

VPLIV OBLIKE RAKETNE ŠOBE NA SILO POTISKA

Raziskovalna naloga s področja tehnike in tehnologije



Avtorja: Ian Krizmanič in Rok Jeraj, 9. c

Mentorica: Danica Volčini

Domžale, marec 2025

KAZALO

1 POVZETEK	3
2 UVOD	4
2.1 Raziskovalno vprašanje	4
2.2 Cilji raziskave	5
2.3 Hipoteza	5
3 TEORETIČNI DEL.....	5
4 EKSPERIMENTALNI DEL	6
4.1 Potek dela	6
4.1.1 Izdelava šob	7
4.1.2 Izdelava in delovanje merilnika potiska	8
4.1.3 Sistem za merjenje potiska	9
4.1.4 Postopek merjenja	10
4.2 Metode dela	10
4.2.1 Konstante raziskave	10
5 ANALIZA PODATKOV	11
5.1 Potrjevanje hipoteze	13
6 SKLEPNE UGOTOVITVE	14
7 VIRI IN LITERATURA	15

1 POVZETEK

V raziskovalni nalogi sva raziskovala vpliv notranjega naklona raketne šobe na silo potiska in učinkovitost raketnega motorčka. S 3D-tiskalnikom sva izdelala deset šob z nakloni od 0° do 45° ter meritve izvedla s prilagojenim sistemom, ki je uporabljal sesalnik za simulacijo pretoka plinov. Glavna cilja raziskave sta bila: določiti najprimernejši naklon šobe za uporabo na modelu rakete glede na največji potisk in učinkovitost ter nadgraditi najino znanje o pogonu raket. Rezultati so pokazali, da je šoba z naklonom 40° ustvarila največji potisk in bila tudi najbolj učinkovita, šoba z naklonom 5° pa je proizvedla najmanjši potisk in je bila najmanj učinkovita. Analiza je postavljeno hipotezo potrdila delno, saj so se rezultati nekoliko razlikovali od pričakovanj. Napako pri meritvah z naklonom 10° sva identificirala, a je nisva popolnoma pojasnila. Kljub omejitvam sva optimizirala postopek merjenja, zmanjšala stroške in izboljšala natančnost. V prihodnje bi raziskavo lahko razširila na pomen zunanjšega oblikovanja šob in optimizacijo njihove teže z vidika vpliva na učinkovitost šobe.

Ključne besede: pogon raket, oblika raketne šobe, sila potiska

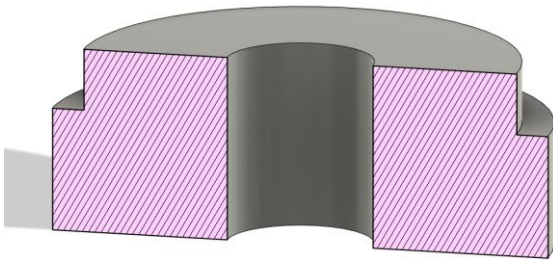
2 UVOD

Že nekaj časa se zanimava za vesoljsko tehnologijo. Tema se nama zdi zelo zanimiva, ker sodelujeva v projektu CanSat, kjer izdelujemo satelit. Zanima naju tudi, kako satelit pride v vesolje. Zato sva se odločila, da izdelava raziskovalno nalogo o pogonu raket, v kateri bova preučila vpliv notranje oblikovanosti raketne šobe na silo potiska raketnega motorčka.

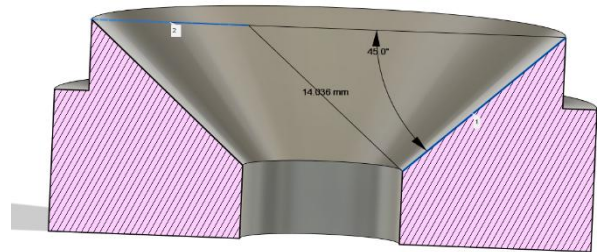
2.1 Raziskovalno vprašanje

Raziskovalno vprašanje, ki sva si ga zastavila v raziskovalni nalogi, je bilo:

- Kako notranji naklon raketne šobe vpliva na silo pogona in s tem učinkovitost raketnega motorčka?



Slika 1: Šoba z naklonom 0°



Slika 2: Šoba z naklonom 45°

Na slikah sta dve skrajnosti kota šobe. Na sliki 1 je šoba z naklonom 0°, na sliki 2 pa šoba z naklonom 45°, ta kot je tudi označen. Naklon 45° je največji, ki sva ga uporabila, 0° pa najmanjši.

