembnih lastnosti krila, ugotovil pa sem tudi, da potovanje pri večji hitrosti tudi ustvari večji dinamični vzgon. To sem ugotovil z vetrovnikom, primerjal pa sem dve krili različnih velikosti. Ugotovil sem tudi, da vpadni kot tudi vpliva na sili dinamičnega upora in dinamičnega vzgona, v nekaterih primerih negativno, v nekaterih pozitivno. Za merjenje sem uporabil na mikrokrmilnik micro:bit povezan merilec sile, podatke pa sem iz micro:bit-ovega 10 bitnega načina shranjevanja podatkov pretvoril v newtone, ki pa niso bili najbolj točna izbira zaradi neenakomerno razporejene sile na merilnik. Na koncu sem meritve izrazil v procentih prvotne sile teže krila s podporo.

Ključne besede: letenje, dinamični vzgon, vetrovnik, micro:bit

Abstract

It flies, it flies ... Does it fly?

Purpose of research was to find out which forces have influence on airplane and what else beside forces influences on flight and connection with air pressure. Research demonstrated that has flight connection with air pressure because it is different on each side of wing and this is achieved with curvature of wing. I was also interested wing's surface size creates bigger dynamic lift and this turned out to be one of biggest properties of wing. I found out that bigger speed creates bigger dynamic lift. Wind tunnel enabled measurement and comparison of two different sizes. I found out also that angle of flight also on size of forces dynamic drag and lift, in some cases positively and in other negatively. For measurement I used device micro:bit connected to force sensor. I collected logged data from micro:bit's 10 bit measurement of data. I converted data to forces but this turned out not so accurate option because of uneven influence of force on sensor. At the end I expressed measurements in percentage of initial gravitational force of wing and metal support.

Keywords: flying, dynamic lift, wind tunnel, micro:bit



1 UVOD

Temo o aerodinamiki in dinamičnemu vzgonu sem si izbral ker je bivši učenec naše šole le to preletel z letalom Boeing C-17 Globemaster (Slika 1). Po dogodku sem se vprašal, kakšni pogoji morajo biti izpolnjeni, da letalo vzleti in obstane v zraku in kaj vse vpliva na let. Zanimalo me je tudi, kakšen vpliv na let ima aerodinamika, kako vse skupaj vpliva na sile pri letenju in ali ima vse skupaj kakršnokoli povezavo z zračnim tlakom.

Najbolj pomembna vprašanja, ki sem si jih postavil so: zakaj letalo vzleti, kakšni so osnovni zakoni letenja in kolikšna hitrost je za vzlet letal različnih oblik.



Slika 1: Prelet letala C-17 nad Šmartnim. Povezava do posnetka. Avtor: B. Pogač.



2 HIPOTEZE

Hitrost vetra vpliva na silo dinamičnega vzgona na krilo. Zanima me, kakšna je odvisnost med hitrostjo vetra in silo dinamičnega vzgona, ki povzroči, da nastprotuje sili teže in dvigne letalo.

Hipoteza 1: Dinamični vzgon se enakomerno povečuje s hitrostjo vetra.

Obstaja na stotine različnih oblik kril, ki omogočajo dvig manjših in velikih letal. Pričakujem, da bo večja površina krila povzročila večji dinamični vzgon.

Hipoteza 2: Na dinamični vzgon vpliva velikost kril.

Letala vzletajo pri nižjih hitrostih, kot je njihova potovalna hitrost in pod večim kotom glede na tla. Sklepam, da to vpliva na dinamični vzgon in vzlet letala.

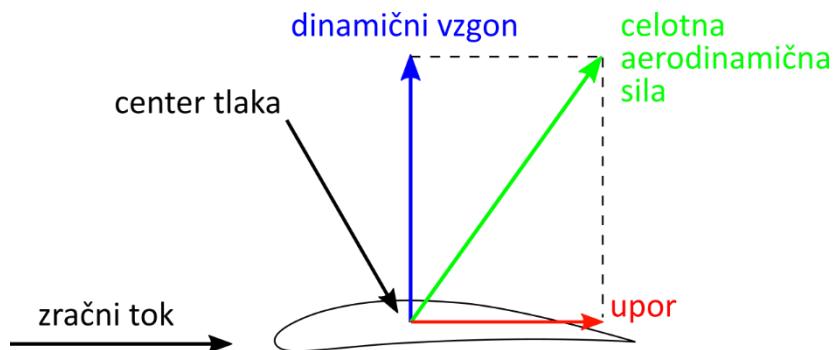
Hipoteza 3: vpadni kot zraka glede na krilo se razlikuje glede na hitrost.



3 TEORETIČNI DEL

3.1 ZAKAJ LETALO VZLETI?

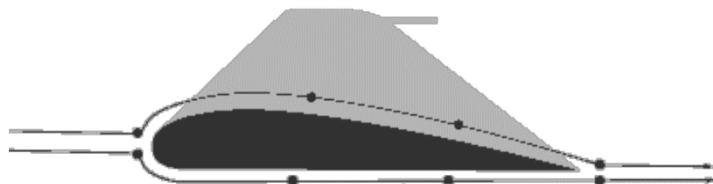
Letalo vzleti, ko je vzgon večji od zračnega upora. Sila vzgona je pravokotna na smer gibanja, sila upora, ki je med letom bistveno manjša od vzgona, pa nastane v smeri gibanja. Sili sta odvisni od kvadrata hitrosti letenja in geometrije krila. Da dobimo silo aerodinamike, moramo sešteeti silo vzgona in silo upora (Slika 2).



Slika 2: Sestavljanje sil v aerodinamično silo (prirejeno po [Vir](#)).

3.2 OSNOVNI ZAKONI LETENJA

Do letenja pride zarati točnega razmerja med vzgonom, maso, potiskom in uporom. Pomembna sta tudi geometrija in profil krila. Krilo zrak razdeli tako, da na zgornji strani potuje z večjo hitrostjo, na spodnji strani pa z manjšo. Spodaj se ustvari večji zračni tlak kot zgoraj, zrak od spodaj deluje na krilo z večjo silo, ki jo imenujemo dinamični vzgon. Ko je sila dinamičnega vzgona večja od sile teže, se letalo začne dvigati (Slika 3).



