

šC Ptuj, ERŠ
Volmerjeva cesta 19
2250 Ptuj

CanSat – stabilizacijski sistem za vesoljske pristajalne module

Raziskovalna naloga - Aplikativni inovacijski predlogi in projekti

Avtorji:

Rene Kolednik

Anže Sužnik

Daniel Pliberšek

Mentorji:

Franc Vrbančič

Aljaž Nahberger

Aljaž Šešo

Ptuj, marec 2025

Povzetek

Raziskovalna naloga se osredotoča na razvoj in preizkušanje inovativnega sistema za avtomatsko stabilizacijo sonde po pristanku, ki omogoča samodejno postavitev plovila v pokončno lego. Stabilizacijski mehanizem temelji na motoriziranih pristajalnih nogicah, ki omogoča, da CanSat nadaljuje nemoteno delovanje tudi v primeru nepravilne orientacije ob pristanku.

V sklopu raziskave smo razvili funkcionalen CanSat, ki vključuje senzorje za zaznavanje okolja, sistem za brezžični prenos podatkov, shranjevanje informacij in obdelavo v realnem času s pomočjo Grafane. Skozi serijo eksperimentalnih testov smo preizkusili odzivnost senzorjev, kakovost komunikacije in učinkovitost stabilizacijskega sistema, pri čemer so vsi elementi delovali zanesljivo.

Rezultati testiranja so pokazali, da sistem natančno zaznava orientacijo sonde, sproži korektivne ukrepe in ga uspešno postavi v stabilno pokončno lego, kar odpravlja eno ključnih težav pri pristajalnih misijah. Čeprav je bil sistem uspešno validiran v nadzorovanih pogojih, še ni bil preizkušen pri spustu iz večjih višin, kar predstavlja priložnost za nadaljnja raziskovanja in optimizacijo.

Zasnovani pristajalni sistem ima širok potencial za uporabo pri večjih vesoljskih misijah, saj bi lahko izboljšal stabilnost pristajalnih sond, raziskovalnih plovil in celo večjih raketnih sistemov. Integracija tovrstnega stabilizacijskega mehanizma bi omogočila večjo zanesljivost pri pristankih na neenakomernih površinah, zmanjšala potrebo po kompleksnih pristajalnih strategijah in povečala varnost vesoljskih misij.

Raziskava dokazuje, da je razvoj avtomatskega stabilizacijskega sistema za pristajalne module izvedljiv in praktičen, pri čemer bi dodatna testiranja v realnih razmerah omogočila še boljše razumevanje njegovih zmogljivosti. Z nadaljnjim razvojem bi lahko ta tehnologija igrala ključno vlogo pri prihodnjih pristankih na Luni, Marsu ali drugih nebesnih telesih, kar bi pomembno prispevalo k napredku vesoljskih raziskav in tehnologij.

Ključne besede: projekt CanSat, avtomatska stabilizacija po pristanku, strojna oprema stabilizacije, programska oprema stabilizacije

Summary

The research project focuses on the development and testing of an innovative system for automatic sonde stabilization after landing, which enables automatic positioning of the craft in an upright position. The stabilization mechanism is based on motorized landing legs, which allows the CanSat to continue operating smoothly even in the event of incorrect orientation upon landing.

As part of the research, we developed a functional CanSat that includes sensors for environmental sensing, a system for wireless data transmission, information storage and real-time processing using Grafana. Through a series of experimental tests, we tested the responsiveness of the sensors, the quality of communication and the efficiency of the stabilization system, with all elements operating reliably.

The test results showed that the system accurately detects the orientation of the satellite, initiates corrective actions and successfully positions it in a stable upright position, which eliminates one of the key problems in landing missions. Although the system has been successfully validated under controlled conditions, it has not yet been tested in descent from higher altitudes, which presents an opportunity for further research and optimization.

The designed landing system has broad potential for use in larger space missions, as it could improve the stability of landers, research vessels and even larger rocket systems. The integration of such a stabilization mechanism would enable greater reliability in landings on uneven surfaces, reduce the need for complex landing strategies and increase the safety of space missions.

The research demonstrates that the development of an automatic stabilization system for landing modules is feasible and practical, with additional testing in real conditions allowing for a better understanding of its capabilities. With further development, this technology could play a key role in future landings on the Moon, Mars or other celestial bodies, which would significantly contribute to the advancement of space research and technologies.

Keywords: CanSat, post-landing stabilization, motorized legs, space missions, stabilization automation

Kazalo vsebine

1Uvod.....	1
2Teoretični del	2
2.1Namen raziskovanja.....	2
2.2Preučevanje že pridobljenega znanja - pregled preteklih vesoljskih misij.....	2
2.2.1AeroShell	2
2.2.2Padala.....	4
2.2.3Zračne blazine.....	5
2.2.4Retro-pogon	6
2.3Neuspele misije.....	7
2.4Cilji raziskovanja	8
2.5Raziskovalno vprašanje	8
2.6Metode raziskovanja	9
3Potek raziskave	10
3.1CanSat.....	10
3.2Komponente v CanSatu	11
3.2.1BME680.....	12
3.2.2BNO055	12
3.2.3APC220.....	12
3.2.4BN-180.....	12
3.2.5Arduino Nano.....	13
3.2.6DHT11	13
3.2.7SD kartični zapisovalnik	13
3.2.8Stabilizacijski sistem.....	13
3.2.9Ohišje	14
3.2.10Padalo.....	14
3.3Razporeditev komponent v CanSatu.....	15
3.4Zemeljska postaja.....	15
3.5Programski opis	16
4Rezultati raziskovanja.....	18
4.1 Pomanjkljivosti raziskave	18
4.2 Uporaba sistema v realnem svetu.....	19
4.3 Ugotovitev raziskave	19
5Zaključek	20
6Viri in literatura.....	22

Kazalo slik

SLIKA 1 - AEROSHELL	8
SLIKA 2 - PADALO	9
SLIKA 3 - ZRAČNE BLAZINE	11
SLIKA 4 - RETRO POGON	12
SLIKA 5 BME680	17
SLIKA 6 - BNO055	17
SLIKA 7 - APC220	18
SLIKA 8 - BN-180	18
SLIKA 9 - ARDUINO NANO	19
SLIKA 10 - DHT11	19
SLIKA 11 - SD - KARTIČNI ZAPISOVALNIK	20
SLIKA 12 - DRV8833	20
SLIKA 13 - 6V ENOSMERNI MOTOR S PRENOSI	20
SLIKA 14 - RASBERRY PI 5	23

1 Uvod

V zgodovinskem razvoju človeštva so tehnološke inovacije igrale ključno vlogo pri širjenju meja našega razumevanja vesolja. Od prvih preprostih astronomskih opazovanj, do sodobnih vesoljskih misij, je napredek omogočal raziskovanje vedno bolj oddaljenih koticov našega osončja. Ena izmed najnovejših tovrstnih misij je bila Nasina misija Odysseus, ki jo je izvedlo zasebno podjetje Intuitive Machines. Ta misija, katere cilj je bil mehki pristanek na Luninem južnem polu, je predstavljala pomemben korak k ponovni prisotnosti človeka na Luni in odpiranju poti za prihodnje raziskave in kolonizacijo. Kljub tehnični dovršenosti pa se je sonda Odysseus po pristanku prevrnila na bok, kar je zmanjšalo njeno operativno zmogljivost in izpostavilo ključne izzive pri načrtovanju prihodnjih luninih pristankov. [1]

Kljub uspešnemu dosegu Lunine površine in ohranjanju komunikacije z Zemljo so težave pri pristanku razkrile potrebo po izboljšavah v zasnovi pristajalnih mehanizmov. Pristanek na nepredvidljivem luninem terenu zahteva izjemno natančnost in stabilnost, zato se obstoječi pristajalni sistemi izkažejo za občutljive, na nepričakovane dejavnike, kot so naklon terena ali premajhna porazdelitev teže sonde. Te težave niso le tehnični izziv, temveč tudi ključno vprašanje za prihodnje misije, ki bodo temeljile na samostojnih robotskih raziskavah in človeški prisotnosti na Luni.

V okviru tega projekta bomo razvili lasten model pristajalnega modula, ki rešuje problem prevrnitve sonde z inovativnim sistemom stabilizacijskih nog. Te noge omogočajo, da se sonda v primeru nagiba ali padca ponovno dvigne in zavzame pravilno orientacijo, kar bi bistveno povečalo njeno funkcionalnost in podaljšalo operativni čas misije. Namen te raziskave je analizirati težave, s katerimi se je soočila misija Odysseus, in teoretično ter praktično preizkusiti rešitve, ki bi lahko izboljšale stabilnost prihodnjih luninih pristankov.