2.2 Cilji raziskave

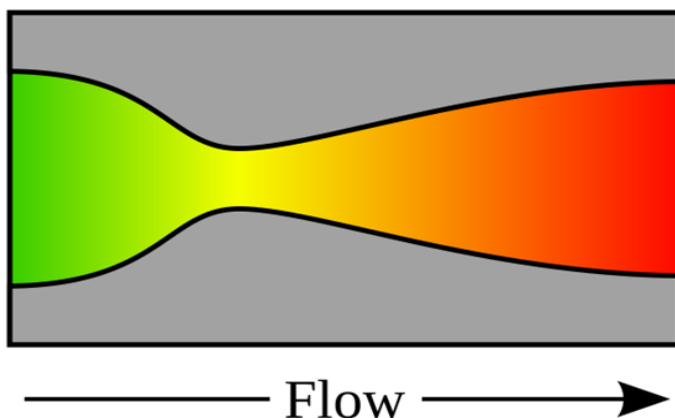
Z raziskavo sva želela ugotoviti, kolikšen notranji naklon šobe je najprimernejši za model rakete, ki ga nameravava izdelati. Najprimernejši je tisti, ki ima največji potisk v razmerju s težo šobe, ki pripada temu naklonu, saj je takšna tudi najbolj učinkovita. Z raziskavo pa sva tudi nadgradila svoje znanje o pogonu raket in delovanju ostalih komponent testiranja raketnih motorčkov.

2.3 Hipoteza

Večji kot je naklon šobe, večji potisk proizvede in bolj je učinkovita. Šoba s kotom 45° (slika 2) bo imela največji potisk, šoba s kotom 0° (slika 1) pa najmanjši potisk. Prav tako bo šoba z naklonom 45° (slika 2) najbolj učinkovita, šoba z naklonom 0° (slika 1) pa najmanj.

3 TEORETIČNI DEL

Rakete so letéča telesa, ki jih poganja raketni pogon in ne uporabljajo zraka iz atmosfere za zgorevanje goriva. Tako poznamo več vrst raket (vesoljske, balistične, pirotehnične itd.). Vesoljske rakete so vam zagotovo znane in zagotovo ste že videli kako izgleda izstrelitev. Ampak ali ste se vprašali kako raketa deluje? Raketa deluje po principu tretjega Newtonovega zakona o gibanju, ki pravi, da je za vsako akcijo enaka in nasprotna reakcija. Delovanje tega zakona v praksi lahko opazimo prav v raketnem pogonu, saj deluje tako, da raketni motor izstreli veliko količino plina, nastalega pri izgorevanju goriva, proti tlom, kar povzroči nasprotno reakcijo in na raketo začne delovati sila, ki jo dviga od tal. Za boljšo učinkovitost in moč vse rakete uporabljajo šobe.



Slika 3: Prikaz raketne šobe¹

¹ De Lavalova šoba, ki prikazuje približno hitrost pretoka, ki se v smeri toka povečuje od zelene do rdeče barve, https://en.wikipedia.org/wiki/Rocket_engine_nozzle (24. 3. 2025).

Zdaj vam bom predstavil delovanje šobe. Se pravi, v del, obarvan z zeleno barvo, pridejo plini, nastali pri gorenju goriva. Ker je prostornina plinov večja kot prostornina goriva in oksidanta (snov, v kateri je potreben kisik za gorenje goriva), narase pritisk v delu, kjer gorivo izgoreva. Ta del je direktno povezan z zelenim delom na sliki 3. Zaradi naraslega pritiska silijo plini izven zelenega dela. Zato pospešijo ven iz šobe. V grlu (rumeno obarvani del) pospešijo do zvočne hitrosti. Nato še vedno pospešujejo v smeri puščice (slika 3) in dosežejo nadzvočno hitrost. V idealni šobi plini dosežejo enak pritisk kot okolica na zunanjem robu, tako plini dosežejo čim višjo možno hitrost in zato ima raketa ravno v drugo smer večji pospešek.