Slika 3: Profil krila in razdelitev 2 delcev (Čulin, 2004).

3.3 HITROST, POTREBNA ZA VZLET

Hitrost, potrebna za vzlet, se razlikuje od letala do letala. Lažja letala lahko vzletijo že pri 100 km/h (54 kt). Težja letala, torej različna potniška in tovorna letala, vzletajo s hitrostjo 240 – 285 km/h (130 – 154 kt). Pomembno vlogo igra tudi čelni veter, ki kot samo ime pove piha iz nasprotne smeri gibanja letala, saj povzroči večjo hitrost zraka okoli kril, to pa je pomembno za večji vzgon ([Vir](#)).



3.4 VPLIV KRILA NA LET

Oblika krila je za let zelo pomembna. Obstajajo različni tipi kril za različna letala. Poznamo ravna, nazaj zamaknjena, koničasta krila, delta krila, krila s spremenljivo obliko in različico nazaj zamaknjenega krila, naprej zamkneno krilo (Sliki 4 in 5).



Slika 4: Različne oblike kril (Černe idr., 1997, str. 169).



Slika 5: Letalo X-29 (Prisco J., 2019).

3.5 Koeficient upora

Koeficient upora predstavlja merilo za telesa aerodinamičnih oblik in vključuje dejavnike, ki vplivajo na upor. Silo upora F_u izračunamo tako, da pomnožimo polkratnik gostote zraka $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ s kvadratom hitrosti modela v^2 (v m/s), s površino čelne ploskve S (v m^2), to pa zmnožimo še s koeficientom upora c_u , ki je za vsako letalo posebej izračunan. Rezultat dobimo v njutnih [N] ([Vir](#)).

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

3.6 Koeficient dinamičnega vzgona

Koeficient vzgona je razmerje med gostoto, hitrostjo, površino krila in silo dinamičnega vzgona. Uporabljen je s strani aerodinamikov, ti pa z njim oblikujejo potrebne oblike, naklon in nekatere pogoje zračnega toka pri vzgonu. Silo dinamičnega vzgona F_v izračunamo tako, da pomnožimo polkratnik gostote zraka $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ s kvadratom hitrosti modela v^2 (v m/s), s površino kril S (v m^2), to pa zmnožimo še s koeficientom vzgona c_v . Enačba za koeficient vzgona je podobna enačbi za koeficient upora, le da sta koeficienta različna ([Vir](#)).

$$F_{DV} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot c_{DV}$$



3.7 Bernoullijeva enačba

Konstanta pri Bernoullijevi enačbi je odvisna od hitrosti zraka, tlaka in gostote zraka. Tlak nastane zaradi zraka, ki potuje okoli krila, razlikuje se, če je hitrost spremenjena. Ko se pojavi višja hitrost zraka, na krilo deluje na krilo od zgoraj manjši tlak in ravno obratno. Pri simetričnem krilu sta hitrosti zaradi enakih poti (ob naklonskem kotu $\alpha = 0^\circ$) enaki, ob spremembji naklonskega kota α pa poti nista več enaki, zato se pojavi dinamični vzgon. Asimetrično krilo je takšne oblike, da je pot delcev na zgornji strani daljša, to povzroči višje hitrosti in manjši tlak, spodaj ravno obratno. Vsota tlakov na zgodnji in spodnji strani krila se ohranja oziroma je konstantna, kar prikazuje spodnja enačba, v kateri p predstavlja zračni tlak, ρ gostoto zraka, v hitrost zraka, g gravitacijski pospešek in h globino. Zadnji člen enačbe pri zraku zanemarimo, ker tlak zaradi teže zraka zelo malo razlikuje. Spodnji (večji) tlak zato »pritska na krilo« pojavi pa se dinamični vzgon ([Vir](#)).

$$K = p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h$$

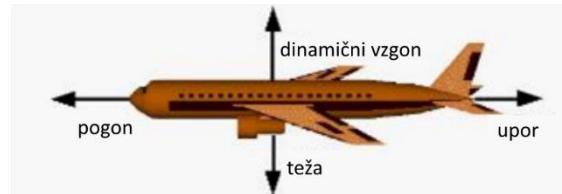
3.8 Kontinuitetna enačba

Ta enačba nam razlaga, da »kar gre noter, mora iti tudi ven« kar pomeni, da se pretok tekočine ob spremembji premera cevi spremeni. Konstanta je odvisna od tlaka, gostote zraka, hitrosti zraka, gravitacijskega pospeška in globine tekočine. P v enačbi predstavlja tlak zaradi stisnjenoosti tekočine, ki je pri tleh $1,013 \cdot 10^5$. Člen $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$ v enačbi predstavlja tlak zaradi hitrosti tekočine. V enačbi je pri kapljevinah potrebno upoštevati tudi člen $\rho \cdot g \cdot h$, kar predstavlja hidrostratični tlak ([Vir](#)).

$$K = p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$$

3.8 Vetrovniki

Za pravilno gibanje letala skozi zrak morajo biti jasni nekateri podatki, saj med letom nanj delujejo različne sile (Slika 6) in navori, ki jih je zelo težko, oz. skoraj nemogoče točno izračunati. Te podatke potrebujemo zato, da vemo, ali bo letalo sploh vzletelo, kakšne izboljšave so potrebne za vzlet v primeru, da tega prototip letala ni zmožen in kakšne bodo sposobnosti letala, torej hitrost, največja nosilnost, domet ... Zato se uporabljajo vetrovniki. Z vetrnimi kanali lahko izmerimo velikosti sil in navorov, s pomočjo geometrijsko podobnem in pomanjšanem letalu. Za dosego čim bolj točnih podatkov o zmogljivosti letal je potrebno zagotoviti ustrezne pogoje. Med kriteriji za ocenitev aerodinamične podobnosti se uporabljata dve števili: Reynoldsovo število, ki določa podobnost notranjega trenja zraka in Machovo število, ki določa podobnost stisljivosti zraka. Pri manjših hitrostih, torej do okoli polovice zvočne hitrosti ($v_M = \frac{1}{2} v_{zvoka} = 170 \text{ m/s}$), je potrebna enakost le pri Reynoldsevemu številu (Adlešič idr., 1978, str. 438).