V nadaljevanju bomo najprej teoretično preučili obstoječe metode pristajanja vesoljskih sond ter analizirali pomanjkljivosti trenutnih sistemov. Na podlagi teh ugotovitev bomo predstavili izboljšan koncept pristajalnih nog in ga podprli s praktičnim modelom. Cilj raziskave je razviti rešitev, ki bo povečala zanesljivost in varnost prihodnjih luninih misij, hkrati pa prispevala k trajnostnemu in učinkovitemu raziskovanju vesolja.

2 Teoretični del

V tem poglavju razložimo teorijo pristajalnih načinov in preučimo znanje o preteklih vesoljskih misijah, ter preučimo vesoljsko misijo Odysseus. Razložimo tudi namen raziskave in zapišemo raziskovalno vprašanje.

2.1 Namen raziskovanja

Namen raziskovanja stabilizacijskega sistema za lunarne pristajalne module je izboljšati zanesljivost in varnost pristankov vesoljskih sond na neravnem terenu, s čimer bi zmanjšali tveganje prevrnitve in omogočili daljše operativno delovanje naprav. Z razvojem inovativnega sistema stabilizacijskih nog želimo prispevati k večji uspešnosti prihodnjih luninih misij ter odpraviti pomanjkljivosti, ki so se pokazale pri misiji Odysseus. S kombinacijo naprednih inženirskih rešitev, avtomatizacije ter simulacij pristankov stremimo k oblikovanju robustnega pristajalnega mehanizma, ki bi omogočal varno in stabilno pristajanje na različnih tipih luninega površja.

2.2 Preučevanje že pridobljenega znanja - pregled preteklih vesoljskih misij

Z naraščajočim zanimanjem za raziskovanje globokega vesolja so pristajalni blažilni sistemi postali predmet obsežnih študij. Glede na zasnovo pristanka lahko sisteme, ki omogočajo varno dosedanje sond na planetarne površine, razdelimo v tri glavne kategorije: mehanizem za mehko pristajanje, nebesni žerjav in sistem zračnih blazin (uporabljajo spodaj opisane tehnološke izvedbe). Glavne značilnosti in obseg uporabe teh treh pristajalnih sistemov so različni. Mehanizem mehkega pristanka je tradicionalen in primeren za vesoljska plovila, ki se morajo vrniti, kot so lunarni pristajalci s posadko. Nebeški žerjav ima prednosti majhnega vpliva in visoke zanesljivosti, vendar je njegova struktura bolj zapletena. Večinoma se uporablja za pristajanje različnih novih landerjev, predvsem planetarnih roverjev. Kot je vsem znano, je naprava z zračno blazino še posebej primerna za pristajalne naprave, ki se po pristanku ne vrnejo, s prednostmi majhne velikosti, lahke teže, nizkih stroškov, preproste strukture, nastavljive zmogljivosti in dobre stabilnosti.

2.2.1 AeroShell

Aeroshell je sestavljen iz dveh delov: toplotnega ščita in hrbtno lupine. Skupaj inkapsulirajo vesoljsko plovilo in varno pripravijo njegove znanstvene instrumente, spustno stopnjo in drugo operativno opremo. [2]

Sijajni trenutek aeroshella se zgodi med vstopom, pristajanjem in pristankom (EDL). Ko vesoljsko plovilo izvaja različne manevre, da varno pristane na svojem cilju, toplotni ščit vesoljsko plovilo dobesedno ščiti pred ekstremno vročino, ki nastane med začetnim spuščanjem skozi atmosfero planeta

CanSat – pristajalni sistem za lunarne pristajalne module

(običajno okoli 2700 °F na Marsu). Poleg tega naravna aerodinamika toplotnega ščita služi kot "zavora", ki pomaga upočasniti vesoljsko plovilo. [2]

Stožčasta struktura zadnje lupine prav tako igra pomembno vlogo med EDL. Hrbtne školjke podpira padalo in druge mehanizme, potrebne za varen pristonek, vključno z elektroniko in baterijami. Poleg tega ima zadnja lupina luknje za majhne potisne motorje, ki pomagajo ohranjati vesoljsko plovilo pravilno usmerjeno. [2]

Toplotni ščit Marsa 2020 – del aeroskoplje, ki nosi glavno breme toplote – je prevlečen s posebej trpežnim, ablativnim materialom, imenovanim PICA. Njegova hrbtne školjke uporablja strukturo iz aluminijevega satja, stisnjeno med grafitno-epoksidne sprednje plošče in ročno zapakirano s SLA-561V – ablativnim materialom z nizko prevodnostjo, katerega teksturo primerjajo s kinetičnim peskom. [2]



Slika 1 - AeroShell

Viri: (https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/space/photo/aeroshell/Mars_2020_Heat_Shield_Mated_to_Back_Shell-NASA.jpg.pc-adaptive.1280.medium.jpg)

2.2.2 Padala

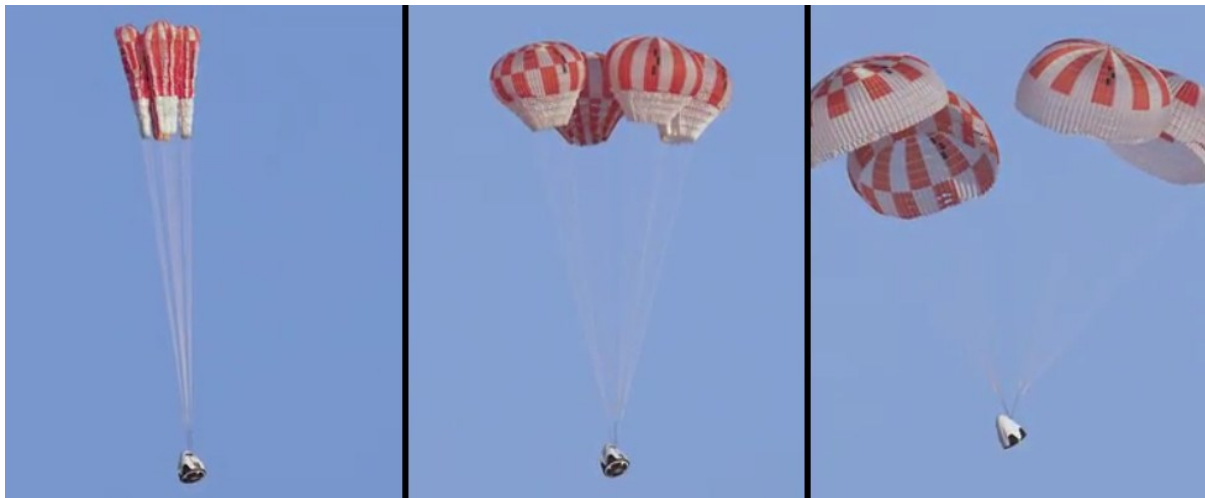
Padala igrajo ključno vlogo v vesolju, saj služijo kot bistvene varnostne naprave, ki omogočajo nadzorovan spust in varno pristajanje vesoljskih plovil, raket in letal. Njihov pomen sega v različne

aplikacije, od vračanja astronautov na Zemljo do razporejanja znanstvenih tovorov na oddaljenih planetih.[3]

Padalo je naprava, namenjena upočasnitvi spuščanja predmeta z ustvarjanjem upora, sile, ki nasprotuje gibanju po zraku. Osnovne komponente padala vključujejo baldahin (velika tkanina, ki lovi zrak in ustvarja upor), vrvi vzmetenja (vrvi, ki povezujejo streho s tovorom in enakomerno porazdelijo silo) in tovor (predmet ali oseba, pritrjena na padalo, ki jo je treba upočasniti). [3]

Delovanje padala urejajo fizikalna načela, vključno z zračnim uporom in gravitacijo. Ko se padalo razpre, se kupola napihne in ustvari veliko površino, ki se upira gravitacijskemu vlečenju navzdol, s čimer se upočasni spuščanje tovora. [3]

Poleg osnovnega delovanja imajo padala v vesoljskih misijah štiri ključne aplikacije. Prvič, pri ponovnem vstopu in vrnitvi vesoljskih plovil na Zemljo, kjer zmanjšajo hitrost kapsul, najbolj zano po misijah Apollo, ter omogočijo varen pristonek. Drugič, pri pristanku misij na Marsu, kjer zaradi redke atmosfere delujejo v kombinaciji z drugimi sistemi, kot so pristajalni potisniki in zračne blazine. Tretjič, pri ponovni uporabi raketnih stopenj, saj podjetja, kot sta SpaceX in Blue Origin, uporabljajo padala za upočasnitev in varno vrnitev komponent. Četrto, pri dostavi tovora iz vesolja ali iz zraka, kjer padala omogočajo natančne in varne spuste znanstvenih instrumentov ali humanitarnih zalog. [4]