S šobami lahko raketo natančno upravljamo do cilja. Zelo dober primer natančnega usmerjanja raket s šobami je podjetje SpaceX, ki slovi po natančnih vrnitvah raket nazaj na Zemljo do centimetra natančno, kar jim omogoča ponovno uporabo raket. To dosežejo z nagibanjem šob. Brez šob bi bile misije v vesolje manj učinkovite in posledično tudi dražje. Seveda pa šobe uporabljamo tudi v vsem znanih ognjemetih in v drugih pirotehničnih sredstvih. V njih se uporabljajo preprostejša šobe, saj je cena izdelave tako nižja. Vseeno pa uporabljajo **šobe iz dveh delov: zunanjega**, ki pline razširi, da dosežejo pritisk okolice, in **notranjega**, ki pline usmeri v grlo šobe, s čim manj turbulencami. Notranji deli šob na trdno gorivo imajo navadno kot med 15° in 45° . Seveda je ta kot odvisen od pritiska v motorčku, ko ta deluje in posledično od hitrosti izgorevanja goriva. Prve šobe so bile veliko bolj preproste, pojavile pa so se že v 16. stoletju pri izdelavi pirotehničnih raket. Šele kasneje v 19. stoletju je Švedski inženir in izumitelj **Gustaf de Laval** pripomogel pri izdelavi Lavalove šobe z bolj sodobnim izgledom, ki je bila takrat uporabljena v parnih turbinah. Ta šoba je bila uporabljena tudi v prvi vodeni balistični raketi dolgega dosega z imenom V-2.

4 EKSPERIMENTALNI DEL

Najino raziskovalno delo je vsebovalo veliko praktičnega dela, saj sva sama izdelala vse pripomočke za merjenje, prav tako sva vse meritve izvedla sama in s tem pridobila podatke za raziskovalno nalogo.

4.1 Potek dela

Izdelala sva 10 različnih šob in sistem za merjenje sile potiska, ki beleži podatke velikosti sile potiska v odvisnosti od časa. Te podatke sva vnesla v program Microsoft Excel in v tem programu tudi oblikovala grafe in jih analizirala.

Najprej sva nameravala meriti potisk dejanskih trdnih raketnih motorčkov iz mešanice kalijevega nitrata (KNO_3) oz. solitra in sladkorja; vendar sva prišla na zelo dobro idejo, da s sesalcem za prah simulirava pretok plinov, ki bi ga sicer proizvedlo raketno gorivo. S tem sva dosegla:

- zmanjšanje stroškov, saj nisva porabila raketnega goriva;
- možnost večkratne ponovitve meritev, saj bi se šobe (slika 3) na visoki temperaturi sicer uničile (tudi če bi jih izdelala iz cementa, kot sva nameravala na začetku, bi se spremenile toliko, da ne bi bile uporabne za ponovne meritve) in lažji nadzor pretoka plinov;
- možnost dela v zaprtem prostoru, tako sva tudi lažje nadzorovala temperaturo in s tem izboljšala natančnost meritev;
- hitrejše delo, saj nama ni bilo treba čakati, da se motorček ohladi za varno zamenjavo;
- varnejše delo, saj ni bilo tveganja opeklin ali eksplozije raketnega motorčka.

4.1.1 Izdelava šob

Šobe sva natisnila s 3D-tiskalnikom po meri za cev sesalnika za prah. Natisnila sva deset različnih šob, ki so se med seboj razlikovale po notranjem kotu, opisanem zgoraj, od 0° do 45° . Med vsako je bilo po 5 kotnih stopinj razlike. Šobe so bile narisane v programu AvtoCAD in natisnjene na doma izdelanem 3D tiskalniku.



Slika 4: Šobe, ki so bile uporabljene za meritve

Kot pri šobah narašča z leve (0°) proti desni za 5° in se konča s šobo, katere kot meri 45° . Šobe (slika 1, slika 2, slika 4) sva vstavila v sesalnik za prah z ožjim delom v cevi sesalnika.

4.1.2 Izdelava in delovanje merilnika potiska

Merilnik potiska (slika 5) sva izdelala iz pokvarjene kuhinjske tehtnice (okvara ni bila povezana z merilno celico) in iz vezja Arduino UNO. Za lažje vezanje komponent sva uporabila protoboard. Vse skupaj sva trdno pritrdila na leseno ploščo. Deluje tako, da zrak iz šobe piha na okroglo leseno ploščico, ki je pritrjena na celico za merjenje teže, ta celica (YZC-133) nam pošlje signal preko ojačevalca signala (HX711), nato pa ga program, nameščen v Arduino UNO, predela v uporabne podatke, ki jih snema program puTTY in jih lahko shranimo za nadaljnjo obdelavo v programu Excel.



