

FS | UNIVERZA V LJUBLJANI
Fakulteta za strojništvo

ŠTeKam

Študentska tehniška konferenca

Fakulteta za strojništvo
Ljubljana, 5. 9. 2024

Naslov dela: 10. študentska tehniška konferenca ŠTeKam, zbornik del

Organizator: Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani

Uredniki: Tomaž Berlec
Miha Brojan
Boštjan Drobnič

Recenzenti: Miha Brojan, Gregor Čepon, Mira Delavec Touhami, Irena Drevenšek Olenik, Boštjan Drobnič, Jana Faganeli Pucer, Jože Guna, Urška Haule Feguš, Jernej Hribar, David Koren, Marijan Leban, Mina Ličen, Marko Matkovič, Janez Mlinar, Klementina Možina, Krištof Oštir, Niko Ottowitz, Mojca Pavlin, Miha Pogačar, Primož Poredoš, Darija Skubic, Janko Slavič, Lidija Slemenik Perše, Leon Stefanija, Hotimir Tivadar

Naslovnica: Boštjan Drobnič

Prelom strani: Miha Brojan

Seznami: Tomaž Berlec

Založnik: Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani
Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana

ISBN 978-961-7187-10-6

9789617187106

Naklada: Elektronski vir, UBS ključ, 50 izvodov

Fakulteta za strojništvo
Ljubljana, 5. 9. 2024

CIP - Kataložni zapis o publikaciji
Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

KAZALO

Eldina Agović, Tinkara Balantič, Sara Breznikar, Urška Judež, Mina Ličen **VPLIV SPOLA NA IZPOLNJEVANJE DAVČNIH PREDPISOV**	1 - 8
Jaka Bizjak **BIVALENTNO DELOVANJE TOPLOTNE ČRPALKE V NOVEM PET-TARIFNEM SISTEMU OBRAČUNAVANJA OMREŽNINE**	9 - 16
Hana Brce, Jože Guna **NAČRTOVANJE MOBILNE APLIKACIJE ZA PREGLEDOVANJE FINANC**	17 - 24
Mija Brojan **VPLIV TLAKA POLNJENJA IN NELINEARNOSTI ODZIVA MATERIALA NA ODBOJ ŽOGE**	25 - 32
Marcel Čarman **NA PODATKIH HITRE KAMERE TEMELJEČA PODATKOVNA IDENTIFIKACIJA MEHANSKIH LASTNOSTI**	33 - 40
Lovrenc Cink, Bine Grilc, Vita Pintar, Nik Zlatič **IDINA ZGODBA: KAJ JE PRIVEDLO DO ZLOČINOV IN KAJ JE PRINESLO DOGAJANJE PO DRUGI SVETOVNI VOJNI NA NAŠIH TLEH**	41 - 48
Nejc Golob, Boštjan Drobnič **ANALITIČNI MODEL ZA PRERAČUN PROIZVODNJE PARE Z ZBIRANJEM SONČNEGA SEVANJA**	49 - 56
Tomaž Jurkovič, Miha Brojan **DEFORMACIJA ELASTIČNEGA NOSILCA V NEHOMOGENEM MAGNETNEM POLJU**	57 - 64
Klara Kadunc, Ana Pirc **SPODBUJANJE GOVORNO-JEZIKOVNEGA RAZVOJA OTROK PRISELJENCEV V VRTCU**	65 - 71
Nejc Pavlovič, Nejc Karo Lindič **PROBLEMATIKA VEČNIH KEMIKALIJ PFAS V PAPIRNATIH SLAMICAH**	72 - 79
Jacopo Komic, Enej Istenič, Miha Brojan **RAČUNALNIŠKA SIMULACIJA DOVAJANJA UČINKOVINE ZA KEMOTERAPIJO PREK TIKSOTROPNEGA MEDIJA**	80 - 87
David Lackovič **3-OSNI PARALELNI MANIPULATOR**	88 - 94
Matej Lajevec, Sašo Medved, Ciril Arkar, Primož Poredoš **IZBOLJŠANJE DELOVANJA NAPRAVE ZA PRIDOBIVANJA VODE IZ ATMOSFERE S KOMPOZITNIMI HIGROSKOPSKIMI SREDSTVI NA OSNOVI OPTIČNE KONCENTRACIJE SONČNE ENERGIJ**	95 - 102
David Lajevec, Maja Vidmar **EVALUACIJA MODELA OPENL3-SVM ZA KLASIFIKACIJO GLASOVNIH MOTENJ**	103 - 110
Tijana Leban **MOŽNOSTI ANALIZE ZAVOJEV PRI ALPSKEM SMUČANJU S CENOVNO UGODNIMI AHRS IMU SENZORJI**	111 - 118
Lovro Lipovec **IZRIS TRAJEKTORIJE ROBOTA PODJETJA YASKAWA Z UPORABO INERCIJSKIH MIKRO-ELEKTRO-MEHANSKIH POSPEŠKOMEROV**	119 - 126
Tereza Lombar, Mira Delavec Touhami **TUAREŠKI NOMADSKI NAČIN ŽIVLJENJA V PRAVNEM SISTEMU DRŽAV SEVERNE AFRIKE**	127 - 134

Matej Markuža, Miha Pogačar, Gregor Čepon **RAZISKAVA PRIMERNOSTI ULTRAZVOČNEGA RESONANČNEGA PIEZOELEKTRIČNEGA AKTUATORJA ZA IMPULZNO VZBUJANJE V STRUKTURNI DINAMIKI**	135 - 142
Luka Miličić Eržen, Lin Livrin, Ajda Kajdiž, Luka Dovžan Kukič **OCENA VOZNIH KARAKTERISTIK MOTOCIKLA**	143 - 150
Klara Mlakar **RAZŠIRJENE TEHNIKE AKUSTIČNEGA IGRANJA KLAVIRJA: OSNOVE VARNE PREPARACIJE**	151 - 158
Marjeta Nahtigal, Eva Podgornik, Maja Vidmar **GLAS IN GOVOR PRI STAROSTNIKIH**	159 - 166
Hana Omahen **UPORABA METODE GUNNAR FARNEBÄCK OPTIČNEGA TOKA ZA IDENTIFIKACIJO POMIKOV V MEHANSKIH PROCESIH**	167 - 175
Anelija Perše, Frančeska Perše **DOLOČEVANJE MEHANSKIH LASTNOSTI POSAMEZNEGA VLAKNA KAMENE VOLNE**	176 - 183
Alen Planinšec **NA PIEZOELEKTRIČNEM ZAZNAVALU TEMELJEČA 3D NATISNJENA NAPRAVA ZA URAVNOTEŽENJE TOGIH ROTORJEV**	184 - 191
Matic Plut **3D TISK MAGNETNEGA INKREMENTALNEGA DAJALNIKA**	192 - 199
Maks Simčič **ALTERNATIVNA ODPRTOKODNA METODA ZA IZVEDBO VIBRACIJSKEGA TESTA LETAL Z UPORABO HITRE KAMERE**	200 - 208
Urh Štempihar-Jazbec, Enej Istenič, Miha Brojan **STABILNOST TAYLOR-COUETTEOVEGA TOKA MED FAZNO SPREMEMBO**	209 - 216
Ana Stevanovski **RAZISKAVA UČINKOVITOSTI PISAV ZA DISLEKTIKE**	217 - 224
Ema Stopar **FUNDAMENTALNE FIZIKALNE OMEJITVE KAPACITETE OPTIČNIH KOMUNIKACIJ NA OSNOVI OPTIČNIH VLAKEN**	225 - 232
Filip Umer, Miha Brojan **VELIKE DEFORMACIJE PRI UPOGIBU RIBIŠKE PALICE**	233 - 240
Tibor Volovšek **EFFECT OF RADIUS OF THE AXIS ON THE VIRTUAL WEIGHT LOSS OF A MAXWELL WHEEL**	241 - 248
Nejc Vrbovšek, David Koren **ODNOS MED KONSTRUKCIJSKO ZASNOVO IN ARHITEKTURNIM IZRAZOM PALIČNIH KONSTRUKCIJ**	249 - 256
Matej Zupan **UPORABA OPTIČNIH SATELITSKIH POSNETKOV ZA HITRO OCENO ŠKODE VETROLOMOV**	257 - 264
Martin Žust, Jernej Hribar **TRAJNOSTNI RAZVOJ INTERNETA STVARI: ANALIZA OGLJIČNEGA ODTISA LORAWAN OMREŽIJ NA PODROČJU SLOVENIJE**	265 - 272