Slika 2 - padalo

Viri: (<https://i.sstatic.net/BBg86.jpg>)

2.2.3 Zračne blazine

Zračne blazine predstavljajo eno izmed ključnih tehnologij za pristajanje vesoljskih plovil, še posebej za misije, kjer ni predvidena vrnitev plovila na Zemljo. Njihova glavna prednost je v majhni masi, nizkih stroških, preprosti strukturi ter prilagodljivih zmogljivostih pri absorpciji udarca. Prve uspešne

uporabe zračnih blazin pri vesoljskih misijah segajo v leto 1966, ko je sovjetska sonda Luna 9 uporabila to tehnologijo za prvi mehak pristanek na Luni.[1]

Obstajajo trije osnovni tipi zračnih blazin: neprezračevane zračne blazine, prezračevane zračne blazine in kombinirane zračne blazine. Neprezračevane zračne blazine ne izpuščajo zraka in energijo absorbirajo s serijo odbojev. Njihova prednost je vsestranska zaščita plovila, ne glede na orientacijo pri pristanku, a zaradi nepredvidljive končne lege zahtevajo dodatne mehanizme za stabilizacijo plovila. Prezračevane zračne blazine so zasnovane tako, da se ob udarcu sprva stisnejo, nato pa sprostijo zrak skozi nadzorovane odprtine, s čimer odpravijo odboje in omogočijo stabilnejši pristanek. Njihova slabost je možnost prehitrega praznjenja, kar lahko povzroči trd pristanek, zato se razvijajo sistemi za nadzor ventila in injiciranje plina, ki izboljšujejo absorpcijske lastnosti.[1]

Za reševanje težav tako neprezračevanih kot prezračevanih zračnih blazin so bile razvite kombinirane zračne blazine, ki združujejo prednosti obeh sistemov. Te običajno vključujejo dve komori – zunanjo prezračevano in notranjo neprezračevano. Zunanja komora absorbira večino energije s kontroliranim sproščanjem zraka, notranja pa zagotavlja dodatno elastično podporo, da prepreči neposreden stik plovila s tlemi in zmanjša tveganje za poškodbe. Ta zasnova omogoča boljše absorpcijske lastnosti in stabilnejši pristanek tudi na neravnem terenu.[1]

Najbolj znana uporaba zračnih blazin pri pristajanju je odprava Pathfinder. Zračne blazine so sestavljene iz štirih velikih vrečk s šestimi manjšimi, med seboj povezanimi krogli v vsaki vrečki. Vreče merijo 17 čevljev (5 metrov) v višino in približno 17 čevljev (5 metrov) v premeru. Ko se je Pathfinder s padalom spustil na površje Marsa, je višinomer v pristajalni enoti spremljal njegovo oddaljenost od tal. Računalnik je te velike zračne blazine napihnil približno 330 čevljev (100 metrov) nad površjem Marsa. Ob pristanku je Pathfinder, obdan z zračno blazino, poskočil več kot 15-krat, preden se je zakotalil in ustavil. [1]



Slika 3 - zračne blazine

Viri: (<https://science.nasa.gov/wp-content/uploads/2024/08/5277460495-c6d046d5a9-o.jpg>)

2.2.4 Retro-pogon

Retro-pogon je tehnika, ki vključuje proženje raketnih motorjev v nasprotni smeri vožnje in se je pojavila kot transformativna tehnologija pri načrtovanju in delovanju izstrelitvenih sistemov za večkratno uporabo. Tradicionalno povezan s spuščanjem vesoljskih plovil in pristankom na nebesnih telesih, je retro-pogon znova našel zanimanje in razširil uporabo na področju večkrat uporabnih nosilnih raket za misije v zemeljski orbiti. Ena od opaznih izvedb retro-pogona je nadzorovan spust prve stopnje rakete. Ko požene tovor na določeno višino, začne prva stopnja nadzorovan spust nazaj na Zemljo. Motorji za povratni pogon se aktivirajo, da preprečijo zagon vozila naprej in zaščitijo kritične komponente pred težkimi pogoji ponovnega vstopa, kar omogoča natančno in ciljno vrnitev na mesto pristanka ali ploščad za reševanje. SpaceX-ov Falcon 9 je izjemen primer praktične izvedbe retro-pogona v izstrelitvenih sistemih za večkratno uporabo (glej [sliko 1](#)). [5]



Slika 4 - retro pogon

Viri: (<https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0376042124000708-gr1.jpg>)

2.3 Neuspele misije

Misija Odysseus je predstavljala pomemben korak v zasebnih prizadevanjih za raziskovanje Lune. Njen cilj je bil dostaviti znanstveno opremo na lunino površje in s tem prispevati k nadaljnjemu razumevanju našega naravnega satelita. [6,7,8,9]

Februarja 2024 je lunarni pristajalnik Odysseus dosegel lunino površje. Med pristankom je prišlo do nepričakovanega dogodka; pristajalnik se je prevrnil na bok. Kljub temu je sprva nadaljeval z oddajanjem signalov, kar je nakazovalo, da so nekateri sistemi še vedno delovali. Vendar je bila zaradi prevrnjenega položaja funkcionalnost pristajalnika močno omejena, kar je vplivalo na njegovo zmožnost izvajanja predvidenih znanstvenih nalog. [6,7,8,9]

Pristajalnik Odysseus je bil opremljen z naprednim sistemom za mehko pristajanje, ki je vključeval raketne motorje za upočasnitev spusta in zračne blazine za absorpcijo udarca ob pristanku. Kljub tem varnostnim ukrepom je analiza po dogodku pokazala, da je pristajalnik pristal na nagnjenem terenu ali trčil v oviro, kar je povzročilo njegovo prevrnitev. Ta incident poudarja pomembnost natančnega izbora pristajalnega mesta in potrebo po sistemih, ki lahko obvladajo nepričakovane ovire na lunini površini. [6,7,8,9]

Po prevrnitvi je bilo odločeno, da se misija prekine, saj pristajalnik v svojem položaju ni mogel učinkovito izvajati znanstvenih raziskav. Ta dogodek je služil kot dragocena lekcija za prihodnje misije,

saj je izpostavil potrebo po izboljšavah v načrtovanju pristajalnih sistemov in izbiri pristajalnih mest. Kljub temu je misija Odysseus prispevala k razumevanju izzivov, s katerimi se soočajo zasebne organizacije pri raziskovanju vesolja, in postavila temelje za prihodnje izboljšave v tehnologiji pristajanja na drugih nebesnih telesih. [6,7,8,9]

2.4 Cilji raziskovanja

Neuspeh misije Odysseus je postal navdih za našo raziskovalno nalogo, v kateri si prizadevamo razviti izboljššan sistem pristajanja za majhne satelite. Cilj našega projekta je oblikovati funkcionalno repliko satelita za nizko orbito v okviru misije CaNSat, ki bo sposoben zbirati in oddajati podatke ter se ob pristanku samodejno stabilizirati v pokončno lego. Pri tem se osredotočamo na razumevanje izzivov, s katerimi so se soočale pretekle vesoljske misije, in na razvoj inovativnih rešitev, ki bi omogočile varnejše in učinkovitejše pristajanje tudi v zahtevnih pogojih.

Naš satelit bo opremljen s senzorji, komunikacijskimi moduli in stabilizacijskim sistemom, ki bo omogočal uspešno delovanje po pristanku. Poseben poudarek namenjamo pristajalnemu mehanizmu, ki bo z uporabo aktivnih nog, premičnih uteži ali vzmetnih sistemov zagotovil, da se satelit, ne glede na orientacijo pristanka, postavi v pokončno lego. S tem odpravljamo težave, s katerimi so se srečale pretekle misije, in ustvarjamo nov pristop k stabilizaciji majhnih vesoljskih plovil.

Naša raziskava ne bo zgolj teoretična, temveč bomo svoje ideje preizkusili v praksi z izgradnjo in testiranjem eksperimentalnega CaNSat satelita. S tem želimo potrditi delovanje našega pristajalnega sistema in pridobiti dragocene podatke, ki bodo služili kot temelj za nadaljnje izboljšave. Končni cilj naše naloge je razviti inovativno rešitev, ki bi lahko v prihodnosti našla svojo uporabo pri pravih vesoljskih misijah in prispevala k napredku v tehnologiji pristajanja majhnih satelitov.