Slika 5: Naprava za merjenje sile potiska

4.1.3 Sistem za merjenje potiska

Na sliki 6 je prikazan celoten sistem za merjenje sile potiska. Cev sesalnika je s prižemo trdno pritrjena na mizo in je poravnana z lesenim ploščkom, ki je pritrjen na celico za merjenje potiska. Spodnji del cevi, pod prižemo, je lahko snemljiv. Tako sva lahko menjala šobe, ne da bi premaknila del cevi, ki je v prižemi. Celica za merjenje potiska je povezana z vezjem Arduino UNO. Prav ta obdela podatke in jih preko kabla pošlje računalniku. Podatki se snemajo z uporabo programa puTTY.



Slika 6: Celoten sistem za merjenje potiska

4.1.4 Postopek merjenja

Cev sesalca je bila s primežem trdno pritrjena na mizo. Spodnji del cevi se je lahko odcepil od preostalega dela cevi, ki je bila povezana na sesalnik, kar je omogočilo lažjo zamenjavo šob. Šobe sva z lepilnim trakom pritrdila v ustje sesalnika. Eden od naju je menjal šobe, drugi pa med tem pripravljal novo datoteko za zapis podatkov. Tako sva bila zelo učinkovita. Merilnik potiska je bil čvrsto pritrjen na tla. Ko sva vklopila sesalnik, je proizvedeni veter močno pritiskal na leseno ploščico in meritev se je pričela. Sesalnik sva pustila vklopljen tri intervale po 20

sekund za vsako šobo. Po vsaki končani meritvi sva datoteko s podatki shranila in izračunala povprečje rezultatov merjenja vseh treh intervalov za vsako posamezno šobo.

4.2 Metoda pridobivanja podatkov

Uporabila sva le eno metodo za pridobivanje podatkov. S pristopom, ki sva ga že opisala, nisva pridobila podatkov o absolutni vrednosti sile potiska, ampak nama je tak pristop vseeno zagotovil primerljive podatke o silah potiska. Seveda sva odstranila čim več spremenljivk, ki bi lahko motile.