VPLIV SPOLA NA IZPOLNJEVANJE DAVČNIH PREDPISOV

Eldina Agović, Tinkara Balantič, Sara Breznikar, Urška Judež, dr. Mina Ličen

Povzetek

Davčni sistem v Sloveniji je zasnovan tako, da omogoča stabilno in pregledno gospodarsko okolje, ki je pomembno tako za podjetja kot posameznike. Osredotoča se na zbiranje sredstev za financiranje javnih storitev in socialne zaščite in skrbi za ustvarjanje ugodnega okolja za poslovanje in zmanjševanje socialnih neenakosti. Kljub temu pa se sooča z izzivi, kot sta davčno izogibanje in davčna utaja, ki zmanjšujeta učinkovitost in pravičnost sistema. V raziskavi raziskujemo davčni sistemi v Sloveniji in vpliv spola na skladnost z davčnimi predpisi. Rezultati raziskave so razkrili pomembne razlike med spoloma pri izpolnjevanju davčnih obveznosti. Ženske so se izkazale za bolj nagnjene k spoštovanju davčnih predpisov v primerjavi z moškimi, kar se pripisuje njihovi večji etični odgovornosti in strahu pred negativnimi posledicami neizpolnjevanja obveznosti. Na drugi strani pa so moški pokazali večjo nagnjenost k davčnemu izogibanju in utaji, ker so v splošnem tudi bolj naklonjeni tveganju. Raziskava poudarja, da razlike med spoloma vplivajo na skladnost z davčnimi predpisi in preverja zastavljeni hipotezi, da so moški bolj nagnjeni k tveganju in posledično k davčnemu izogibanju ter utaji davkov kot ženske. Upoštevanje teh razlik bi lahko prispevalo k večji pravičnosti in preglednosti davčnega sistema, obenem pa bi lahko pomagalo zmanjšati pojav davčnega izogibanja in utaje ter izboljšalo učinkovitost sistema.

1 Uvod

Davčni sistem v Sloveniji igra pomembno vlogo pri zagotavljanju finančne stabilnosti in socialne zaščite v državi. Preko različnih davkov, ki jih ureja Finančna uprava Republike Slovenije (FURS), se financirajo javne storitve, podpirajo javne investicije in zagotavlja socialna zaščita. Slovenska davčna politika vključuje širok spekter davkov, med katerimi so davek na dodano vrednost (DDV), davek od dohodkov pravnih oseb (DDPO), dohodnina, davek na kapitalski dobiček, davek na nepremičnine, davek na dediščine in darila ter drugi. Vsak od teh davkov ima specifične značilnosti in vpliva na različne segmente družbe, kar omogoča bolj prilagodljivo in sorazmerno obdavčitev.

Kljub dobro zasnovanemu davčnemu sistemu obstajajo izzivi, ki vključujejo davčno izogibanje in davčno utajo. Davčno izogibanje, čeprav zakonito, pogosto prinaša vprašanja o pravičnosti in etiki. Po drugi strani pa davčna utaja, nezakonito izogibanje plačilu davkov, predstavlja resno kršitev, ki lahko povzroči pravne posledice in vpliva na zaupanje v davčne institucije.

Moški in ženske se pri izpolnjevanju davčnih obveznosti razlikujejo v svojih pristopih in vedenju, kar lahko vpliva na učinkovitost davčnega sistema in pravičnost obdavčitve. V naši raziskavi smo postavili dve hipotezi: (1) moški so bolj naklonjeni k davčni utaji kot ženske, in (2) moški so bolj naklonjeni k davčnemu izogibanju kot ženske, saj so ženske v splošnem vseeno malo bolj previdne kot moški, ko gre za kaznivo dejanje. Namen raziskave je preučiti ključne vidike slovenskega davčnega sistema, analizirati vpliv davčnega izogibanja in utaje ter ugotoviti vpliv spola na davčno skladnost. Razumevanje teh razlik igra pomembno vlogo pri oblikovanju politik, ki bodo zagotavljale enake pogoje za vse davkoplačevalce ter povečale davčno skladnost.

V nadaljevanju je podrobneje predstavljen davčni sistem in obdavčitve v sloveniji, ter rezultati raziskave, ki smo jo izvedli, da bi pridobili celovito sliko o izpolnjevanju davčnih predpisov

med moškimi in ženskami. Bolj specifično smo preučili vpliv davčnega izogibanja in davčne utaje ter razlike v davčni skladnosti med spoloma.

2 Davčni sistem in obdavčitve v Sloveniji

2.1 Davčna politika v Sloveniji

Slovenski davčni sistem je strukturiran tako, da zagotavlja stabilne in pregledne pogoje za podjetja in posameznike, kar prispeva k urejenemu gospodarskemu okolju. Osnova tega sistema so različni davki, ki jih ureja Finančna uprava Republike Slovenije (FURS) in so ključni za financiranje javnih storitev ter zagotavljanje socialne zaščite [7].
Eden izmed osrednjih davkov je davek na dodano vrednost (DDV), ki predstavlja temeljni posredni davek v Sloveniji in ga ureja Zakon o davku na dodano vrednost (ZDDV-1). DDV je obvezen za vse gospodarske subjekte in se obračunava pri prodaji blaga in storitev. Standardna stopnja znaša 22 %, vendar pa se za določene osnovne dobrine in storitve uporablja znižana stopnja 9,5 % oziroma posebna znižana stopnja 5 %, kar omogoča dostopnost teh izdelkov širšemu krogu potrošnikov. Poleg tega so transakcije, povezane z izvozom, oproščene plačila DDV, kar spodbuja slovenska podjetja k mednarodni trgovini in krepi njihovo konkurenčnost na globalnih trgih [4].
Davčni sistem vključuje tudi davek od dohodkov pravnih oseb (DDPO), ki se obračuna na dobiček podjetij. V slovenski zakonodaji ta davek ureja Zakon o davku od dohodkov pravnih oseb (ZDDPO-2). Ta davek je ključen za financiranje državnega proračuna in podpira javne investicije. Trenutna davčna stopnja znaša 22 %, kar slovenskim podjetjem omogoča konkurenčne pogoje na notranjem in mednarodnem trgu. Obračun DDPO poteka letno, podjetja pa morajo akontacije plačevati mesečno ali trimesečno, kar zagotavlja stabilen priliv sredstev v državno blagajno [5].
Za fizične osebe je pomemben davek dohodnina, ki se uporablja po progresivnem sistemu, kar pomeni, da se višina davčne stopnje povečuje z višino dohodka. Ta pristop omogoča pravičnejšo obdavčitev, saj posamezniki z višjimi dohodki prispevajo večji delež, kar pripomore k zmanjševanju socialne neenakosti. Dohodnina pokriva vse vrste osebnih dohodkov, vključno s plačami, pokojninami, dobički iz kapitala in drugimi viri dohodka, s čimer se zagotavlja celovitost obdavčitve. To področje med drugimi ureja tudi Zakon o dohodnini (ZDoh-2) [7].
Plačilo davka od dohodka iz dejavnosti, ki spada pod dohodnino, je obvezno za samostojne podjetnike (s.p.) in druge fizične osebe, ki opravljajo dejavnost, kot so odvetniki, notarji in novinarji. Višina davka od dohodka iz dejavnosti je odvisna od načina izračuna davčne osnove. Če se davčna osnova ugotavlja na podlagi dejanskih prihodkov in dejanskih odhodkov, znaša davčna stopnja med 16 in 50 %. V primeru, da se davčna osnova določi na podlagi dejanskih prihodkov in normiranih odhodkov, je davčna stopnja 20 % [9].
Posebno mesto v slovenskem davčnem sistemu ima tudi davek na kapitalski dobiček, ki se obračuna na dobiček, dosežen pri prodaji nepremičnin, delnic in drugih vrednostnih papirjev ter na prejete dividende in obresti iz tega naslova. Ta davek deluje po progresivnem sistemu, kar pomeni, da se z višanjem vrednosti dobička, viša tudi davčna stopnja. Tudi ta velja za podvrst dohodnine in se uveljavlja na podlagi iste zakonodaje [7].
Pomemben pa je tudi davek na nepremičnine, ki ga morajo plačati vsi lastniki nepremičnin v Sloveniji, na podlagi Zakona o davku na promet nepremičnin (ZDPN-2). Ta davek je pomemben vir prihodkov za lokalne skupnosti in se uporablja za financiranje infrastrukture ter drugih lokalnih storitev. Stopnje davka na nepremičnine se razlikujejo glede na vrsto