2.5 Raziskovalno vprašanje

Vedno večje zanimanje za raziskovanje in razvoj vesoljskih tehnologij nas spodbuja k iskanju inovativnih rešitev za izzive, s katerimi se srečujemo pri pristajanju raziskovalnih plovil. Analiza preteklih misij je pokazala, da nepravilno pristajanje pogosto povzroči omejeno funkcionalnost ali celo popolno odpoved naprav, kar lahko močno zmanjša učinkovitost misije. Zato smo si zastavili cilj razviti pristajalni sistem, ki se bo po pristanku samodejno aktiviral in stabiliziral plovilo v pokončen položaj, ne glede na orientacijo ob dotiku s površjem.

Zastavili smo si naslednje vprašanje:

"Kako lahko zasnujemo in izdelamo sistem za avtomatsko stabilizacijo satelita po pristanku, da zagotovimo njegovo optimalno delovanje?"

Z odgovorom na to raziskovalno vprašanje želimo preučiti različne mehanizme samodejne stabilizacije, razviti učinkovit model in ga testirati v okviru misije CaNSat. Naša rešitev bo vključevala inovativne

mehanizme, ki bodo omogočili, da se satelit po pristanku sam prilagodi in zagotovi optimalne pogoje za nadaljnje delovanje. Raziskali bomo delovanje različnih pristajalnih sistemov, analizirali njihove prednosti in pomanjkljivosti ter preizkusili praktične rešitve, ki bi izboljšale stabilnost in funkcionalnost satelitov na nizkih orbitah in planetarnih površinah.

2.6 Metode raziskovanja

Pri raziskavi smo uporabljali več metod, ki so nam omogočile pridobitev natančnih podatkov in razvoj učinkovitega pristajalnega sistema. Primarno smo se oprli na empirično metodo raziskovanja, saj smo za testiranje razvili delujoč model pristajalnega sistema, ki smo ga podvrgli različnim preizkusom. S pomočjo eksperimentov smo simulirali različne scenarije pristanka ter analizirali učinkovitost stabilizacijskega mehanizma.

Poleg tega smo uporabili metodo raziskovanja literature, s katero smo preučili dosedanje primere neuspešnih in uspešnih pristajalnih sistemov pri vesoljskih misijah. Analiza že obstoječih rešitev nam je omogočila, da smo identificirali ključne izzive in poiskali najboljše pristope za izboljšavo.

Uporabili smo tudi komparativno metodo, s katero smo primerjali različne stabilizacijske mehanizme in njihove vplive na končno delovanje satelita po pristanku. S tem smo pridobili vpogled v prednosti in slabosti posameznih sistemov ter izbrali najprimernejšo zasnovo za našo misijo CaNSat.

Nazadnje smo uporabili eksperimentalno metodo, saj smo naš sistem testirali v nadzorovanem okolju in beležili podatke o njegovem odzivu. Na podlagi teh rezultatov smo lahko izvedli izboljšave in optimizirali delovanje stabilizacijskega mehanizma, da bi zagotovili njegovo zanesljivost pri dejanski uporabi.

3 Potek raziskave

3.1 CanSat

CanSat je majhen satelit v obliki pločevinke, ki je zasnovan za simulacijo delovanja pravih satelitov, vendar na znatno nižjih višinah. Njegova glavna naloga je omogočiti eksperimentiranje in testiranje vesoljskih tehnologij v realnih pogojih, hkrati pa služiti kot izobraževalno orodje za študente, inženirje in raziskovalce. CanSat je zasnovan tako, da se lahko izstreli na višino **od 300 do 1000 metrov**, kjer med spuščanjem zbira in prenaša podatke, prav tako pa mora preživeti pristanek ter nadaljevati delovanje.

Čeprav je CanSat v primerjavi s pravimi sateliti **majhen in cenovno dostopen**, vseeno vsebuje vse ključne sisteme, ki jih imajo sateliti v orbiti, kot so **elektronika za zbiranje podatkov, komunikacijski modul, napajanje, mehanski sistem in programska oprema**. Običajno je velikosti pločevinke (premer 66 mm, višina 115 mm) in tehta **od 300 do 350 gramov**, kar pomeni, da je njegova masa in prostorska omejitev ključna pri načrtovanju vseh vgrajenih komponent.

V praktičnih aplikacijah se CanSat uporablja za širok spekter eksperimentov. **Lahko meri podatke o atmosferi, kot so temperatura, tlak, vlažnost in koncentracija plinov, spremlja svojo višino in hitrost s pomočjo GPS modula, meri pospeške in rotacije s pomočjo IMU senzorjev, ali celo testira nove eksperimentalne tehnologije, kot so algoritmi za vodenje, stabilizacija po pristanku in kompresija podatkov.**

CanSat mora biti zasnovan tako, da prenese pogoje izstrelitve, ki vključujejo **močne vibracije, nenadne spremembe temperature in hitrosti, ter aerodinamične sile** med padanjem. Ko je enkrat v zraku, mora sistem delovati neodvisno, kar pomeni, da so vse ključne funkcije avtomatizirane. Pomemben element vsake misije je **komunikacija**, saj mora CanSat podatke v realnem času pošiljati na zemeljsko postajo, kjer se ti podatki shranijo in analizirajo.

Poseben izziv CanSata je **pristanek**, saj lahko nepravilna orientacija povzroči izgubo komunikacije ali okvaro senzorjev. Večina CanSatov uporablja **padalo**, ki zmanjša hitrost padanja, a se ob pristanku pogosto prevrne. Da bi rešili ta problem, smo razvili **avtomatski stabilizacijski sistem**, ki CanSatu omogoča, da se po pristanku samodejno postavi v pokončno lego in nadaljuje z delovanjem. S tem izboljšujemo zanesljivost sistema in omogočamo njegovo uporabo v realnih raziskovalnih aplikacijah.

S svojo preprostostjo in vsestranskostjo je CanSat odlično orodje za učenje in razvoj vesoljskih tehnologij, hkrati pa omogoča testiranje inovativnih rešitev, ki bi jih bilo mogoče uporabiti tudi v večjih satelitskih misijah.

3.2 Komponente v CanSatu

Za pravilno delovanje mora CanSat vsebovati več ključnih komponent, ki omogočajo zbiranje podatkov, komunikacijo in napajanje. Vsaka komponenta ima ključno vlogo pri zagotavljanju nemotenega delovanja sistema, saj mora satelit v kratkem času opraviti številne naloge, od zbiranja podatkov med letom do varnega pristanka.

Osrednji računalnik CanSata je mikrokrmilnik, ki nadzoruje vse funkcije satelita. Skrbi za zbiranje podatkov iz senzorjev, obdelavo informacij, upravljanje napajanja in komunikacijo z zemeljsko postajo. Mikrokrmilnik mora biti dovolj zmogljiv, da lahko hitro in učinkovito obdeluje podatke ter se odziva na spremembe v okolju.

Napajalni sistem je bistvenega pomena, saj zagotavlja energijo za delovanje vseh elektronskih komponent. CanSat uporablja litij-polimerno (Li-Po) baterijo, ki omogoča stabilno napajanje ob nizki masi in majhnih dimenzijah. Ker misija traja le nekaj minut, je ključno, da baterija zagotavlja dovolj energije za neprekinjeno delovanje vseh podsistemov, vključno s senzorji, komunikacijskim modulom in stabilizacijskim mehanizmom.

Pomemben del sistema so senzorji, ki zbirajo podatke o okolju in gibanju CanSata. Med vzletom in spustom merijo različne parametre, kot so temperatura, atmosferski tlak, vlažnost in višina. Poleg okoljskih podatkov so vgrajeni tudi inercialni merilni senzorji, ki zaznavajo pospeške, rotacijo in nagib satelita.

Komunikacijski modul omogoča prenos podatkov na zemeljsko postajo, kjer jih operaterji spremljajo in analizirajo v realnem času. Uporablja radijsko povezavo, ki mora biti dovolj zmogljiva za prenos podatkov na velike razdalje, obenem pa dovolj energetske učinkovita, da ne preobremeni napajalnega sistema. Komunikacija med CanSatom in zemeljsko postajo je ključna za uspešno izvedbo misije, saj omogoča spremljanje statusa satelita, sprejemanje podatkov in pošiljanje ukazov v primeru morebitnih nepravilnosti.