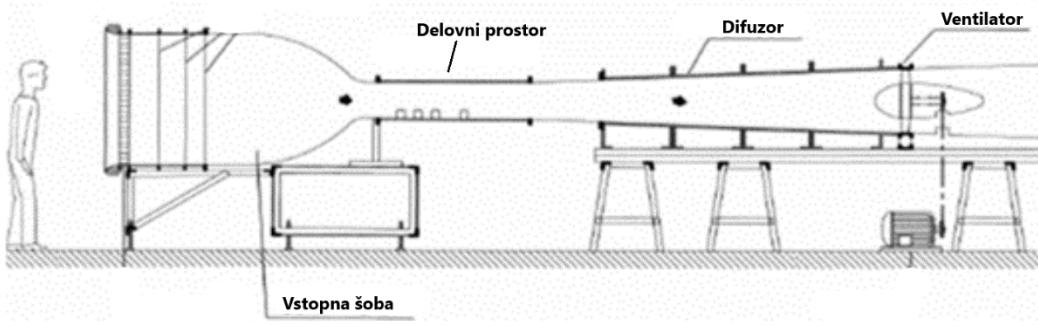
stanje leta	učinek
din. vzgon > teže	letalo se dviga
teže > din. vzgona	letalo se spušča
upor > pogon	letalo upočasni
pogon > upor	letalo pospeši

Slika 6: Sile, ki delujejo na letalo ([Vir](#)).

Poznamo več tipov vetrnih kanalov, vsi imajo približno podobne komponente. Na začetku je gosta mreža, katere naloga je, da usmeri zrak. Nadaljuje se z vstopno šobo, ki ji nekateri rečajo tudi kolektor. Naloga le

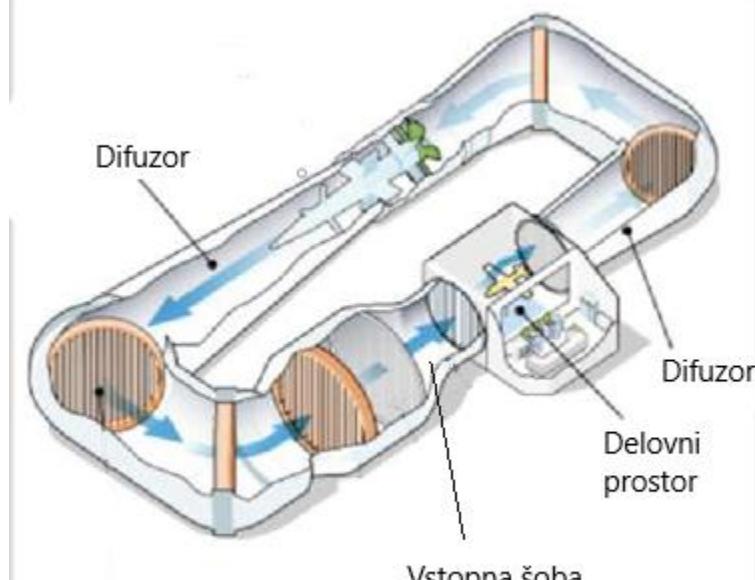


te so, da pospeši zrak iz začetne hitrosti $v_{zač} = 0 \text{ m/s}$ do želene končne. Po vstopni šobi sledi delovni prostor, v katerem stoji model, na katerem izvajamo meritve. Poznamo zaprte in odprte delovne prostore, pri zaprtem je model, na katerem izvajamo meritve, v prostoru, v njem so največkrat nameščena stekla, pri novejših pa različne kamere, ki meritve ves čas snemajo. Pri odprtih delovnih prostorih je zrak, ki pride iz vstopne šobe tako hiter, da ustvari curek. Ta zrak iz katerega koli tipa delovnega prostora nadaljuje svojo pot naprej v difuzor. Difuzor je obrnjena šoba, njegova naloga je, da upočasni zrak. Zaradi zmanjševanja hitrosti zraka se večji del kinetične energije W_k spremeni v potencialno energijo W_p in opravi negativno delo zaradi razlike tlakov. Pri vetrnih kanalih lahko spremenimo tudi hitrost zraka, kar je ključno za ugotavljanje in primerjanje sposobnosti letala. Poznamo dva glavna tipa vetrnih kanalov, ki sta Eifflov (Slika 7) in Prandtlov (Slika 8). Eifflov vetrovnik je kanal v eni liniji, njegove komponente so enake kot prej omenjene. Drugi tip vetrnega kanala je Prandtlov, ta pa ima podobno zgradbo kot Eifflov, le da je zadnji del difuzorja povezan z vstopno šobo. Nastane sklenjen vetrni kanal, ki ni odvisen od zunanjih dejavnikov.



Slika 7: Eifflov tip vetrnega kanala ([Vir](#)).

Obstajajo tudi vetrni kanali na prostem, pri katerem se doda še ena komponenta – filter, ki preprečuje vstop različnim sunkom in morebitnim turbulencam, insektom, in ostalim stvarem, ki ne sodijo v vetrovnik. Takšne vetrne kanale lahko postavimo tudi v večje dvorane, kar jim omogoča neodvisnost od vremena (Adlešič idr., 1978, str. 439).

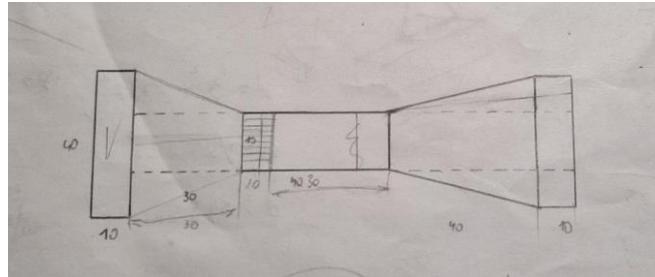


Slika 8: Prandtllov tip vetrovnika ([Vir](#)).