nepremičnine in njeno uporabo, kar omogoča prilagoditev davčne obremenitve glede na specifične okoliščine [7].
Davek na dediščine in darila, ki ga dodatno ureja Zakon o davku na dediščine in darila (ZDDD), obsega premoženje, ki ga fizična oseba prejme (kot dediščino ali darilo) od druge fizične ali pravne osebe, in ki se po zakonu o dohodnini ne šteje za dohodek. Pod premoženje sodijo nepremičnine, premičnine (vključno z vrednostnimi papirji in denarjem), premoženjske pravice in druge stvarne pravice. Davčni zavezanec, ki prejme premoženje kot darilo, za katerega se plačuje davek, mora prejem prijaviti na ustreznem obrazcu v roku 15 dni od nastanka davčne obveznosti pri pristojnem finančnem uradu [3].
Na splošno slovenski davčni sistem stremi k preglednosti in enostavnosti, kar omogoča učinkovito upravljanje davčnih obveznosti. S sodobno digitalno platformo eDavki imajo davčni zavezanci možnost enostavne oddaje davčnih napovedi in spremljanja svojih obveznosti [7].

2.2 Davčno izogibanje in davčna utaja

Davčno izogibanje je praksa, pri kateri osebe ali podjetja zakonito izkoriščajo obstoječe zakonske možnosti, da zmanjšajo svojo davčno obremenitev. To pomeni, da uporabljajo prednosti, ki jih ima davčna zakonodaja, da bi plačali čim manj davkov. Čeprav je davčno izogibanje zakonito, je pogosto sporno, saj lahko vključuje manipulacijo z zakoni na način, ki ga zakonodajalci niso predvideli ali nameravali [2].
Primer davčnega izogibanja so davčne oaze, kjer podjetja registrirajo svoje poslovanje v državah z ugodnejšo davčno politiko, nižjimi davčnimi stopnjami ali višjimi zakonskimi olajšavami in oprostitvami, ki so na voljo za določene vrste naložb ali poslovnih aktivnosti, kljub temu da večino svojega poslovanja opravljajo drugje [2]. Podjetja tudi zavestno preložijo izplačilo dividend ali drugih dohodkov v naslednje davčno leto, da bi zmanjšala svojo obdavčitev v tekočem letu [10]. Tovrstne prakse so sicer pravno dopustne, vendar pogosto vzbujajo etična vprašanja glede pravičnosti in enakosti v davčnem sistemu [2].
Na drugi strani pa davčna utaja vključuje nezakonito izogibanje plačilu davkov. Gre za namerno dejanje, pri katerem posamezniki ali podjetja prikrijejo ali napačno prikažejo svoj finančni položaj, da bi zmanjšali davčno obveznost. Davčna utaja je resno kaznivo dejanje, ki ima lahko za posledico hude pravne sankcije, vključno z denarnimi in zaporno kaznijo. Pogosto je povezana tudi z drugimi oblikami finančnih goljufij in kriminalnih dejavnosti. Medtem ko se davčno izogibanje dogaja znotraj meja zakona, davčna utaja te meje zavestno in namerno prestopi [8].
Primeri davčne utaje zajemajo lažno poročanje davčnih napovedi ali neplačilo davčnih obveznosti, kjer posamezniki ali podjetja v svojih davčnih napovedih navajajo napačne ali zavajajoče informacije, - ne prijavljajo celotnih dohodkov ali napihujejo stroške, - ali pa ne poravnajo svojih davčnih obveznosti. Prenos denarja v tujino je še ena metoda, kjer posamezniki ali podjetja prenašajo denar na mednarodne bančne račune, ki niso pod jurisdikcijo domačih davčnih organov, s čimer se izognejo prijavi tega denarja in plačilu davčnih obveznosti. Lažni dokumenti za uveljavljanje davčnih olajšav so prav tako način davčne utaje, kjer osebe predložijo ponarejene dokumente, da bi pridobile davčne olajšave, do katerih niso dejansko upravičene. Podkupovanje davčnih uradnikov predstavlja skrajno nezakonit način izogibanja davčnim obveznostim, kjer davkoplačevalci poskušajo vplivati na davčne uradnike, da bi zmanjšali ali izbrisali njihove davčne obveznosti v zameno za podkupnino. Takšne prakse ne le zmanjšujejo davčne prihodke pač pa tudi spodkopavajo zaupanje v pristojne davčne organe. Namenoma neprijavljena gotovina ali poslovanje “na črno” sta tudi pogosta metoda davčne utaje, pri kateri posamezniki ali podjetja namerno ne prijavijo dohodka, ki ga prejmejo v gotovini, saj gotovinske transakcije puščajo manj sledov

kot elektronska plačila ali bančni prenosi [10]. Najbolj znan primer je tudi davčni vrtiljak (ali "carouselska goljufija"), kjer podjetja izkoriščajo sistem DDV z lažnimi čezmejnimi transakcijami za pridobitev neupravičenih povračil DDV [2].
V nekaterih primerih lahko fizične osebe zaradi nevednosti, na primer, ne prijavijo prejetega premoženja, ki bi bilo obdavčeno kot dediščina ali darilo. Takšna nepravilnost lahko povzroči težave z davčnimi organi, vendar se razlikuje od namernih goljufij, saj gre za pomanjkanje znanja, ne pa za namerno izogibanje davkom. Medtem ko je izogibanje davkom tehnično zakonito in pogosto kompleksno, je davčna utaja kaznivo dejanje, ki temelji na goljufiji in prikrivanju resničnega finančnega stanja. Obe praksi kljub temu negativno vplivata na družbo, saj zmanjšujeta razpoložljiva sredstva za javne storitve in povečujeta breme za tiste, ki pošteno izpolnjujejo svoje obveznosti [8].

2.3 Vpliv spola na izpolnjevanje davčnih predpisov

Raziskovanje vpliva spola na davčno skladnost je vse bolj zanimivo področje v vedenjski ekonomiji in raziskavah s področja davčnega prava. Raziskave kažejo, da med spoloma obstajajo razlike v vedenju glede davčne skladnosti. Te razlike izhajajo iz razlik v nagnjenosti k tveganju, etičnim standardom, Moški so pogosto bolj nagnjeni k tveganju, medtem ko so ženske običajno bolj previdne, poslušne in poštene.
V raziskavi [6] so ugotovili, da so posamezniki, ki dosegajo višje ocene pri finančnem tveganju, bolj nagnjeni k temu, da davčno utajo obravnavajo kot sprejemljivo vedenje, še posebej v okoljih, kjer je zaznana možnost odkritja nizka. Raziskava [11] kaže, da so ženske bolj notranje motivirane za spoštovanje davčnih zakonov, kar pogosto povezujejo z večjo nenaklonjenostjo k tveganju in močnejšimi etičnimi standardi.
Raziskave iz držav z visokimi dohodki, kot sta Danska in Nova Zelandija, kažejo, da so moški bolj nagnjene k davčnim utajam in prijavljanju nižjih dohodkov kot ženske [1]. V državah z nizkimi in srednjimi dohodki davčne utaje med moškimi pogostejše, vendar pa primanjkuje podatkov o vedenju splošno glede izpolnjevanja davčnih predpisov v teh državah, kar otežuje celovito razumevanje vplivov spola na davčno skladnost [1].
Prizadevanja vlad za uveljavljanje davčne skladnosti imajo lahko različne učinke na ženske in moške. Če se na primer vladni ukrepi osredotočajo na preprečevanje goljufij pri davčnih olajšavah za otroke, to lahko bolj negativno vpliva na ženske in družine z nizkimi dohodki, saj ženske običajno bolj izkoriščajo te olajšave. Usmeritev ukrepov na povečanje skladnosti pri posameznikih z visokim neto premoženjem bi lahko izboljšala progresivnost davčnega sistema in zmanjšala dohodkovne razlike med spoloma, saj so ženske premalo zastopane med najbogatejšimi [1].
Na splošno raziskave kažejo, da so ženske pogosto bolj skladne z davčnimi predpisi zaradi svojih etičnih vrednot in previdnosti, čeprav lahko številni drugi dejavniki, kot so izobrazba, veroizpoved in odnos do denarja, pomembno vplivajo na davčno skladnost, ne glede na spol. Te ugotovitve kažejo, da bi morali oblikovalci politik pri načrtovanju davčnih sistemov upoštevati te razlike, da bi zagotovili pravičnost in učinkovitost v davčni politiki [1].