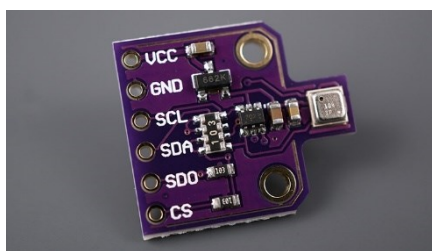
Shranjevalni medij, v tem primeru SD kartica, zagotavlja varnostno kopijo podatkov, če bi prišlo do prekinitve komunikacije med letom. Ker je prenos podatkov prek radijske povezave lahko moten zaradi atmosferskih razmer ali drugih dejavnikov, je ključno, da CanSat vse podatke zapisuje tudi lokalno. To omogoča, da se po uspešnem pristanku zbrani podatki prenesejo in analizirajo, ne glede na morebitne težave pri komunikaciji.

Ohišje in mehanske komponente služijo kot zaščita elektronike in zagotavljajo aerodinamično stabilnost med letom. Izdelano je iz lahkih, a vzdržljivih materialov, ki prenesejo mehanske obremenitve pri izstrelitvi, spustu in pristanku. Oblika ohišja je zasnovana tako, da omogoča optimalen nadzor nad spustom, obenem pa zaščiti občutljive elektronske komponente pred poškodbami. CanSat mora biti

dovolj trpežen, da prenese vibracije ob izstrelitvi ter udarce ob pristanku, hkrati pa dovolj lahek, da omogoča učinkovito delovanje v omejenem prostoru in z omejeno energijsko zalogo.

3.2.1 BME680

Eden izmed ključnih senzorjev v našem CanSatu je **BME680**, ki meri temperaturo, tlak in vlažnost zraka. Ta senzor omogoča natančno spremljanje okoljskih pogojev med letom, kar nam pomaga analizirati, kako atmosferski dejavniki vplivajo na delovanje elektronike in ostalih sistemov v satelitu. Z merjenjem tlaka lahko določimo višino CanSata, medtem ko sta temperatura in vlažnost pomembni za oceno vpliva okolja na delovanje baterij in drugih občutljivih komponent.



Slika 5 BME680

Viri: (<https://randomnerdtutorials.com/bme680-sensor-arduino-gas-temperature-humidity-pressure/>)

3.2.2 BNO055

Za natančno določanje položaja in gibanja satelita skrbi **BNO055**, napreden 9-osni inercialni merilni enoti (IMU), ki vključuje akcelerator, žiroskop in magnetometer. Ta senzor omogoča merjenje pospeškov, rotacijskih gibanj in orientacije, kar zagotavlja stabilnost CanSata med letom in pristankom. Z njim lahko spremljamo nagnjenost satelita ter določimo, ali se po pristanku nahaja v pravilnem položaju. Če se CanSat znajde v nepravilni orientaciji, bodo podatki iz BNO055 omogočili aktivacijo stabilizacijskega sistema, ki bo satelit postavil v pokončno lego.



Slika 6 - BNO055

Viri: (<https://www.amazon.com/Adafruit-Absolute-Orientation-Fusion-Breakout/dp/B017PEIGIG>)

3.2.3 APC220

Za komunikacijo med CanSatom in zemeljsko postajo skrbi **radijski modul APC220**, ki omogoča brezžični prenos podatkov v realnem času. Ta modul deluje na frekvenci 434,8 MHz in zagotavlja stabilno ter zanesljivo komunikacijo. Preko tega kanala se na zemljo prenašajo podatki, kot so višina,

CanSat – pristajalni sistem za lunarne pristajalne module

temperatura, orientacija in lokacija, kar omogoča operaterjem na zemeljski postaji sprotno spremljanje misije in oceno njenega uspeha.



Slika 7 - APC220

Viri: (<https://www.dfrobot.com/product-57.html>)

3.2.4 BN-180

Poleg osnovnih podatkov o okolju in orientaciji je pomembno tudi natančno sledenje lokaciji CanSata. Za to smo uporabili **GPS modul BN-180**, ki omogoča določanje geografskih koordinat, hitrosti in smeri gibanja. S tem senzorjem lahko natančno spremljamo pot CanSata, kar je pomembno tako za analizo misije kot tudi za iskanje satelita po pristanku. GPS nam omogoča, da v realnem času vemo, kje se nahaja CanSat, in nam pomaga pri njegovi morebitni rešitvi po koncu misije.

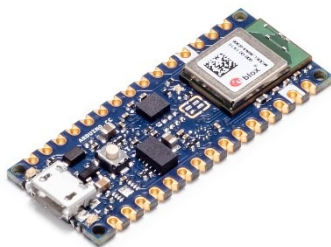


Slika 8 - BN-180

Viri: (<https://rogero-electronics.com/products/beitian-bn-180-gps-module-uart-ttl-dual-glonass-for-arduino-raspberry-pi-pixhawk-betaflight-aircraft-drone-flight-controller>)

3.2.5 Arduino Nano

Vse te senzorje in module nadzoruje **Arduino Nano**, ki služi kot osrednja enota za obdelavo podatkov in upravljanje sistema. Mikrokrmilnik povezuje vse komponente, zbira podatke iz senzorjev in jih posreduje na komunikacijski modul za prenos na zemeljsko postajo. Poleg tega nadzoruje delovanje stabilizacijskega sistema in skrbi za pravilno odzivanje na morebitne nepravilnosti v delovanju satelita. Zaradi svoje majhnosti in nizke porabe energije je Arduino Nano odlična izbira za CanSat, saj omogoča zmogljivo procesiranje podatkov ob minimalni porabi baterije.

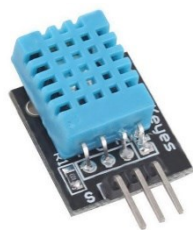


Slika 9 - Arduino Nano

Viri: (<https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-nano-33-ble>)

3.2.6 DHT11

Poleg senzorja BME680 za merjenje temperature in vlažnosti smo v CanSat vključili še **senzor DHT11**, ki služi kot dodatna varnostna redundanca. Njegova naloga je preverjanje temperaturnih sprememb in vlažnosti v notranjosti satelita, kar nam omogoča dodatno analizo pogojev, ki vplivajo na delovanje elektronskih komponent. Ker se lahko zunanji in notranji pogoji razlikujejo, bomo s pomočjo tega senzorja pridobili dodatne informacije o tem, kako dobro je zaščitena notranja elektronika pred vplivi okolja.



Slika 10 - DHT11

Viri: (<https://components101.com/sensors/dht11-temperature-sensor>)

3.2.7 SD kartični zapisovalnik

V primeru, da bi prišlo do motenj v komunikaciji ali izgube signala, smo CanSat opremili s **SD kartičnim zapisovalnikom**, ki omogoča shranjevanje podatkov na pomnilniško kartico. Vsi zbrani podatki iz senzorjev se poleg prenosa na zemeljsko postajo zapisujejo tudi na SD kartico, kar nam omogoča, da jih po misiji analiziramo in ocenimo njeno uspešnost. Ta komponenta zagotavlja varnostno kopiranje podatkov in omogoča nadaljnjo obdelavo tudi v primeru, da ne bi uspeli pridobiti vseh podatkov preko radijske povezave.



Slika 11 - SD - kartični zapisovalnik

Viri: (<https://www.az-delivery.de/en/products/copy-of-spi-reader-micro-speicherkartenmodul-fur-arduino>)

3.2.8 Stabilizacijski sistem

Ena najpomembnejših inovacij našega CanSata je **stabilizacijski sistem**, ki preprečuje prevrnitev satelita po pristanku. Za nadzor stabilizacijskih motorjev uporabljamo **gonilnik DRV8833**, ki omogoča natančno krmiljenje gibanja motorjev. Ti motorji so povezani s pristajalnimi nogicami, ki se aktivirajo ob pristanku in omogočijo, da se satelit sam postavi v pravilno orientacijo.

Za delovanje stabilizacijskega sistema skrbijo **tri 6V enosmerni motorji s prenosi**, ki mehansko premikajo pristajalne noge. Ko CanSat pristane, motorji aktivirajo stabilizacijski mehanizem, ki prilagodi nagib satelita in ga postavi v pokončen položaj. Ta sistem je ključnega pomena za zagotavljanje nadaljnje komunikacije in delovanja po pristanku, saj preprečuje, da bi se satelit prevrnil in s tem izgubil možnost prenosa podatkov ali pravilnega delovanja senzorjev.