4 EKSPERIMENTALNI DEL

4.1 IZDELAVA VETRNEGA KANALA



Slika 9: Prva skica projekta (lasten arhiv).

Izdelal sem poenostavljeno verzijo Eifflovega vetrovnika. Začel sem z izrisom skice (Slika 9), kako naj bi vetrovnik izgledal. Nadaljeval sem z rezanjem vseh potrebnih kosov, ki so bili potrebni za izdelavo. Te sem potem ustrezeno obdelal, lesene sem najprej zlepil tako, da so nastali vstopna šoba (Slika 10), usmerjevalnik zraka iz cevi in difuzor (Slika 11). V usmerjevalnik zraka sem namestil tudi cevi, ki služijo preprečevanju turbulenc. Plošče, ki sem jih izrezal iz pleksi stekla, sem uporabil za delovni prostor (Slika 12). Prvo sem dvakrat ukrivil, tako da je nastal profil kvadratne črke u, v njo sem tudi zvrtil dve luknji, ki služita merilniku hitrosti – anemometru in stojalu za krilo. Druga plošča služi kot pokrov za delovni prostor. Vse komponente sem na koncu zlepil skupaj, tako da je nastal vetrovnik, ki sem si ga zamislil (Slika 13).



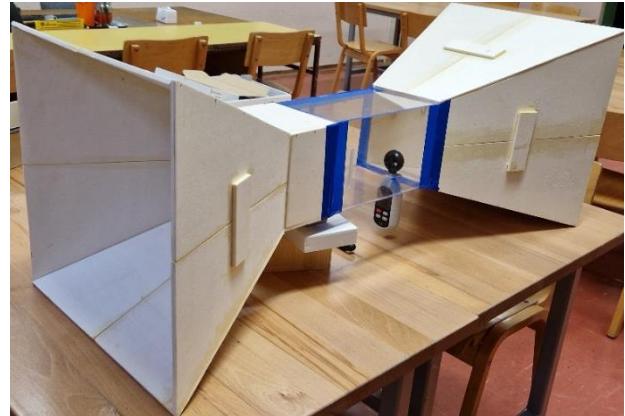
Slika 10: Vstopna šoba (lasten arhiv).



Slika 11: Difuzor (lasten arhiv).



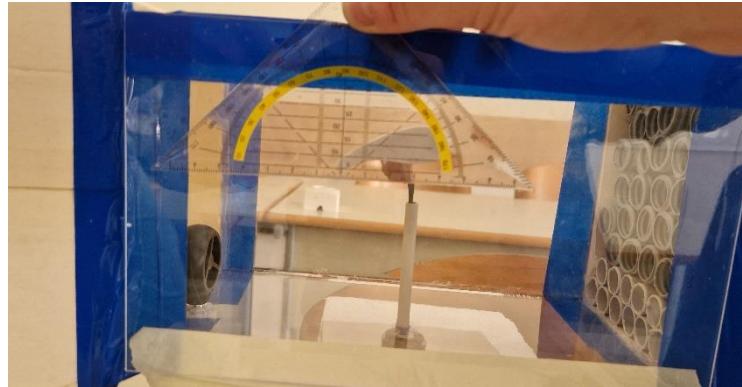
Slika 12: Delovni prostor (lasten arhiv).



Slika 13: Končan vetrovnik (lasten arhiv).

4.2 DELOVANJE VETROVNIKA

Vetrovnik sem izdelal zato, da sem lahko izmeril in testiral silo dinamičnega vzgona na krili različnih oblik pri različnih hitrostih vetra ter pri različnih naklonskih kotih. Deluje tako, da čez vstopno šobo vstopi zrak, kateremu se zaradi ožanja šobe hitrost poveča. S tem lahko dosežemo visoke hitrosti tudi z ventilatorji, ki dosegajo nizke hitrosti zraka, če je razmerje med velikostjo začetka vstopne šobe in konca vstopne šobe dovolj veliko. Zrak iz vstopne šobe nadaljuje v usmerjevalnik zraka, kjer se usmeri vzporedno s stranicami delovnega prostora, kjer se prepreči tudi kakršnokoli razvijanje turbulenc. Potovanje zraka se nadaljuje v delovni prostor, kjer okoli krila na zgornji strani potuje z višjo hitrostjo, na spodnji strani pa ravno obratno. S tem se doseže razlika v tlakih, ki je ključna za silo dinamičnega vzgona, ki se pojavi ob vetrju. V zadnjem delu vetrovnika lahko opazimo anemometer, ki meri hitrost vetra. Na koncu je difuzor, ki poskrbi za zvišanje tlaka in zmanjšanje hitrosti vetra.

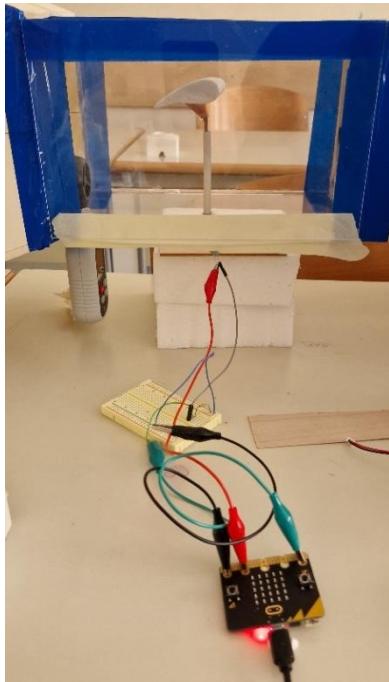


Slika 14: Spreminjanje kota krila (lasten arhiv).