2.4 Hipoteze

Na podlagi preučene teorije postavljamo naslednje hipoteze:

Hipoteza 1: Moški so bolj naklonjeni k davčni utaji kot ženske.
Hipoteza 2: Moški so bolj naklonjeni k davčnemu izogibanju kot ženske.

Prva hipoteza predvideva, da so moški bolj naklonjeni k davčni utaji kot ženske, kar izhaja iz teze, da so moški na splošno bolj nagnjeni k tveganju in posledično kršenju zakona z namenom finančne koristi, po drugi strani pa so ženske previdnejše, ko gre za kaznivo dejanje.
Druga hipoteza pa predvideva, da so moški bolj naklonjeni k davčnemu izogibanju v primerjavi z ženskami. To temelji na predpostavki, da moški pogosteje iščejo načine za optimizacijo svojih davčnih obveznosti in so pogosto pripravljeni posegati po zapletenih pravnih praksah, ki so lahko na meji zakonitosti.

3 Empirična raziskava

V raziskavi so udeleženci izpolnili anketo na spletni strani 1-ka, ki je vključevala vprašanja o spolu, starosti, študijski smeri ter njihovih nagnjenjih k davčnemu izogibanju in davčnim utajam. Raziskava je bila izvedena na Ekonomski fakulteti Univerze v Ljubljani maja 2024, kjer so sodelovali študenti in študentke dodiplomskega študija (2. letnik) različnih smeri. Raziskava je trajal približno 20 minut. Udeležence smo obvestili, da je njihovo sodelovanje prostovoljno, anonimno in lahko od raziskave kadarkoli odstopijo.
Skupaj smo zbrali 607 odgovorov, vendar smo po pregledu morali odstraniti 22 nepopolnih oddaj, 14 podvojenih odgovorov in 21 odgovorov izrednih študentov, starejših od 24 let. V preučevan vzorec je vključenih 550 udeležencev: 203 moških (36,9 %) in 347 žensk (63,1 %), starih med 20 in 24 let (M = 21,56, SD = 1,11), s povprečno 1,83 leta delovnih izkušenj (SD = 1,87, razpon 0-8).
V raziskavi so udeleženci prejeli niz osmih scenarijev z različnimi davčnimi dilemami. Prvi štirje scenariji so bili povezani z davčno utajo, zadnji štirje pa z davčnim izogibanjem. Scenariji za davčno utajo, uporabljeni v tej študiji, temeljijo na delu Kaplana in sodelavcev (1997). Vendar smo te scenarije prilagodili tako, da smo spremenili imena in zneske, da bi bolje ustrezali kontekstu naše raziskave. Scenarije za preučevanje naklonjenosti k davčnemu izogibanju smo pripravili samostojno na podlagi poznavanja davčnega sistema in računovodskih predpisov v Sloveniji.
V okviru vseh osmih scenarijev so udeleženci morali odgovoriti oceno verjetnosti, da bo oseba, ki je nastopala v posameznem scenarijo izvedla davčno utajo oziroma davčno izogibanje. Vprašanja o vedenjskih namenih je bilo postavljeno v tretji osebi, pri katerih se posamezniki postavijo v položaj druge osebe. Torej, namesto vprašanja “Kakšna je verjetnost, da bi vi to naredili”, smo udeležence vprašali “kakšna je verjetnost da bo oseba iz scenarija to naredila”. Takšen pristop zmanjšuje pristranskost družbeno zaželenega odgovora, ki ji ljudje podležejo pri odgovarjanju na nezakonita ali neetična vprašanja (Cohen in Bennie 2006; Choong, Ho in McDonald 2002). Odgovor o verjetnost nastanka dogodka je bila ocenjena na lestvici od 1 (zelo malo verjetno) do 7 (zelo verjetno). V nadaljevanju sta predstavljena dva primera davčne utaje in dva primera davčnega izogibanja za lažje razumevanje.
Prvi primer scenarija davčne utaje (S1): Janez Novak, direktor podjetja Novak d.o.o., je kupil na podjetje nov računalnik, ki ga bo uporabljal za opravljanje svoje dejavnosti. Star računalnik je prodal prijatelju in denar prejel v gotovini. Janez je v preteklih davčnih obračunih v celoti že odpisal vrednost starega računalnika. Zaveda se, da prodaja starega računalnika predstavlja obdavčljiv prihodek podjetja.
Vprašanje: *Kakšna je verjetnost, da Janez Novak ne bo prijavil obdavčljiv prihodek iz naslova prodaje računalnika svojemu prijatelju?*
Drugi primer scenarija davčne utaje (S2): Družina Mencej ima v lasti družinsko podjetje, v katerem pogosto nastajajo stroški reprezentance (stroški poslovnih kosil in pogostitve). Med pripravo davčnega obračuna, je družina Mencej ugotovila, da imajo poleg poslovnih računov,

še nekaj osebnih računov za obroke in zabavo. S tem, ko bi vključili osebne račune, bi imelo družinsko podjetje nižji davčno priznani dobiček.
Vprašanje: *Kakšna je verjetnost, da bo družina Mencej vključila v davčni obračun še osebne račune za obroke in zabavo ter s tem imela nižji davčno priznani dobiček?*
Prvi primer scenarija davčnega izogibanja (S5): Gospod Hrovat je lastnik uspešnega podjetja Rastko d.o.o.. Je delaven, kar dokazujejo tudi vsi preživeti vikendi v pisarni. V svojem podjetju je tudi zaposlen. Razmišlja, da bi si namesto 2.500 neto, izplačeval minimalno plačo v višini 900 neto. Državi bi plačal manj prispevkov in dohodnine, mu pa ostane več denarja na TRR računu.
Vprašanje: *Kakšna je verjetnost, da si bo gospod Hrovat izplačal minimalno plačo?*
Drugi primer scenarija davčnega izogibanja (S6): Gospod Kovač, lastnik in direktor podjetja TechGrowth d.o.o., je v preteklem poslovnem letu plačal 1 mio davka od dohodka pravnih oseb v Sloveniji, kjer je davčna stopnja 19% . V zadnjem času pogleduje, da bi svoje poslovanje prestavil v državo z nižjo davčno stopnjo. V tej državi že ima odprto podružnico, torej bi poslovanje samo preusmeril v podružnico. Kljub temu, bi še vedno posloval predvsem v svoji domači državi.
Vprašanje: *Kakšna je verjetnost, da bo gospod Kovač prestavil poslovanje podjetja v državo z nižjo davčno stopnjo?*

4 Rezultati

Tabela 1 prikazujejo povprečne vrednosti odgovor za posamezen scenarij. Povprečne vrednosti za davčno utajo so nekoliko nižje, z razponom od 5,05 do 5,35, v primerjavi z vrednostmi za davčno izogibanje, ki se gibljejo med 5,05 do 5,55. Kljub 7-stopenjski lestvici, se vsi odgovori nahajajo značilno nad povprečjem in kažejo na visoko naklonjenost tako k davčni utaji, kot davčnemu izogibanju, $t(549) > 15.10$, $p < 0.001$.
Rezultati korelacijske analize kažejo močno pozitivno korelacijo med vsemi scenariji, $r > 0.26$, $p < 0.001$, kar potrjuje, da, kdor je naklonjen k davčnemu izogibanju, je tudi naklonjen k izvedbi davčne utaje.