Slika 12 - DRV8833

Viri: (<https://www.amazon.ca/DRV8833-Channel-H-Bridge-Overcurrent-Protection/dp/B07MNPQJDV>)



Slika 13 - 6V enosmerni motor s prenosi

Viri: (<https://www.dfrobot.com/product-1479.html>)

3.2.9 Ohišje

Ohišje CanSata je ključni element, ki zagotavlja zaščito notranjih komponent pred mehanskimi poškodbami, okoljskimi vplivi in vibracijami med celotno misijo. Izdelano je iz **ABS plastike**, ki je poznana po svoji trpežnosti, lahkotnosti in odpornosti na udarce. Ta material omogoča dobro zaščito pred zunanjimi dejavniki, kot so vlaga, prah in temperaturne spremembe, hkrati pa zagotavlja dovolj čvrstosti, da prenese morebitne obremenitve pri izstrelitvi in pristanku.

Konstrukcija ohišja je optimizirana tako, da nudi kar največjo zaščito elektroniki in mehanskim komponentam, ne da bi pri tem ovirala njihovo delovanje. Posebej je zasnovano tako, da omogoča **nemoteno delovanje senzorjev, anten in motorjev**, kar pomeni, da ne blokira signalov komunikacijskega modula in ne ovira gibanja stabilizacijskega sistema. Ohišje je oblikovano z natančnimi odprtini, ki omogočajo dostop do ključnih elementov, kot so senzorji in povezovalni priključki, hkrati pa zagotavljajo varno pritrditev padala in drugih zunanjih komponent.

Za dodatno povečanje odpornosti na mehanske obremenitve je notranjost ohišja ojačana s posebnim **notranjim »fillom«**, ki izboljšuje strukturno trdnost brez znatnega povečanja mase. Ta dodatek povečuje odpornost na udarce, kar je še posebej pomembno pri pristanku, saj zagotavlja, da CanSat ostane nepoškodovan tudi v primeru nepravilne orientacije ob dotiku s tlemi. Kombinacija ABS plastike in notranje ojačitve zagotavlja ravnovesje med vzdržljivostjo in lahkotnostjo, kar je ključno za optimalno delovanje CanSata med celotno misijo.

3.2.10 Padalo

Sistem za obnovitev CanSata temelji na uporabi padala, ki je zasnovano po principu padala, uporabljenega pri pristanku Mars Roverja. Njegova oblika omogoča optimalen pretok zraka, kar zagotavlja stabilnost naprave med padcem in omogoča kontrolirano hitrost pristajanja. Ključna funkcija padala je zmanjšanje hitrosti padanja na raven, ki omogoča varen pristanek brez tveganja poškodb občutljive elektronike in mehanskih komponent.

Padalo je pritrjeno na zgornji pokrov CanSata, kar omogoča enostaven dostop do sistema in po potrebi hitro zamenjavo. Takšna zasnova omogoča tudi prilagodljivost pri optimizaciji sistema za različne pogoje, saj lahko glede na specifične zahteve misije zamenjamo padalo z večjim ali manjšim modelom. Pri montaži je pomembno, da je padalo trdno in simetrično pritrjeno, saj lahko nepravilna pritrditev povzroči nestabilno padanje ali celo vrtenje satelita med spustom.

Pričakovana hitrost padanja CanSata ob aktivaciji padala je približno **6,67 m/s**, kar zagotavlja varen pristanek brez večjih mehanskih obremenitev. Na podlagi tega podatka smo izračunali, da bo CanSat v prostem padcu pred pristankom potreboval približno **150 sekund**, kar omogoča dovolj časa za zbiranje podatkov med spuščanjem in spremljanje atmosferskih pogojev. Učinkovitost padala je ključna za

uspeh misije, saj zagotavlja, da bo CanSat dosegel tla v stanju, primernem za nadaljnje delovanje in aktivacijo stabilizacijskega sistema.

3.3 Razporeditev komponent v CanSatu

Razporeditev komponent znotraj ohišja je strateško načrtovana, da se zagotovi optimalno delovanje celotnega sistema. Antena je nameščena na dnu ohišja, kar omogoča dobro pokritost signala in stabilen prenos podatkov med padcem, s čimer se izboljša komunikacija z zemeljsko postajo. Trije 6 V enosmerni motorji s prenosi so pozicionirani tako, da po pristanku razprejo stabilizacijske tačke, kar preprečuje prevrnitev naprave. Ti motorji so trdno pritrjeni na notranjo strukturo ohišja, kar jim omogoča nemoteno in učinkovito delovanje. Baterije so skrbno nameščene na dnu ohišja, da zagotovijo optimalno ravnotežje in podporo za preostale komponente, kar prispeva k celoviti stabilnosti sistema. Senzorji so nameščeni v središču ohišja, znotraj notranje strukture, oblikovane v obliki satovja, kar omogoča enostavno pritrditev in natančno merjenje okoljskih parametrov med spustom. Takšna postavitev komponent zagotavlja, da CanSat deluje z visoko učinkovitostjo in zanesljivostjo skozi celotno misijo.

3.4 Zemeljska postaja

Zemeljski segment našega CanSat poskusa predstavlja celovit sistem, ki skrbi za sprejem, obdelavo in shranjevanje podatkov ter omogoča učinkovito spremljanje celotnega poteka misije. Osrednji element tega segmenta je Raspberry Pi 5, ki deluje kot glavni računalnik in nadzoruje vse funkcije, povezane s sprejemom podatkov v realnem času, njihovim prikazom in generiranjem interaktivnih grafov s pomočjo platforme Grafana. Poleg tega Raspberry Pi uporablja umetno inteligenco za analizo prejetih podatkov ter zaznavanje morebitnih nepravilnosti, kar omogoča hitro identifikacijo in reševanje težav med misijo.

Za brezžični prenos podatkov med CanSatom in zemeljsko postajo uporabljamo APC220 radijski modul, ki je prilagojen z Yagi anteno. Ta antena zaradi svojega višjega ojačevalnega faktorja omogoča daljši doseg signala, zmanjšuje motnje in povečuje natančnost sprejema, kar je ključno pri eksperimentih z omejenim dometom in šibkimi signali. Prejeti podatki se nato shranjujejo v PostgreSQL podatkovno bazo, kar zagotavlja organizirano in trajno hranjenje vseh zbranih informacij, medtem ko se hkrati ustvarijo tudi TXT datoteke kot varnostne kopije za hiter dostop do surovih podatkov. Ta sistem shranjevanja omogoča podroben vpogled v celoten potek misije in je ključnega pomena pri reševanju morebitnih težav.

Ko CanSat prek radijske povezave pošilja podatke senzorjev na APC220 modul, jih Raspberry Pi obdeluje v realnem času in prikazuje trenutne vrednosti na spletni strani. S pomočjo Grafane so podatki prikazani v obliki interaktivnih grafov, ki omogočajo spremljanje trendov in analiziranje sprememb v realnem času. Uporaba umetne inteligence za analizo podatkov omogoča identifikacijo nenavadnih

nihanj ali prekinitve komunikacije, kar prispeva k pravočasnemu odzivanju in izboljšanju celotnega sistema. Spletna stran, ki jo gostuje Raspberry Pi, uporabnikom omogoča pregled vrednosti senzorjev, generirane grafe in analize z minimalnim zamikom, s čimer Raspberry Pi deluje kot "kopilot", ki nadzoruje celoten potek misije in zagotavlja hitro odkrivanje in odpravljanje morebitnih težav, podobno kot to počnejo prave satelitske postaje.



Slika 14 - Raspberry Pi 5

Viri: (<https://si.farnell.com/buy-raspberry-pi>)

3.5 Programski opis

Zasnova programske opreme za CanSat temelji na uporabi mikrokontrolerja Arduino Nano, ki služi kot centralna enota za povezovanje različnih senzorjev, kot so BNO055, DHT11, BN180 in BME680. Ob zagonu se programska oprema inicializira, pri čemer preveri delovanje vseh senzorjev in vzpostavi komunikacijo z radijskim modulom APC220. Če kateri izmed senzorjev ne deluje pravilno, se njegova vrednost nastavi na privzeto ali se ignorira, s čimer se zagotavlja stabilno in neprekinjeno delovanje celotnega sistema. Ko so vsi senzori aktivni, CanSat začne zbirati podatke, ki jih vsako sekundo obdeluje in pošilja prek APC220 modula na zemeljsko postajo.