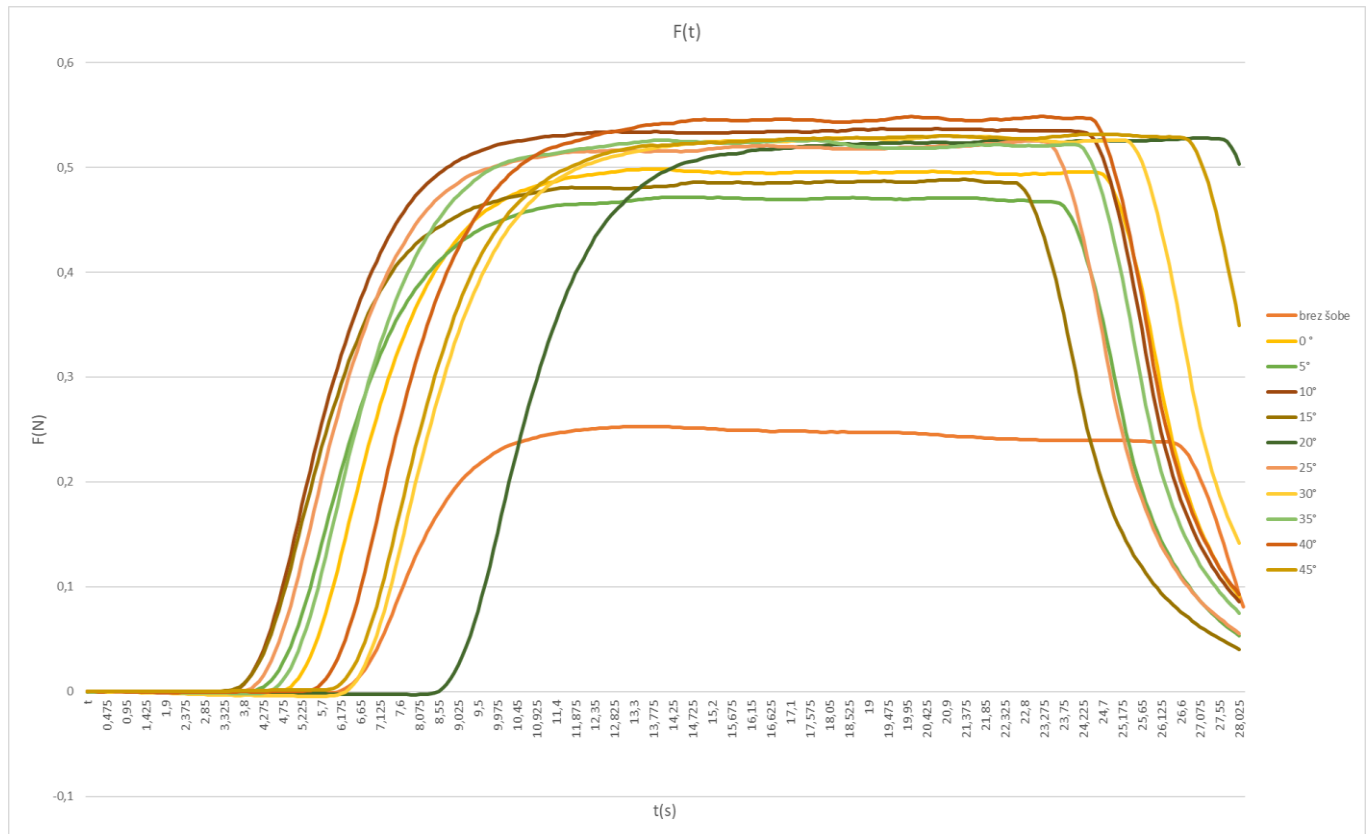
4.2.1 Konstante raziskave

Konstante raziskave so pomembne, saj tako odstranimo čim več spremenljivk in izoliramo samo tiste spremenljivke, ki jih preučujemo. Konstante v najini raziskavi si bile:

- temperatura (25° C)
- oddaljenost šobe od lesene ploščice za merjenje potiska (100 mm)
- velikost lesene ploščice (1256,63 mm²)
- zračni pretok
- širina odprtine šobe (10 mm).

5 ANALIZA PODATKOV

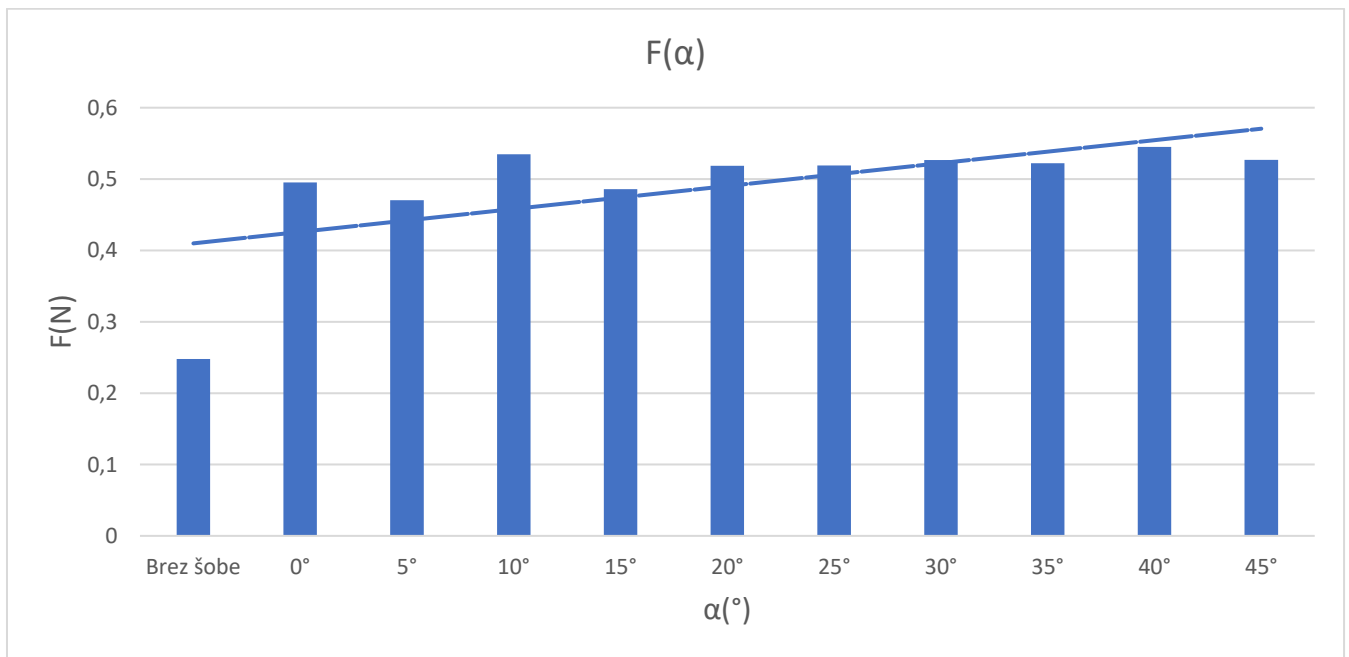
Pridobljene podatke sva analizirala z vidika postavljene hipoteze (razmerja med naklonom šobe ter silo potiska in učinkovitostjo), ugotovitve pa predstavlja v nadaljevanju.