Tabela 1: Deskriptivna statistika

Scenariji	N	Minimum	Maximum	Povprečje	Std. napaka	Std. odklon	Varianca
Davčna utaja – S1	550	1	7	5,35	0,07	1,56	2,44
Davčna utaja – S2	550	1	7	5,05	0,07	1,63	2,68
Davčna utaja – S3	550	1	7	5,35	0,07	1,54	2,38
Davčna utaja – S4	550	1	7	5,30	0,07	1,68	2,82
Davčno izogibanje – S5	550	1	7	5,05	0,07	1,64	2,68
Davčno izogibanje – S6	550	1	7	5,41	0,06	1,36	1,85
Davčno izogibanje – S7	550	1	7	5,55	0,06	1,43	2,05
Davčno izogibanje – S8	550	1	7	5,39	0,07	1,57	2,45

Tabela 2 prikazuje povprečne vrednosti pripravljenosti za davčno utajo in davčno izogibanje, ločeno po spolu. Pri ženskah je povprečna pripravljenost za davčno utajo 5,17, medtem ko je pri moških vrednost odgovorov višja, in sicer 5,42. Razlika je statistično značilna, $t(548) =$

2,42, p = 0,016. Pri davčnem izogibanju so ženske v povprečju odgovorile z oceno 5,33, moški pa s 5,38. Razlika med spoloma ni značilna, t (548) = 0,50, p = 0,619.

Tabela 2: Deskriptivna statistika v odvisnosti od spola

Spol	N	Davčna utaja – povprečna vr.	Davčno izogibanje – povprečna vr.
Ženske	347	5,17	5,33
Moški	203	5,42	5,38

Rezultati potrjujejo hipotezo 1, da so moški bolj naklonjen k izvedbi davčne utaje, pri čemer pa hipoteze 2 ne moremo potrditi. Ugotavljamo, da so oboji, moški in ženske, neetični, ko se gre za izpolnjevanje davčnih predpisov.
Dodatno smo preverili tudi razlike v povprečne ocene naklonjenosti k davčni utaji in davčnemu izogibanju med študenti različnih študijskih smeri. V primerjavo smo vzeli največje smeri, in sicer Bančni in finančni management (BFM), Računovodstvo in revizija (RR), Management (MNG), Podjetništvo (POD) in Trženje (TRŽ). Rezultati kažejo, da so študenti računovodstva in revizije najbolj naklonjeni k davčni utaji z oceno 5,51, pri čemer so najmanj naklonjeni študenti podjetništva z oceno 5,16, ter študenti trženja z oceno 5,03. Razlika med študenti računovodstva in revizije in študenti podjetništva je statistično značilna, t (181) = 2.13, p = 0.017, prav tako je značilna razlika s študenti trženja, t (210) = 3.14, p < 0,001.
Rezultati pri davčnem izogibanju so podobni, in sicer so značilno bolj naklonjeni k neetičnemu vedenju študenti računovodstva in revizije z oceno 5,55 v primerjavi s študenti podjetništva z oceno 5,22, t (181) = 2.00, p = 0.024, in študenti trženja z oceno 5,21, t (210) = 2.13, p = 0,035.

Tabela 3: Deskriptivna statistika v odvisnosti od študijske smeri

Študijska smer	N	Davčna utaja – povprečna vr.	Davčno izogibanje – povprečna vr.
BFM	94	5.47	5,39
RR	98	5,51	5,55
MNG	83	5,23	5,41
POD	85	5,16	5,22
TRŽ	114	5,03	5,21

5 Zaključek

Zaključek naše raziskave o vplivu spola na davčno skladnost potrjuje prvo hipotezo, da so moški bolj nagnjeni k davčni utaji kot ženske, saj so naši rezultati pokazali, da so moški v povprečju bolj pripravljeni tvegati v primerjavi z ženskami. Drugo hipotezo pa zavrača, kar lahko utemeljimo z rezultati, ki nakazujejo, da razlik med spoloma pri davčnem izogibanju ni. Oboji, tako ženske kot moški, so pri izpolnjevanju davčnih predpisov neetični. Te ugotovitve so deloma skladne z rezultati prejšnjih študij. Moški so pogosto bolj pripravljeni tvegati kljub kazenskim posledicam, vendar so ženske pri davčnem izogibanju, kljub običajni notranji motiviranosti za spoštovanje davčnih zakonov in večje nenaklonjenosti k tveganju, ravno tako pokazale pripravljenost k davčnemu izogibanju.
Empirična raziskava je še dodatno razkrila, da so najvišje vrednosti pripravljenosti na davčno izogibanje in davčno utajo prisotne med študenti smeri Računovodstvo in revizija. Ta ugotovitev nakazuje na potrebo po povečani ozaveščenosti o posledicah nepoštenega davčnega vedenja med bodočimi strokovnjaki v računovodstvu in reviziji. Krepitev etičnih

standardov in vključitev etičnih vsebin v predmetnik, bi že lahko pomenila pomemben korak k spodbujanju poštenega davčnega ravnanja. Ta usmeritev je nujna za zagotavljanje večje davčne skladnosti ter integritete v finančnem sektorju, kar bi posledično vzpostavilo pravičnejše in učinkovitejše delovanje davčnega sistema.
Naša raziskava prispeva k poglobljenemu razumevanju vpliva spola na davčno skladnost, prav tako pa opozarja tudi na potrebo po prilagoditvi izobraževalnih vsebin ter oblikovanju politik, ki upoštevajo te razlike. Upamo, da bodo naše ugotovitve služile kot pomembna izhodiščna točka za nadaljnje raziskave, ki bodo poglobile razumevanje teh razlik ter prispevale k razvoju boljših politik in praks.

6 Literatura

[1] Daniel, T., Rutungwa, E., Faustin, G., Misago, I., & Mutarinda, S. (2024). Gender and the tax compliance puzzle: Does gender influence taxpayers' behaviour towards tax compliance? Evidence from Rwanda. *Cogent Business & Management*, *11*. https://doi.org/10.1080/23311975.2024.2316887

[2] Dodd, V. (2024, april 23). *Tax Avoidance vs Tax Evasion*. Skillcast. https://www.skillcast.com/blog/tax-avoidance-tax-evasion-difference

[3] FURS. (b. d.-a). *Davek na dediščine in darila*. FINANČNA UPRAVA REPUBLIKE SLOVENIJE. Pridobljeno 18. avgust 2024, s https://www.fu.gov.si/davki_in_druge_dajatve/podrocja/davek_na_dediscine_in_darila/#c211

[4] FURS. (b. d.-b). *Davek na dodano vrednost (DDV)*. FINANČNA UPRAVA REPUBLIKE SLOVENIJE. Pridobljeno 18. avgust 2024, s https://www.fu.gov.si/davki_in_druge_dajatve/podrocja/davek_na_dodano_vrednost_ddv/#c259

[5] FURS. (b. d.-c). *Davek od dohodkov pravnih oseb (DDPO)*. FINANČNA UPRAVA REPUBLIKE SLOVENIJE. Pridobljeno 18. avgust 2024, s https://www.fu.gov.si/davki_in_druge_dajatve/podrocja/davek_od_dohodkov_pravnih_oseb_ddpo/#c229

[6] Kirchler, E. (2007). Ekonomika psihologija davčnega vedenja. Cambridge University Press.

[7] Lawyers in Slovenia. (2024, januar 26). Taxation in Slovenia. *Lawyers in Slovenia*. https://lawyersslovenia.com/taxation-in-slovenia/

[8] Lock, S. (2024, marec 12). *Tax avoidance vs tax evasion: What's the difference – and which one is illegal?* The Bureau of Investigative Journalism. https://www.thebureauinvestigates.com/stories/2024-03-12/tax-avoidance-vs-tax-evasion-whats-the-difference-and-which-one-is-illegal

[9] SPOT. (2024, januar 4). *Splošno o davkih*. Slovenska poslovna točka. https://spot.gov.si/sl/teme/splosno-o-davkih/

[10] Tookitaki. (2024, marec 15). *Tax Evasion*. Tookitaki. https://www.tookitaki.com/glossary/tax-evasion

[11] Torgler, B., & Valev, N. T. (2010). Spol in javna stališča do korupcije in davčnih utaj. *Contemporary Economic Policy*, 28(4), 554-568.