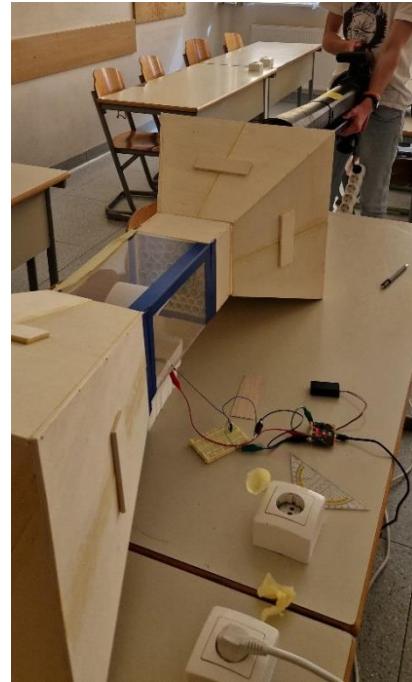
Za spremembo kota krila sem uporabil geotrikotnik, ki sem ga prislonil na delovni prostor, s tem določil in spremenil naklonski kot (Slika 14). Sistem za merjenje sile (Slika 15), ki sem ga sestavil, sestavlja anemometer in vezava mikrokrmilnika micro:bit. Za pritrditev merilnik sile pod stojalo za krilo sem uporabil stiropor in leseno ploščico, stojalo sem na merilnik sile pritrdil z lepilno maso Patafix. Zračni tok sem



ustvaril s puhalnikom zraka, zrak sem usmeril približno v sredino usmerjevalnika zraka, saj je tam krilo (slika 16).



Slika 16: Merilni sistem med delovanjem (lasten arhiv).

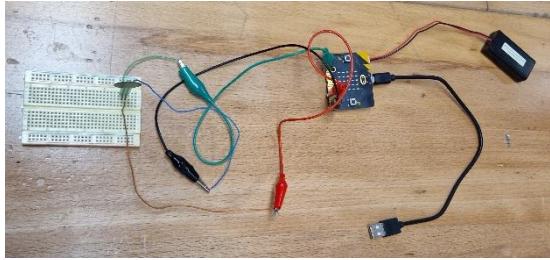


Slika 15: Uporaba puhalnika za ustvarjanje zračnega toka (lasten arhiv).

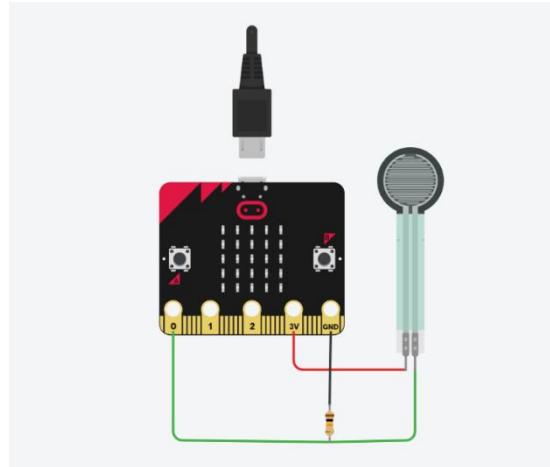


4.3 Vezava meritnika sile na mikrokrmilnik micro:bit

Mikrokrmilnik micro:bit omogoča različne meritve z vgrajenimi in zunanjimi senzorji. Vezava (Slike 14 in 15). senzorja je na voljo v navodilih, potrebujemo še dodaten upornik z uporom $R = 10 \text{ k}\Omega$. Vhod ali Pin sprejema signale in jih pretvori med vrednostjo 0 in 1023. Začetna sila je bila v vrednosti 688, kar je predstavljalo 13,45 N. Dejanska sila ni bila tolikšna, ker ni bila porazdeljena po celotnem meritniku sile, zato sem meritve dinamičnega vzgona zapisal v odstotkih celotne sile.



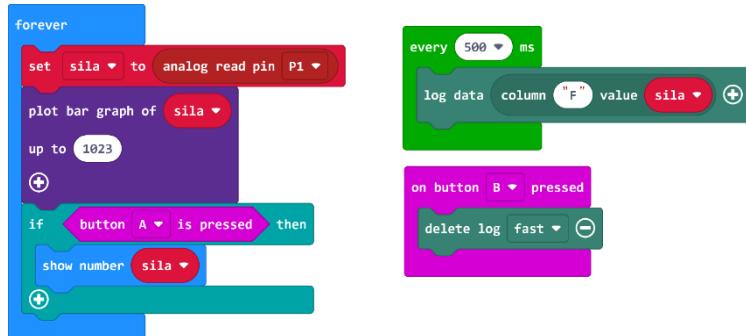
Slika 17: Vezava micro:bit-a, upornika, senzorja sile in žic na vezavni plošči (lasten arhiv).



Slika 18: Vezava sistema za merjenje sile v programu TinkerCAD (zajem zaslona).

4.4 Program za beleženje podatkov

Analogni vhod oz. Pin sprejema podatke in jih ob pritisku na gumb A prične beležiti, kar omogoča funkcija Log data. Po prenehanju izvajanja meritev s pritiskom na gumb B izbrisemo podatke in lahko pričnemo z novim merjenjem. Navodila za izdelavo programa so na voljo na spletni in ne zahtevajo veliko predznanja programiranja (Slika 16).



Slika 19: Program za merjenje sile (zajem zaslona).



5 REZULTATI MERITEV

5.1 Način merjenja in računanja podatkov

Merjenje sile z mikrokrmilnikom micro:bit neposredno ni možno, omogoča pa ga zunanji merilnik sile, ki ga povežemo, kot prikazuje Slika 18 v poglavju 4.2 Vezava merilnika sile na mikrokrmilnik micro:bit. Merilnik sile omogoča merjenje sile med 0,2 N in 20 N, zato je bilo potrebno obtežiti palico, na katero je bilo pritrjeno krilo, saj je model zelo lahek. Med utežjo s palico in merilnikom sile je bila leplilna masa Patafix, ki je omogočila neposredni stik z merilnikom. Merilnik sile je bil pred pričetkom merjenja obremenjen s silo, ki jo je zabeležil kot vrednost # med 0 in 1023, v programu Excel jo je bilo potrebno pretvoriti v odstotek celotne sile teže krila, palice in uteži. Ob vklopu električnega pihalnika se je zrak gibal skozi vstopno šobo vetrovnika, cevi za preprečevanje vrtinjenja zraka, mimo modela krila, merilnika hitrosti vetra in na koncu skozi izstopno šobo ali difuzor. Primer zabeleženih vrednosti in pretvorjenega dinamičnega vzgona v odstotek sile teže za malo krilo pri hitrosti $v_1 = 2 \frac{m}{s}$ je prikazan v Tabeli 1. Pred pričetkom pihanja vetra je merilnik sile kazal vrednost 700, po pričetku pa manjše vrednosti, kar pomeni, da se je pojavila sila dinamičnega vzgona, ki je krilo skupaj s pritrjeno palico in utežjo dvigala. Odstotek sile dinamičnega vzgona glede na silo teže je prikazan v zadnjem stolpcu.