Slika 7: Sila potiska v odvisnosti od časa

Graf na sliki 7 predstavlja silo potiska v odvisnosti od časa. Na osi X je nanešen čas, na osi Y pa sila potiska. Vse krivulje so enake oblike le, da so pomaknjene navzgor ali navzdol in levo ali desno. Razlog za to je enak čas, ki ga je potreboval sesalnik, da je dosegel največji pretok zraka in enak čas za zaustavitev.

Opazimo lahko veliko razliko med vrednostjo sile potiska brez šobe in vrednostmi ostalih meritev z različnimi šobami, kar je glede na to, da sva meritev brez šobe vključila kot testno, pričakovano.

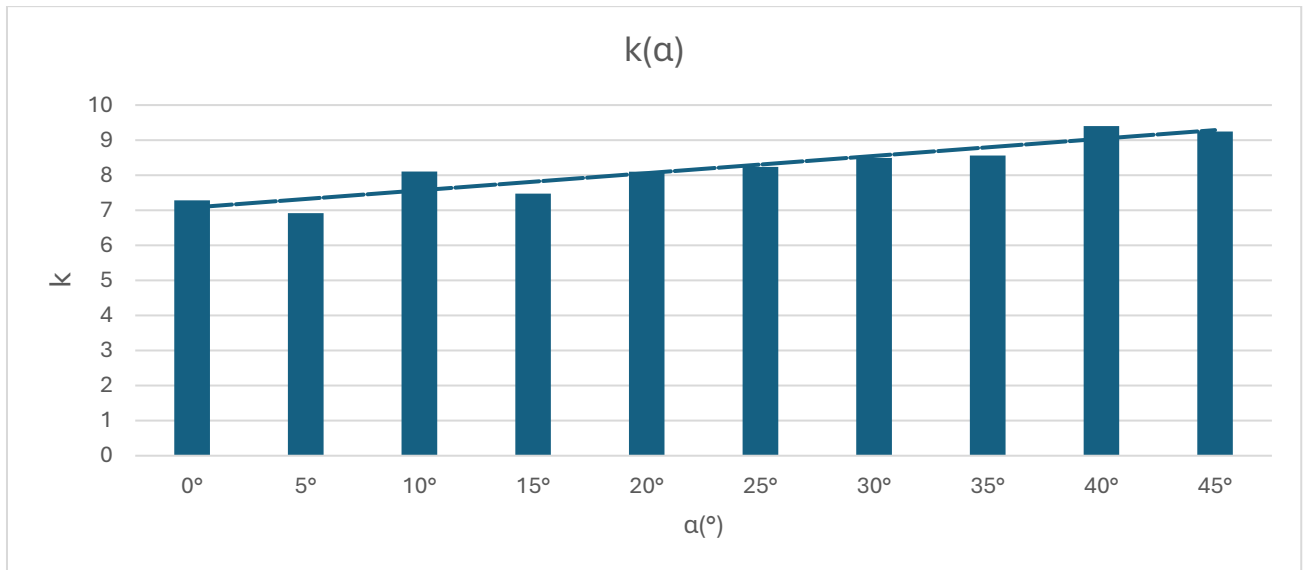


Slika 8: Povprečna sila potiska v odvisnosti od naklona šobe

Graf na sliki 8 prikazuje povprečno silo potiska v obdobju, ko je krivulja grafa potiska v odvisnosti od časa brez naklona (ko je sesalnik prišel do največjega pretoka zraka). Na osi X je nanešen kot naklona šobe, na osi Y pa povprečna sila potiska. Iz grafa lahko razberemo, da rast potiska ni močno vezana na rast kota, vendar pa trendna črta prikazuje rahlo naraščanje potiska z naraščanjem kota.