Bivalentno delovanje toplotne črpalke v novem pet-tarifnem sistemu obračunavanja omrežnine

Jaka Bizjak

Povzetek

Uvajanje obnovljivih virov energije za dosego zelenega prehoda energetike zahteva učinkovitejšo rabo elektroenergetskih omrežij, kar se lahko doseže z aktivnejšim odjemom električne energije. V letu 2024 se v Sloveniji uvaja nova metodologija obračunavanja omrežnine, ki odjemalce finančno spodbuja k aktivnejšemu odjemu. Ogrevanje predstavlja večino rabe energije v gospodinjstvih, trend pa je v njegovi elektrifikaciji s toplotnimi črpalkami. Nizka učinkovitost le teh pri nizkih temperaturah obremenjuje distribucijsko omrežje v času največjih potreb po toploti. Ta študija se osredotoča na izračun stroškov, izpustov toplogrednih plinov (TGP) in rabe primarne energije za primer bivalentnega sistema ogrevanja s toplotno črpalko in kotlom na zemeljski plin v starejši neizolirani stavbi. Ugotovljeno je bilo, da lahko z nastavitvijo primerne temperature preklopa med ogrevanjem s toplotno črpalko in kotlom zmanjšamo stroške energentov do 2,5 %, izpuste TGP do 1,6 % in rabo primarne energije do 5,3 %.

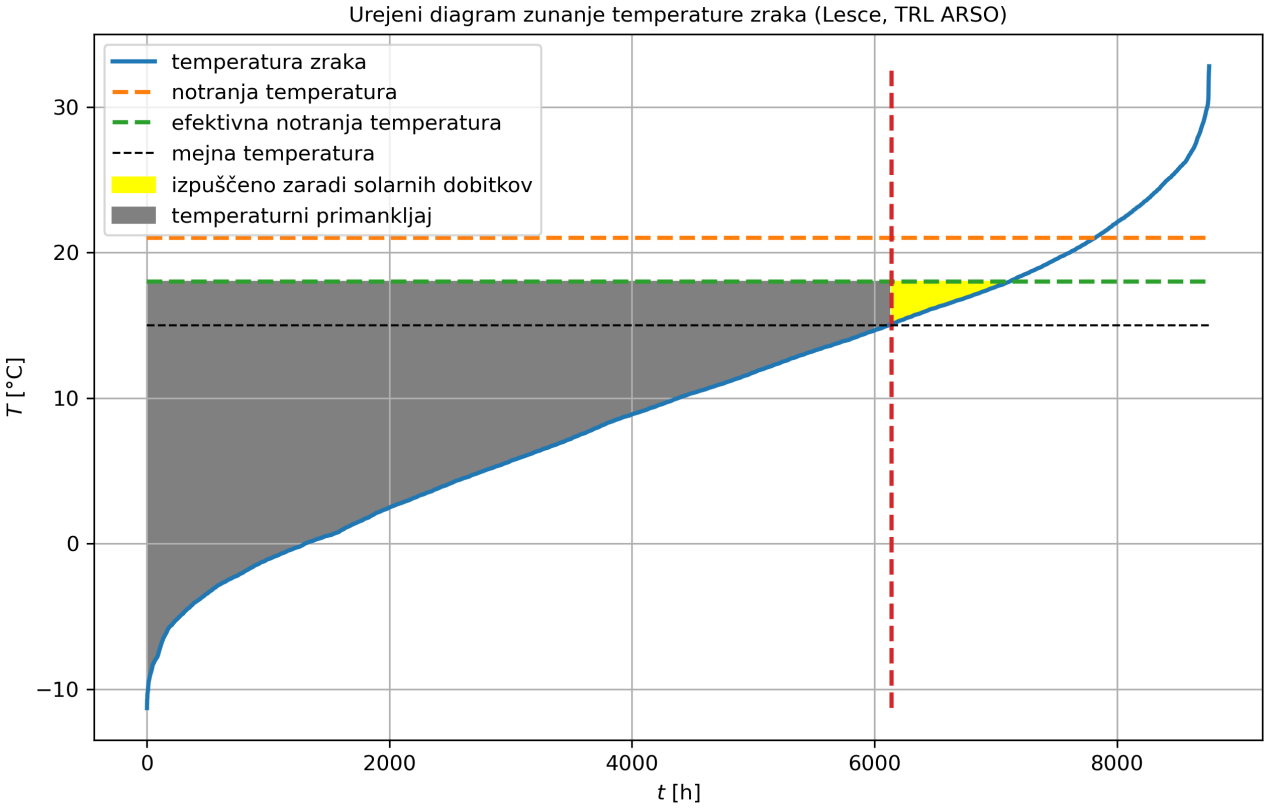
1 Uvod

Po podatkih Statističnega urada Republike Slovenije [1] je raba končne energije v gospodinjstvih leta 2022 znašala 12165 GWh oz. 22 % celotne končne rabe energije v državi. Največji delež energije, kar 68 % (7455 GWh), se v gospodinjstvih rabi za ogrevanje prostorov, pri čemer je najbolj razširjen vir lesna biomasa s 50 %, sledijo ekstra lahko kurilno olje (ELKO) s 14 %, zemeljski plin z 11 %, daljinska toplota z 9 %, električna energija (EE) z 8 % in toplota iz okolice s 7 %. Delež slednje neprestano raste od leta 2012, ko je znašal 1 %.
Učinkovitost toplotnih črpalk (TČ), ki za ogrevanje izkoriščajo toplot iz okolice, je močno odvisna od temperature vira. V primeru TČ zrak-voda, je vir okoliški zrak, katerega temperatura preko leta niha. Tako so najnižje učinkovitosti pozimi, ko je potreba po ogrevanju največja. Poleg tega bodo odjemalci z novo metodologijo za obračunavanje omrežnine EE, ki stopa v veljavo oktobra 2024, nagrajeni za aktivnejši odjem, kar pomeni, da bodo lahko, s pametno rabo in manjšanjem konic zmanjšali stroške za omrežnino.

1.1 Ogrevanje stavb

Z ogrevalnim sistemov se zagotavlja toploto, ki se zaradi temperaturne razlike med notranjostjo in zunanjostjo prenaša skozi ovoj stavbe, za ustrezno toplotno ugodje v bivalnem okolju. Veličina, ki nam poda moč toplotnih izgub glede na temperaturno razliko je toplotna prehodnost stavbe H_{tot}, ki je sestavljena iz transmisijskih izgub skozi ovoj stvabe in ventilacijskih izgub zaradi puščanja in prezračevanja. H_{tot} se lahko izračuna iz konstrukcije stavbe in puščanja oz. potreb po prezračevanju, v primeru znane rabe energije za ogrevanje iz preteklih let pa se lahko tudi oceni s pomočjo temperaturnega primankljaja.

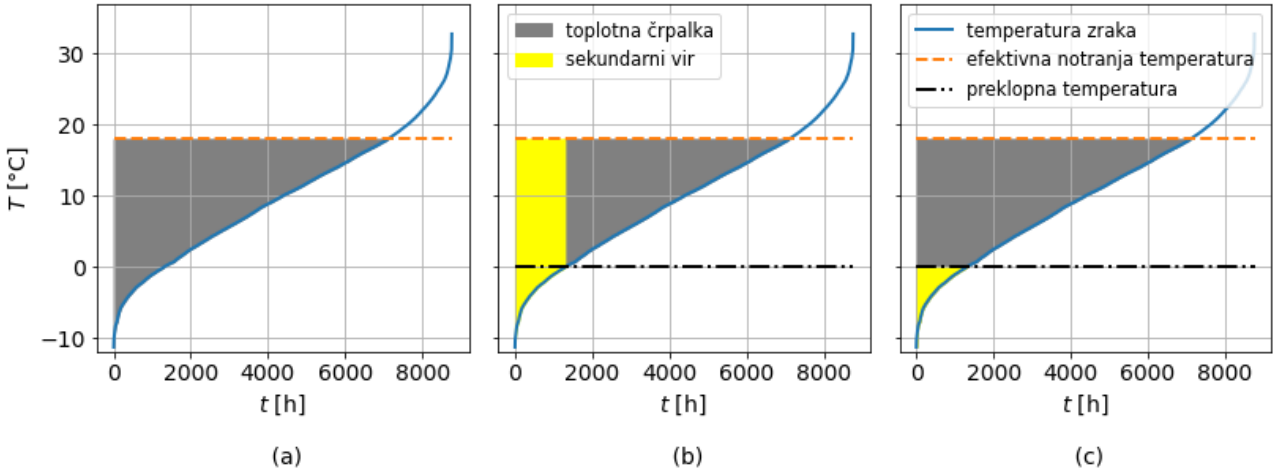
Slika 1 prikazuje metodo za določanje temperaturnega primankljaja iz letnega profila zunanje temperature zraka [2]. Letni podatki na urnem nivoju so predstavljeni v urejenem diagramu, iz katerega se lahko razbere koliko ur v letu ima zrak največ določeno temperaturo. Oranžna črta predstavlja željeno temperaturo zraka v stavbi. Za razliko med željeno in efektivno temperaturo (zelena črta) v stavbah poskrbijo notranji viri (naprave in osebe). Sivo obarvana površina na grafu predstavlja temperaturni primankljaj v °Ch (ang. Degree Hour Value). Če se ta vrednost pomnoži s toplotno prehodnostjo stavbe H_{tot}, je rezultat letna raba energije za ogrevanje.