#	F_d [%]	#	F_d [%]
688	1,71	678	3,14
687	1,86	680	2,86
688	1,71	684	2,29
688	1,71	685	2,14
684	2,29	685	2,14
680	2,86	684	2,29
687	1,86	686	2,00
680	2,86	689	1,57
684	2,29	687	1,86
684	2,29	686	2,00

Tabela 1: Prikaz vrednosti, ki jih je zabeležil micro:bit in izračun odstotka sile teže.

Iz zabeleženih podatkov sem izračunal povprečje odstotka dinamične sile pri določeni hitrosti in jih primerjal za majhno in veliko krilo pri treh različnih hitrostih ter petih različnih naklonskih kotih krila pri enaki hitrosti vetra.

5.2 Predstavitev podatkov

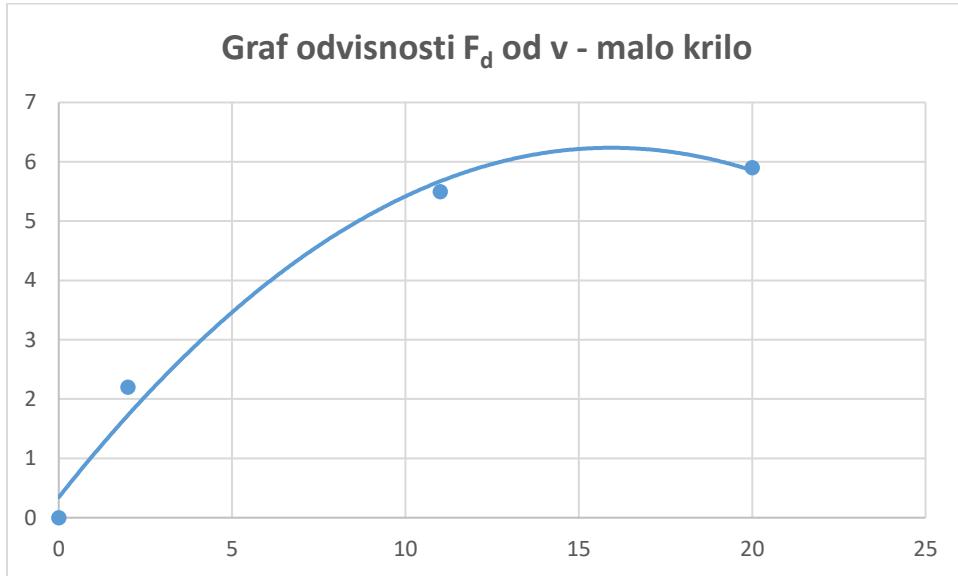
5.2.1 Merjenje dinamičnega vzgona na majhno krilo pri različnih hitrostih vetra

Majhno krilo z dolžino 9 cm in širino 6 cm je bilo pritrjeno na kovinsko palico in spodaj na utež. Model krila je bil zelo poenostavljen in je omogočal le približno oceno dejanskih zakonitosti. V Tabeli 2 so prikazane hitrosti vetra skozi vetrovnik in povprečne vrednosti dinamičnega vzgona v odstotkih sile teže modela z utežjo. Podatki so predstavljeni v Grafu 1, ki prikazuje, da se dinamični vzgon ne povečuje enakovremeno s hitrostjo.



$v \left[\frac{m}{s} \right]$	$\bar{F}_d [\%]$
0	0
2	2,2
11	5,5
20	5,9

Tabela 2: Meritve hitrosti veta
in povprečne vrednosti odstotka
sile teže za malo krilo.



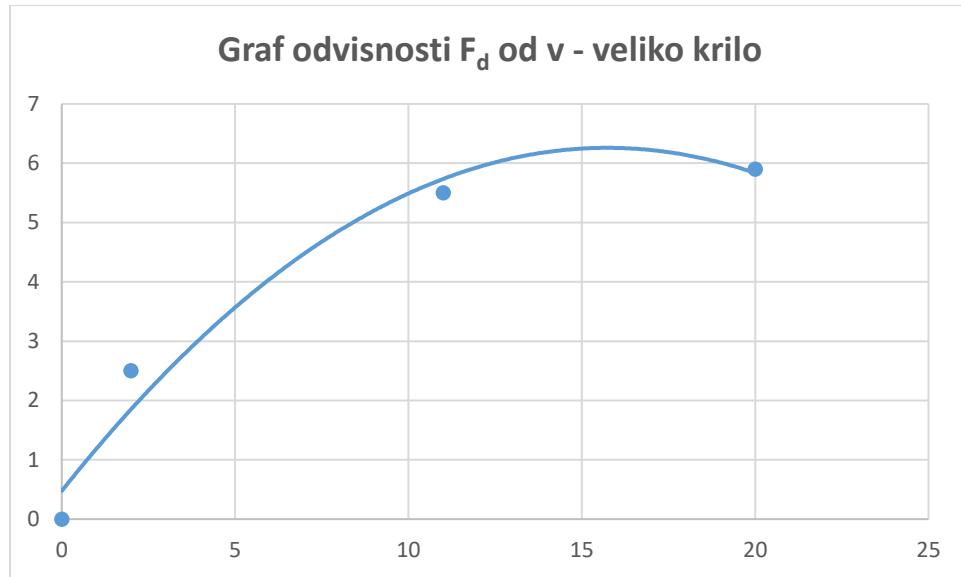
Graf 1: Graf odvisnosti odstotka dinamičnega vzgona od hitrosti veta za malo krilo.