Največjo silo potiska je proizvedla šoba z naklonom 40° , najmanjšo pa šoba z naklonom 5° . Šobe z nakloni 10° , 20° , 30° , 35° in 45° so imele skoraj enak potisk.

Pri naklonu 10° opazimo nenavadno visoko silo potiska glede na druge meritve. Domnevala sva, da je to zgolj napaka pri merjenju zaradi najine doma izdelane merilne priprave. Domnevo sva preverila tako, da sva ponovno natisnila šobo in izvedla meritve z novo šobo. Rezultat merjenja z novo šobo je bil bližje trendni črti, čeprav je bila nova šoba natisnjena z enakimi nastavitvami kot prva. Razloga odklona od trendne črte in razlike v rezultatih za šobi s kotom 10° nisva uspela popolnoma pojasniti.



Slika 9: Vrednost k v odvisnosti od naklona šobe

Graf na sliki 9 predstavlja vrednost k (ki izraža učinkovitost) v odvisnosti od naklona šobe (α); $k = F_{\text{pot}}/F_g$. F_{pot} je povprečna sila potiska, F_g pa sila teže na šobo. Večji kot je koeficient k , večja je učinkovitost šobe. Trendna črta raste, kar kaže, da je šoba z večjim naklonom učinkovitejša. Pri tem moramo upoštevati, da teže šob niso optimizirane in zato podatki niso povsem relevantni za optimizirano šobo na raketi.

5.1 Potrjevanje hipoteze

Hipotezo sva delno dokazala, saj je imela največji potisk in največjo učinkovitost šoba z naklonom 40°, najmanjšo učinkovitost in potisk pa šoba z naklonom 5°. Tako je najina hipoteza le po 5° odstopala od spodnje in zgornje predvidene vrednosti naklona oziroma notranjega kota šobe.

6 SKLEPNE UGOTOVITVE

V raziskovalni nalogi sva proučevala vpliv notranjega naklona raketne šobe na silo potiska in učinkovitost raketnega motorčka. Meritve so pokazale, da notranja oblika šobe bistveno vpliva na silo potiska, pri čemer je največji potisk proizvedla šoba z naklonom 40° , najmanjšega pa tista z naklonom 5° . Prav tako je bila šoba z naklonom 40° najbolj učinkovita, kar potrjuje domnevo, da večji nakloni izboljšajo učinkovitost, čeprav rezultati niso v celoti potrdili hipoteze.

Najino delo je vključevalo razvijanje in optimizacijo merilne metode, kar je omogočilo natančnejše rezultate in zmanjšanje stroškov. Uporaba sesalnika za simulacijo pretoka plinov se je izkazala za učinkovito alternativo uporabi dejanskega raketnega goriva. S tem sva dosegla večkratno ponovljivost meritev, izboljšala varnost in omogočila delo v notranjih prostorih. Analiza podatkov je pokazala, da šobe z večjimi nakloni zagotavljajo boljše razmerje med silo potiska in učinkovitostjo. Kljub temu sva opazila nekaj odstopanj, kot na primer pri šobi z naklonom 10° , kar bi lahko bilo posledica napak pri meritvah. Te nepojasnjene razlike nakazujejo potrebo po nadaljnjih raziskavah in izboljšavah merilnih metod.

Raziskava je pomembno prispevala k najinemu razumevanju delovanja raketnih šob in potrdila praktično vrednost kombinacije teoretičnega in eksperimentalnega pristopa. V prihodnje bi bilo smiselno razširiti raziskavo na zunanje oblikovanje šob ter optimizacijo teže, kar bi dodatno izboljšalo učinkovitost šob in njihovo uporabnost pri modelih raket ter omogočilo zanesljivejšo meritev učinkovitosti šob.

7 VIRI IN LITERATURA

- Lecture 6: Hardware Design of Nozzles & Closures - MIT Rocket Team - MIT Wiki Service. (Dostopno: 23. 12. 2024).
- Rocket engine nozzle, https://en.wikipedia.org/wiki/Rocket_engine_nozzle (Dostopno: 24. 3. 2025).
- Rocket, <https://en.wikipedia.org/wiki/Rocket> (Dostopno: 24. 3. 2025).
- Rocket Nozzles: Types, Manufacturing & Materials - Advanced Structural Technologies (Dostopno: 6. 4. 2025).
- Design and Analysis of Rocket Nozzle | Engineering Arena (Dostopno: 24. 3. 2025).