Slika 1: Urejeni diagram zunanje temperature zraka po podatkih tipičnega referenčnega leta (TRL) za meteorološko postajo Lesce.

1.1.1 Toplotne črpalke

Toplotna črpalka je naprava, ki s pomočjo dovedenega dela črpa toploto iz nizkotemperaturnega vira v visokotemperaturni ponor [3]. Vir lahko predstavljajo zunanji zrak, talna voda ali geotermalna energija zemljine, ponor voda v ogrevalnem sistemu, delo pa je dovedeno v obliki električne energije v parno-kompresijskem procesu. Merilo učinkovitosti toplotnih črpalk je grelno število (COP), ki je razmerje med odvedeno grelno močjo in dovedeno električno močjo kompresorja.
V monovalentnih ogrevalnih sistemih toplotna črpalka predstavlja edini vir ogrevanja (slika 2(a)). V primeru bivalentnega alternativnega delovanja pri določeni temperaturi toplotno črpalko nadomesti sekundarni vir (slika 2(b)). V bivalentnem vzporednem delovanju (slika 2(c)) toplotna črpalka zagotavlja toploto za nek temperaturni primankljaj, pri nižjih temperaturah pa deluje skupaj s sekundarnim virom. Beccali in kolegi [4] so izpostavili da imajo bivalentni sistemi s toplotno črpalko in kotlom na zemeljski plin, ob pravilnem krmiljenju, pozitivne učinke na rabo energije in stroške, ki pa so odvisni od podnebja, operativnih nastavitev in tarifnega sistema.



Slika 2: Različni načini obratovanja toplotne črpalke in sekundarnega vira: monovalentno (a), bivalentno alternativno (b) in bivalentno vzporedno delovanje (c).

1.2 Aktivni odjem električne energije

Aktivni odjemalci lahko s svojo premišljeno in prilagojeno rabo EE ob pravem času zmanjšajo ali povečajo in hkrati zamaknejo čas odjema ali uporabljajo sisteme za shranjevanje energije [5]. Oblike aktivnega odjema so klasična samooskrba, samooskrba s shranjevanjem, naprednejši odjem in povezovanje v energetske skupnosti.

1.2.1 Nova metodologija obračunavanja omrežnine

Agencija za energijo, z aktom v Uradnem listu RS št. 49/24, uvaja nov način obračunavanja omrežnine, s čimer si prizadeva za aktivnejši odjem EE, boljšo integracijo obnovljivih virov energije v elektroenergetski sistem in posledično zeleni prehod. Novost je razdelitev leta na višjo in nižjo sezono, dneva na tri bloke, skupno pa je v letu pet različnih blokov. Preglednica 1 prikazuje tarife za energijo in moč v posameznem bloku.

Tabela 1: Tarifne postavke omrežnine za leto 2024 po novi metodologiji.

časovni blok	1	2	3	4	5
tarifa za moč [EUR/kW]	3,61324	0,88240	0,19137	0,01316	0,00000
tarifa za energijo [EUR/kWh]	0,01958	0,01844	0,01837	0,01838	0,01847

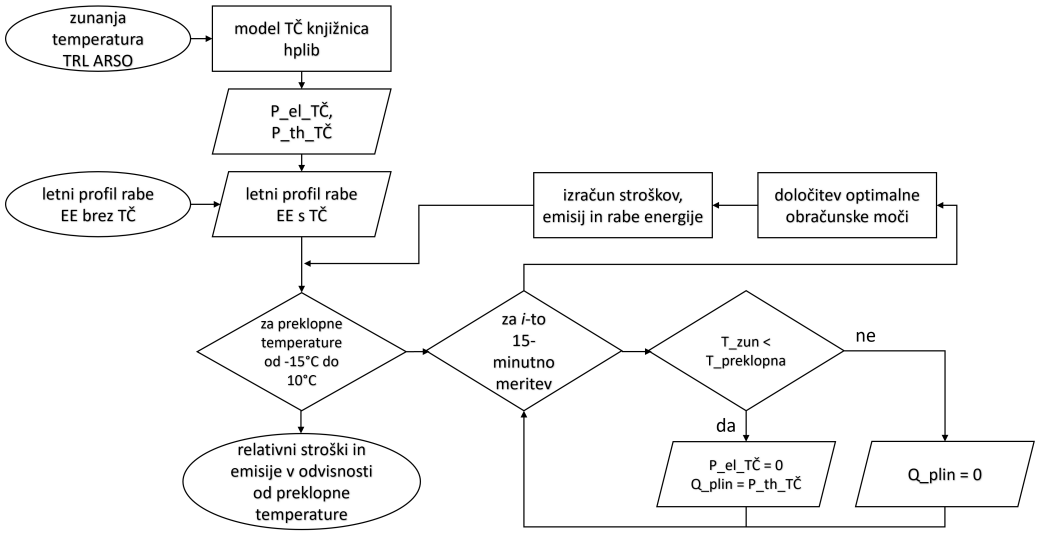
Metodologija izračuna mesečnega zneska omrežnine za distribucijo električne energije je podrobno predstavljena v 16. členu omenjenega akta, poenostavljeno pa je mesečni strošek omrežnine sestavljen iz stroška omrežnine za energijo in moč, slednja pa iz obračunske ter presežne moči.

2 Metode dela in potek raziskave

Analiza je bila opravljena na primeru starejše neizolirane stanovanjske hiše za dve gospodinjstvi, zgrajene v 70-ih letih 20. stoletja ($H_{\text{tot}} = 350$ W/K). V oktobru 2023 za ogrevanje kondenzacijski kotel na zemeljski plin zamenjala toplotna črpalka. Ker je kotel na zemeljski plin ostal v hiši, je bila izvedena analiza bivalentnega alternativnega delovanja toplotne črpalke in kotla, z izračunom stroškov glede na nov pet-tarifni način obračunavanja omrežnine. V razponu preklopnih temperatur se je določila temperatura pri kateri so stroški za električno energijo in plin najnižji.
Model za izračun je bil izdelan v programskem jeziku python in je v grobem razdeljen na tri dele, kot prikazuje diagram poteka na sliki 3.

2.1 Model toplotne črpalke

Električna in toplotna moč TČ glede na profil zunanje temperature je bila izračunana z uporabo funkcij `hplib.get_parameters` in `hplib.HeatPump.simulate()` iz knjižnice `hplib` [6].
Za ogrevanje je bila nameščena toplotna črpalka zrak-voda proizvajalca Clivet WiSAN-YME 1 S 7.1T nazivne toplotne moči 13,8 kW in električne moči 5,8 kW. Omenjene toplotne črpalke ni v uporabljeni knjižnici, zato so bili parametri določeni za generično toplotno črpalko zrak-voda z omenjeno toplotno močjo. Temperaturni režim je bil nastavljen tako, da dobljen profil rabe električne energije TČ, seštet s profilom rabe električne energije brez TČ, ni bistveno odstopal



Slika 3: Diagram poteka izračuna relativnih stroškov in izpustov TGP glede na preklopno temperaturo v programskem jeziku python.

od profila rabe v prvi polovici leta 2024, ko je toplotna črpalka že zagotavljala toploto za sistem ogrevanja. Temperaturni profil so predstavljale temperature za tipično referenčno leto na meteorološki postaji Lesce.