5.2.2 Merjenje dinamičnega vzgona na veliko krilo pri različnih hitrostih veta

Veliko krilo z dolžino 12 cm in širino 9 cm je bilo na enak način kot majhno pritrjeno na kovinsko palico in spodaj na utež. V Tabeli 3 so prikazane hitrosti veta skozi vetrovnik in povprečne vrednosti dinamičnega vzgona v odstotkih sile teže modela z utežjo. Podatki so predstavljeni v Grafu 2, ki prikazuje, da se dinamični vzgon povečuje podobno kot pri majhnem krilu.

$v \left[\frac{m}{s} \right]$	$\bar{F}_d [\%]$
0	0
2	2,5
11	5,7
20	6,2

Tabela 3: Meritve hitrosti veta
in povprečne vrednosti odstotka
sile teže za malo krilo.



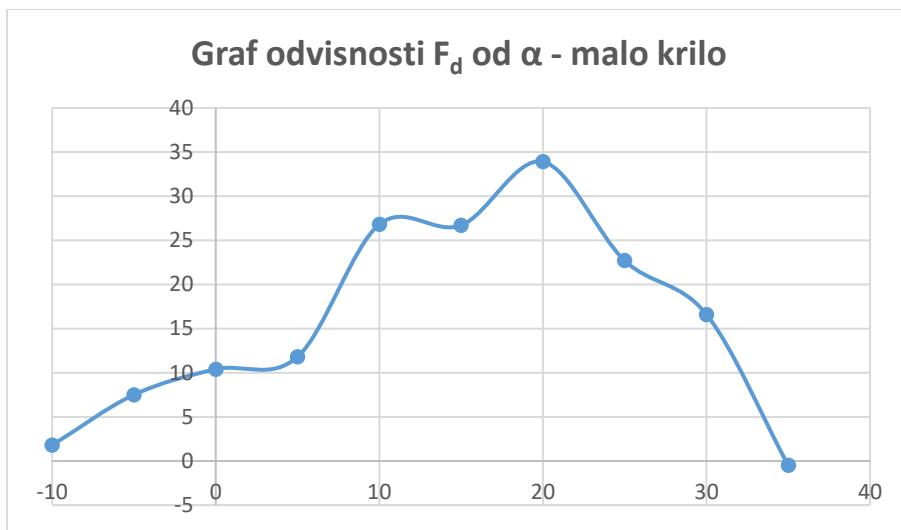
Graf 2: Graf odvisnosti odstotka dinamičnega vzgona od hitrosti vetra za veliko krilo.

5.2.3 Merjenje dinamičnega vzgona na majhno krilo pri različnih naklonih krila

Letala so ob se ob vzletu vzpenjajo pod večjim vpadnim ali naklonskim kotom, kot pri večji hitrosti. Z meritvami odvisnosti dinamičnega vzgona od kota sem na enostaven način izmeril spremenjanje dinamičnega vzgona pri enaki hitrosti vetra, kar je zapisano v Tabeli 4. Graf 3 prikazuje spremenjanje dinamičnega vzgona, pri čemer je dobro vidno, da se dinamični vzgon pri vpadnem kotu 10° zelo poveča, pri manjših in večjih kotih pa se ne spreminja tako izrazito. Pri kotih večjih od 20° se zrak zaletava v krilo bolj pravokotno, zato pride za krilom do pojava vrtinčnih tokov – turbulenc, kar zmanjša dinamični vzgon.

v [$\frac{m}{s}$]	α [°]	F_d [%]
11	-10	1,8
11	-5	7,5
11	0	10,4
11	5	11,8
11	10	26,8
11	15	25,7
11	20	33,9
11	25	22,7
11	30	16,6
11	35	-0,5

Tabela 4: Meritve hitrosti vetra in povprečne vrednosti odstotka sile teže za malo krilo pri različnih vpadnih ali naklonskih kotih krila.



Graf 3: Graf odvisnosti odstotka dinamičnega vzgona vpadnega ali naklonskega kota za malo krilo pri enaki hitrosti.

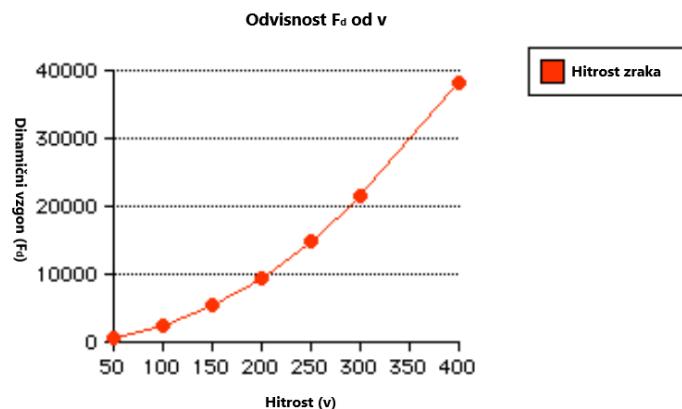


6 RAZLAGA MERITEV

Meritve z mikrokrmilnikom micro:bit so dokaj enostavne, na šoli imamo na voljo vse pripomočke in pomoč učiteljev. Pri merjenju je prišlo do večjih odstopanj, strokovnjaki so v preteklosti izvedli zelo natančne meritve, z enostavnim modelom vetrovnika pa je možno zakonitosti, ki vplivajo na dinamični vzgon ugotoviti kljub približkom dejanskih natančnih meritov. Za večjo natančnost in preverjanje meritov bi jih morali tudi večkrat izvesti.