Na zemeljski postaji, ki temelji na Raspberry Pi 5, se prejeta meritev podatkov shrani in vizualizira v realnem času. Raspberry Pi je opremljen s programsko opremo, ki omogoča sprejem podatkov, njihovo shranjevanje in generiranje interaktivnih grafov preko platforme Grafana. Poleg tega se uporablja personalizirana umetna inteligenca, ki analizira in interpretira zbrane meritve ter zaznava morebitne nepravilnosti. Spletna stran, ki jo gostuje Raspberry Pi, uporabnikom omogoča spremljanje trenutnih vrednosti senzorjev in grafično prikazovanje trendov, kar prispeva k boljšemu razumevanju poteka misije.

Programska oprema je zasnovana tako, da vključuje več ključnih faz: inicializacijo, med katero se preveri delovanje vseh senzorjev in vzpostavi komunikacija z APC220 modulom; fazo merjenja in obdelave, kjer se vsako sekundo zbirajo podatki o temperaturi, tlaku, višini, pospešku in orientaciji; fazo prenosa podatkov, ko se informacije sproti pošiljajo na zemeljsko postajo; ter fazo shranjevanja in vizualizacije, kjer se prejeta meritev shrani in prikaže prek spletnih strani in Grafane. Po pristanku CanSat še naprej zbira podatke, dokler ni izklopljen ali dokler se ne izgubi povezava, pri čemer

CanSat – pristajalni sistem za lunarne pristajalne module

posamezen zapis vsebuje približno 50 do 100 bajtov, kar za deset minut delovanja predstavlja skupno količino podatkov med 30 in 60 kilobajti.

Pri razvoju programske opreme uporabljamo različna razvojna okolja in programske jezike. Na Arduino Nano se programira v C++ z uporabo Arduino IDE, medtem ko se na Raspberry Pi 5 za obdelavo podatkov in prikaz na spletnih straneh uporablja Python. Za spletno vizualizacijo podatkov se kombinirajo HTML, CSS in JavaScript skupaj s platformo Grafana in personaliziranim AI modulom, kar omogoča interaktivno spremljanje in analizo misije v realnem času.

4 Rezultati raziskovanja

V okviru projekta CanSat smo razvijali strojno in programsko opremo “pristajalnih nog”, ki bi omogočala postavitev sonde v pokončno lego po pristanku le te.

V procesu raziskovanja in razvoja CanSata smo uspešno dosegli vse zastavljene cilje in dokazali, da je sistem za samodejno stabilizacijo po pristanku izvedljiv in učinkovit. Razvili smo funkcionalen satelit, ki lahko zaznava okoljske podatke, jih obdeluje in brezžično prenaša na zemeljsko postajo, hkrati pa zagotavlja stabilno orientacijo po pristanku. Skozi vrsto testiranja smo analizirali delovanje vseh komponent in preverili njihovo medsebojno usklajenost, kar nam je omogočilo celovit vpogled v funkcionalnost sistema ter njegovo zanesljivost v različnih pogojih.

Med testiranjem je sistem za zajem podatkov deloval brezhibno, saj so vsi senzorji pravilno zaznavali podatke in jih v realnem času pošiljali na zemeljsko postajo. Meritve temperature, tlaka, vlažnosti, pospeška in orientacije so bile skladne s pričakovanimi vrednostmi, pri čemer so se odstopanja gibala znotraj predvidenih toleranc. Radijski modul APC220 je omogočil stabilno in nemoteno komunikacijo med CanSatom in zemeljsko postajo na razdalji do 1 km, pri čemer je bila kakovost prenosa podatkov konstantna, brez znatnih izgub ali zakasnitev.

Zemeljska postaja, ki temelji na Raspberry Pi 5, je uspešno sprejemala podatke in jih shranjevala v podatkovno bazo PostgreSQL ter jih v realnem času vizualizirala v Grafani. Interaktivni grafi so omogočali natančno analizo meritev, hkrati pa je umetna inteligenca v sistemu zaznavala nepravilnosti ter signalizirala morebitne odklone od pričakovanih vrednosti. Celotna veriga prenosa podatkov – od zajema na CanSatu do prikaza na spletni platformi – je delovala stabilno in učinkovito, kar potrjuje visoko stopnjo optimizacije našega sistema.

Posebno pozornost smo namenili sistemu stabilizacije po pristanku, ki je ključni inovativni element naše raziskave. Po izvedbi simuliranih pristankov je sistem motoriziranih nogic v vseh primerih uspešno izvedel postavitev CanSata v pokončno lego. Žiroskopski senzorji so natančno zaznali nagib satelita in sprožili prilagodljive mehanizme, ki so kompenzirali morebitna odstopanja od želenega položaja. Pristajalni sistem se je izkazal za zanesljivega v vseh scenarijih, ne glede na začetno orientacijo CanSata po dotiku s površino.

4.1 Pomanjkljivosti raziskave

Ena ključnih pomanjkljivosti naše raziskave je, da do tega trenutka še nismo izvedli testiranja v realnih pogojih, kjer bi CanSat spustili z višine 1000 metrov in ocenili njegovo delovanje pri višjih hitrostih padanja in večjih mehanskih obremenitvah. Čeprav so rezultati laboratorijskih testov in simuliranih pristankov pokazali visoko zanesljivost vseh sistemov, bi bilo potrebno izvesti dodatna preizkušanja v

realnih razmerah, da bi lahko dokončno potrdili odpornost stabilizacijskega mehanizma in robustnost celotnega sistema.

Pri višjih višinah bi se CanSat soočal s večjimi silami pospeška, močnejšimi vibracijami in nenadnimi spremembami zračnega tlaka, kar bi lahko vplivalo na njegovo delovanje. Čeprav smo pri oblikovanju ohišja in mehanskih komponent upoštevali te dejavnike, je možno, da bi nekatere komponente pod večjimi obremenitvami doživele neželene deformacije ali mehanske odpovedi.

Druga pomembna pomanjkljivost neizvedenega testiranja v realnih pogojih je možna nepredvidena obnašanja radijske komunikacije med CanSatom in zemeljsko postajo. Medtem ko je bil prenos podatkov v laboratorijskih testih stabilen, bi lahko višja začetna hitrost padanja ali spremembe v atmosferskih pogojih vplivale na kakovost signala. To bi lahko povzročilo časovne zamike pri prenosu podatkov ali celo začasne izgube signala, kar bi bilo treba upoštevati pri nadaljnjih izboljšavah sistema.

Kljub tem pomanjkljivostim so teoretične analize in do zdaj izvedeni eksperimenti pokazali, da bi se sistem moral obnašati skladno z našimi pričakovanji tudi pri večjih višinah in hitrostih padanja. Vsi ključni elementi so bili uspešno testirani v simuliranih pogojih, kar daje močno osnovo za nadaljnja testiranja in optimizacijo. Da bi lahko dokončno potrdili zanesljivost celotnega sistema, bi bilo smiselno v prihodnje izvesti preizkus v realnem scenariju, kjer bi CanSat doživel enake pogoje, kot jih imajo pravi sateliti med spustom in pristankom.

4.2 Uporaba sistema v realnem svetu

Razvoj našega pristajalnega sistema s stabilizacijskimi nogicami ponuja potencialno širšo uporabo v vesoljski industriji, zlasti pri pristajalnih modulih, raziskovalnih sondah in celo raketnih sistemih, kjer je stabilnost po pristanku ključnega pomena. Trenutne metode pristajanja, kot so padala, retro rakete in napihljive zračne blazine, so učinkovite pri upočasnjevanju spusta in zmanjševanju sile ob dotiku s površjem, vendar ne zagotavljajo pravilne končne orientacije plovila. V številnih primerih lahko plovilo pristane pod kotom ali celo v ležečem položaju, kar lahko oteži nadaljnje delovanje instrumentov ali popolnoma onemogoči misijo.

Naš sistem motoriziranih stabilizacijskih nogic bi lahko predstavljal ključni zadnji korak v postopku pristajanja, ki bi avtomatsko zagotovil, da se plovilo po dotiku s površjem samodejno postavi v pokončno lego. Ta mehanizem bi odpravil potrebo po kompleksnih sistemih za samoniveliranje ali dragih rešitvah, kot so dodatni motorji za premik plovila po površini. Z enostavnim, a učinkovitim stabilizacijskim sistemom bi se povečala zanesljivost pristajalnih modulov, saj bi bila njihova postavitev na tleh predvidljiva in nadzorovana.