V hipotezi 1 me je zanimalo, kako hitrost vetra vpliva na silo dinamičnega vzgona na krilo – sklepal sem, da se dinamični vzgon enakomerno povečuje s hitrostjo vetra. Meritve so pokazale, da se povečuje nelinearno, kar opisuje enačba za dinamični vzgon $F_d = \frac{1}{2} \rho v^2 S c_d$, pri čemer je hitrost na kvadrat, kar pomeni, da se pri dvakratnem povečanju hitrosti dinamični vzgon poveča za štirikrat. Graf prikazuje spremenjanje dinamičnega vzgona v odvisnosti od hitrosti ([Vir](#)).

Hipoteza 1 - OVRŽENA



Graf 4: Odvisnost dinamičnega vzgona v njutnih od hitrosti zraka v km/h ([Vir](#)).

Pri drugi hipotezi sem raziskoval odvisnost velikosti kril na dinamični vzgon. Zaradi majhnih razlik med velikostjo kril ni prišlo do večjih razlik ali pa bi moral meritve izvesti večkrat in z več krili. Veče in težja letala imajo tudi večja krila, da ustvarijo večji dinamični vzgon, zaradi česar ta hipoteza drži, čeprav je nisem uspel natančno dokazati.

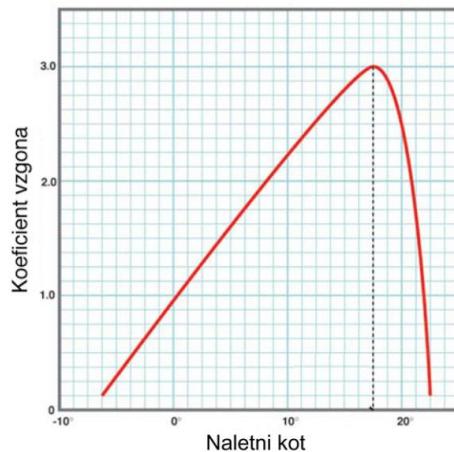
Hipoteza 2 – DELNO POTRJENA

Pri tretji hipotezi sem se spraševal, kako se spreminja dinamični vzgon v odvisnosti od vpadnega ali naklonskega kota krila. Meritve so pokazale, da se dinamični vzgon izrazito poveča pri vpadnem kotu 10° , s čimer sem dobil podobne rezultate, kot so dejanski. To je dokaz, da je možno tudi v enostavnem in poceni vetrovniku dobro raziskovati zakonitosti, ki vplivajo na dinamični vzgon. Graf 5 prikazuje odvisnost koeficiente dinamičnega vzgona od vpadnega ali naletnega kota. Prikazan je zlom krivulje pri kritični vrednosti naletnega kota okoli 20° , kar sem dokaj dobro uspel ugotoviti ([Vir](#): Knez S., Podgornik R, 2007). Na podlagi tega grafa sem ugotovil, da sem z meritvami



nevede približno ugotovil spreminjaanje koeficienta dinamičnega vzgona, ki ga izračunamo z enačbo $c_v = \frac{2F_v}{\rho v^2 S}$. Tega z meritvami in nepoznavanjem natančnih vrednosti fizikalnih količin v enačbi ne morem izračunati, potreboval bi večji vetrovnik in model krila ter natančnejše meritve.

Hipoteza 3 – POTRJENA



Graf 5: Odvisnost koeficienta vzgona od naletnega kota in prikaz zloma krivulje pri kritični vrednosti naletnega kota (Knez S., Podgornik R, 2007).



7 ZAKLJUČEK

Na letenje vpliva veliko dejavnikov. Z meritvami na krilu v vetrovniku sem ugotovil, da večja kot je hitrost vetra in večja kot je površina krila, večji je tudi dinamični vzgon. Količini se ne povečujeta premo enakomerno, a sta odvisni ena od druge. Uporaba mikrokrmilnika micro:bit je enostavna, vseeno pa zahteva precej priprave in analize podatkov. Omoga izvedbo avtomatskih meritev, ki jih ročno ni mogoče izvesti. Kljub napakam pri meritvah pa je vseeno možno ugotoviti zakonitosti in vpliv hitrosti, naklona in velikosti krila na dinamični vzgon in raziskati dejavnike, ki omogočajo, da letala letijo.



8 VIRI IN LITERATURA

Knez S., Podgornik R. Modeli dinamičnega vzgona letalskih kril. Drugi del. 2007.

Černe P., Kozlevčar B. idr. Oxfordova ilustrirana enciklopedija izumov in tehnologij. DZS, 1997.

Wedam A., Adlešič M. idr. Kako deluje II. TZS, 1978.

9 VIRI SLIK in GRAFOV

Slika 2: Aerodynamic forces: lift and drag on a foil. Pridobljeno s

https://www.researchgate.net/figure/Aerodynamic-forces-lift-and-drag-on-a-foil-NACA4612_fig12_289130198

Slika 3: Čulin, A. (2004). Kako deluje letalsko krilo?

Slika 4: Černe P., Kozlevčar B. idr. Oxfordova ilustrirana enciklopedija izumov in tehnologij. DZS, 1997, str. 169.

Slika 5: Prisco, J. (2019). Grumman X-29: The impossible fighter jet with inverted wings. Pridobljeno s

<https://edition.cnn.com/style/article/grumman-x-29-nasa-darpa-fighter-plane/index.html>

Slika 6: What is lift, drag and pitch? Pridobljeno s <https://www.simscale.com/docs/simwiki/lift-drag-pitch/>

Slika 7: Side view of Eiffel-type VKI-L2 wind tunnel. (2022). Pridobljeno s

https://www.researchgate.net/figure/Side-view-of-Eiffel-type-VKI-L2-wind-tunnel_fig1_282436423

Slika 8: Modification of Prandtl Wind Tunnel. Sun B. (2018). Pridobljeno s

<https://www.semanticscholar.org/reader/ecef550f9f836aa41afa2b9db0f374128f14a143>

Graf 4: Velocity effects. Pridobljeno s https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/BGA/Dan/velocity_effects_ans.htm

Graf 5: Knez S., Podgornik R. (2007) Modeli dinamičnega vzgona letalskih kril. Drugi del., str. 13.

Dostopno na [Modeli dinamičnega vzgona letalskih kril. Drugi del.](#)