Tak sistem bi bil še posebej koristen pri pristajanju na neenakomernih ali težko dostopnih terenih, kot so lunarna površina, Mars in drugi planeti ali lune s trdim in skalnatim površjem. Zmanjšanje tveganja

za prevrnitev bi omogočilo varnejše raziskovalne misije in povečalo možnosti za dolgoročno delovanje pristajalnih sond. Poleg tega bi uporaba stabilizacijskega mehanizma lahko znižala stroške misij, saj bi inženirji lahko zmanjšali potrebo po dodatnih zaščitnih elementih ali zapletenih pristajalnih strategijah, ki bi poskušale zagotavljati idealen kot pristanka.

Poleg uporabe pri raziskovalnih sondah in modulih bi stabilizacijski sistem lahko imel vlogo tudi pri ponovni uporabi raketnih sistemov. Trenutno se ponovno uporabljive rakete, kot so SpaceX-ove Falcon 9, zanašajo na pristajalne noge, ki absorbirajo silo pristanka, vendar ne zagotavljajo dodatne stabilizacije po dotiku. Implementacija mehanizma, ki bi omogočil dodatno poravnavo rakete po pristanku, bi lahko izboljšala njeno stabilnost na različnih vrstah površin, kar bi zmanjšalo tveganje za prevrnitev in povečalo varnost ponovne uporabe.

Zaradi teh prednosti predstavlja naš pristajalni sistem pomembno inovacijo, ki bi lahko igrala ključno vlogo pri prihodnjih vesoljskih misijah. Njegova modularnost in enostavna zasnova omogočata prilagoditev za različne vrste plovil, od majhnih raziskovalnih sond do večjih modulov in raket. Nadaljnji razvoj in testiranja v realnih pogojih bi lahko potrdili njegovo učinkovitost v zahtevnih vesoljskih okoljih, s čimer bi prispeval k varnejšemu, učinkovitejšemu in cenejšemu pristajanju vesoljskih plovil v prihodnosti.

4.3 Ugotovitev raziskave

Na naše raziskovalno vprašanje:

"Kako lahko zasnujemo in izdelamo sistem za avtomatsko stabilizacijo sate lita po pristanku, da zagotovimo njegovo optimalno delovanje?"

lahko odgovorimo, da smo z razvojem in testiranjem inovativnega stabilizacijskega sistema s pomočjo motoriziranih pristajalnih nogic dokazali, da je takšen pristop izvedljiv, učinkovit in zanesljiv. Z integracijo žiroskopa, mikrokrmilnika in natančnih motornih aktuatorjev smo omogočili avtomatsko zaznavanje nagiba satelita po pristanku in ustrezno prilagoditev njegove orientacije, ne glede na začetni položaj po dotiku s površino.

Rezultati testiranj so pokazali, da sistem stabilizacijskih nogic z visoko stopnjo natančnosti zazna odstopanja od pokončnega položaja ter s preišljenim aktiviranjem mehanskih komponent izvede korekcijo, s čimer se satelit hitro in učinkovito postavi v stabilno lego. To omogoča njegovo nadaljnje nemoteno delovanje, neprekinjeno komunikacijo z zemeljsko postajo ter zbiranje in obdelavo podatkov v optimalnih pogojih.

Zasnova takšnega sistema se je izkazala kot praktična rešitev za izboljšanje zanesljivosti pristajanja majhnih satelitov in drugih vesoljskih plovil. Na podlagi izvedene raziskave lahko trdimo, da bi lahko podobno tehnologijo uporabili tudi pri večjih misijah, kjer je stabilnost plovila po pristanku ključnega pomena. Naš sistem tako predstavlja pomemben korak k razvoju bolj robustnih, energetsko učinkovitih

in zanesljivih pristajalnih mehanizmov, ki bi lahko imeli široko uporabno vrednost v prihodnjih vesoljskih odpravah.

5 Zaključek

Raziskava razvoja CanSata s sistemom za avtomatsko stabilizacijo po pristanku predstavlja pomemben korak v smeri izboljšanja pristajalnih tehnologij za manjše satelite in potencialno tudi za večje vesoljske misije. V okviru projekta smo zasnovali, izdelali in testirali satelit, ki je sposoben samodejno prepoznati svojo orientacijo po pristanku ter z aktivacijo pristajalnih nogic zagotoviti pravilno pokončno lego. S tem smo odpravili ključno pomanjkljivost tradicionalnih sistemov, kjer nepravilna orientacija po pristanku lahko pomeni izgubo funkcionalnosti satelita.

V procesu testiranja smo uspešno preizkusili delovanje senzorskega sklopa, radijske komunikacije, obdelave podatkov na zemeljski postaji ter delovanje stabilizacijskega mehanizma. Rezultati so pokazali, da sistem zanesljivo zaznava nagib satelita, sproži motorje pristajalnih nogic in v vseh simuliranih scenarijih zagotovi pokončno orientacijo po pristanku. Vsi pridobljeni podatki so bili uspešno shranjeni na zemeljski postaji in vizualizirani s pomočjo Grafane, kar potrjuje učinkovitost celotnega sistema.

Kljub temu, da smo vse funkcionalnosti uspešno potrdili v nadzorovanih testnih pogojih, še nismo izvedli testiranja v realnem scenariju, kjer bi CanSat spustili z višine 1000 metrov. Takšen preizkus bi omogočil celovito validacijo sistema pri dejanskih pristajalnih hitrostih in mehanskih obremenitvah, kar bi dalo še bolj zanesljive podatke o robustnosti stabilizacijskega mehanizma.

Naša inovacija ni uporabna zgolj pri CanSatu, ampak bi lahko imela širše implikacije v vesoljski industriji, še posebej pri pristajalnih sistemih za sonde in raziskovalna plovila. Trenutne metode pristajanja se osredotočajo na zmanjševanje hitrosti s pomočjo padal, retro raket ali napihljivih blažilnih sistemov, vendar ti ne zagotavljajo pravilne končne orientacije po dotiku s površino. Naš sistem stabilizacijskih nogic bi lahko deloval kot zadnji korak v postopku pristajanja, kjer bi po zaustavitvi plovila aktivacija nogic zagotovila njegovo pokončno lego. To bi lahko zmanjšalo potrebo po kompleksnih pristajalnih strategijah in povečalo zanesljivost postavitve raziskovalnih modulov na Luni, Marsu ali drugih nebesnih telesih.

Raziskava je potrdila, da je razvoj takšnega sistema mogoč, izvedljiv in učinkovit. V prihodnje bi bilo smiselno izvesti dodatna testiranja v realnih pogojih ter preučiti možnosti njegove uporabe pri večjih vesoljskih misijah. Če bi se tovrstna tehnologija uveljavila, bi lahko pomembno prispevala k razvoju naprednejših, energetsko učinkovitejših in zanesljivejših metod pristajanja, kar bi imelo velik vpliv na prihodnost raziskovanja vesolja.

6 Viri in literatura

- [1] NASA, "**Mars Pathfinder Mission**", citirano marec 2024 iz, (<https://science.nasa.gov/mission/mars-pathfinder/>)
- [2] Lockheed Martin, "**AeroShell in Space Applications**", citirano marec 2024 iz, (<https://www.lockheedmartin.com/en-us/capabilities/space/aeroshell-space.html>)
- [3] Nehru K., "**The Crucial Role of Parachutes in Aerospace**", LinkedIn, citirano marec 2024 iz, (<https://www.linkedin.com/pulse/crucial-role-parachutes-aerospace-nehru-k-b9yjf>)
- [4] Acta Astronautica, "**Inflatable Airbag Landing Systems for Planetary Exploration**", ScienceDirect, citirano marec 2024 iz, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0094576521005749>)
- [5] Acta Astronautica, "**The Role of Retro Rockets in Precision Soft Landings**", ScienceDirect, citirano marec 2024 iz, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042124000708#sec1>)
- [6] CBS News, "**Moon Lander Tipped Over on Its Side During Touchdown**", citirano marec 2024 iz, (<https://www.cbsnews.com/news/moon-lander-tipped-over-on-its-side-during-touchdown/>)
- [7] AP News, "**Odysseus Moon Landing by Private Company Faces Challenges**", citirano marec 2024 iz, (<https://apnews.com/article/moon-landing-private-odysseus-nasa-14dfdc76176f9f7a6a68a099c98bbbb9>)
- [8] USA Today, "**Odysseus Moon Lander Tipped Over: What Went Wrong?**", citirano marec 2024 iz, (<https://eu.usatoday.com/story/news/nation/2024/02/24/odysseus-moon-lander-tipped-over/72725631007/>)
- [9] NPR, "**Odysseus Moon Lander Will Cease Working After Sideways Landing**", citirano marec 2024 iz, (<https://www.npr.org/2024/02/27/1234111216/odysseus-moon-lander-will-cess-working-after-sideways-landing>)