2.2 Določitev profila rabe energije glede na preklopno temnperaturo

Kot preklopna temperatura se določi tista temperature zraka, pri kateri se toplotna črpalka ugasne in jo nadomesti kotel na zemeljski plin. Pogoj se preveri za vsak 15-minuten podatek in v primeru manjše temperature je električna moč toplotne črpalke 0 kW, toplotna moč kotla pa enaka toplotni moči, ki bi jo zagotavljala toplotna črpalka. Histereza preklopa ni dodatno definirana zaradi dolžine intervala med dvema točkama izračuna (15 minut). Za izračun rabe primarne energije se, po aktu objavljenem v Uradnem listu RS št. 132/22, upoštevata faktorja primarne energije 2,5 za električno energijo in 1,1 za zemeljski plin.

2.3 Izračun stroškov in izpustov TGP pri optimalni obračunski moči

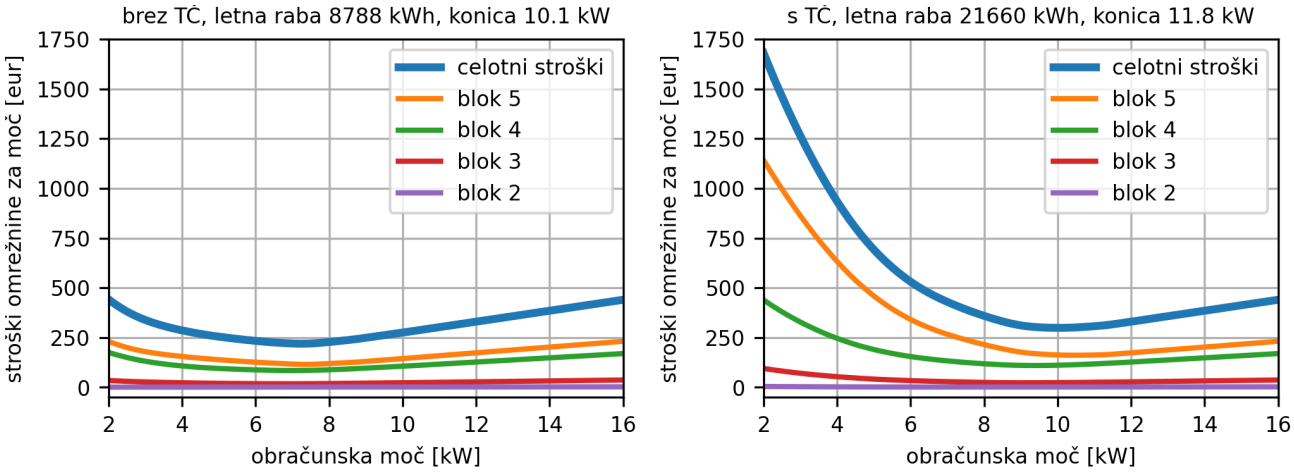
Vsaka preklopna temperatura določi nov profil rabe električne energije, za katerega se stroški omrežnine izračunajo z metodologijo predstavljeno v poglavju 1.2.1. Določi se optimalna obračunska moč, torej moč pri kateri so stroški omrežnine za moč najnižji. Za izračun stroškov se uporabijo vrednosti prikazane v tabeli 1 in 2. Poleg tega se za priklop na distribucijsko omrežje zemeljskega plina plačuje mesečni pavšal v vrednosti 8,24 EUR po računu distributerja zemeljskega plina (vse uporabljene cene so brez DDV). Za izračun izpustov TGP sta bila uporabljena emisijska faktorja za EE 0,304 kg CO_2 ekv. oz. 0,202 kg CO_2 ekv. za zemeljski plin.

Tabela 2: Tarife za energente uporabljeni v analizi, podatki po [1].

tarifa za elektriko - energija	0,097	EUR/kWh
tarifa za elektriko - dodatki in prispevki	0,0183	EUR/kWh
tarifa za zemeljski plin - energija	0,0620	EUR/kWh
tarifa za zemeljski plin - dodatki, prispevki	0,0050	EUR/kWh

3 Rezultati

Slika 4 prikazuje stroške omrežnine za moč v odvisnosti od nastavljene dogovorjene obračunske moči za primer pred in po namestitvi toplotne črpalke. Celotni stroški v tem primeru predstavljajo seštevek stroškov vseh blokov pri enaki obračunski moči. Tabela 3 prikazuje stroške omrežnine razdeljen na stroške za energijo, obračunsko in presežno moč pri optimalni dogovorjeni obračunski moči.



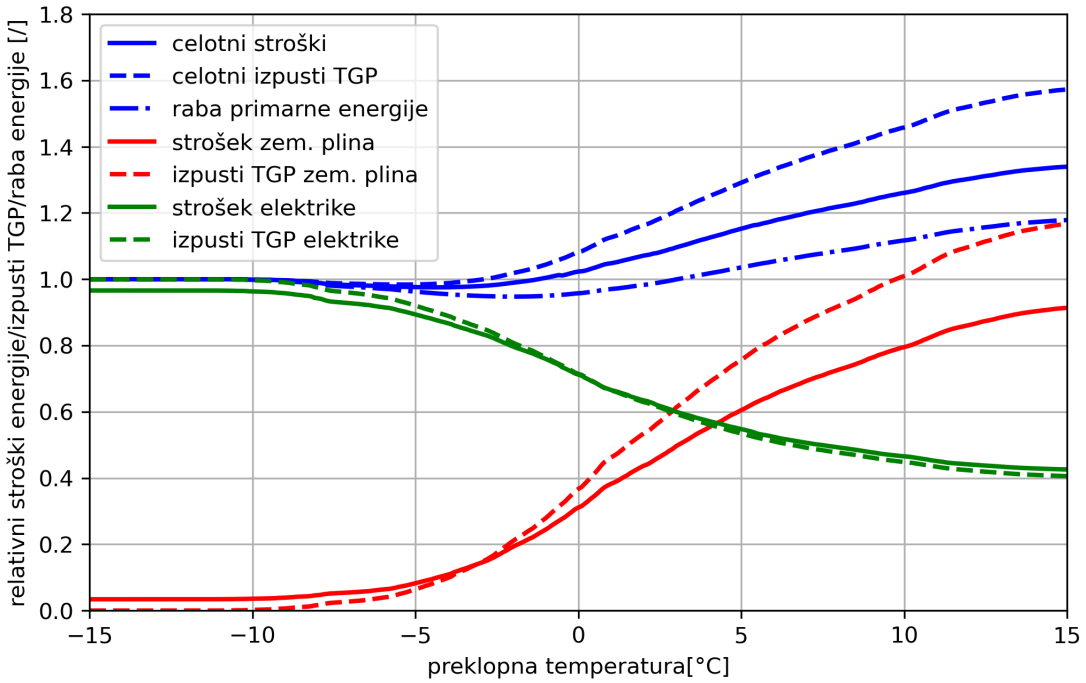
(a) *(b)*

Slika 4: Letni stroški omrežnine za moč glede na dogovorjeno obračunsko moč brez (a) in s toplotno črpalko (b).

Primerjava stroškov omrežnine za moč pred in po namestitvi toplotne črpalke, kaže da sprememba v odjemu električne energije poveča stroške omrežnine za moč. Priporočljivo je, da odjemalci v primeru izrazite spremembe rabe EE (nakup TČ, električnega avtomobila, ...) prilagodijo obračunsko moč in tako zmanjšajo stroške za omrežnino. V omenjenem primeru s TČ se stroški pri prilagoditvi obračunske moči iz 7,2 kW na 10 kW znižajo za 114,4 EUR.
Slika 5 prikazuje stroške energentov, izpuste TGP in rabo primarne energije relativno na samostojno delovanje toplotne črpalke v odvisnosti od preklopne temperature.
Vrednosti pri -15 °C so enake primeru, ko deluje zgolj TČ za ogrevanje, pri 15 °C pa primeru, ko se ogreva zgolj z zemeljskim plinom. Iz grafa je razvidno, da namestitev TČ v vsakem primeru zniža stroške, izpuste TGP in rabo primarne energije.

Tabela 3: Razultati analize stroškov za omrežnino brez in s toplotno črpalko.

	brez toplotne črpalke	s toplotno črpalko
raba električne energije [kWh]	8788	21660
optimalna obračunska moč [kW]	7,2	10
strošek omrežnine za energijo [EUR]	163,24	403,23
strošek omrežnine za obračunsko moč [EUR]	197,97	274,96
strošek omrežnine za presežno moč [EUR]	21,24	23,98
celoten strošek omrežnine [EUR]	382,45	702,17



Slika 5: Relativni stroški energentov, izpusti TGP in raba primarne energije glede na samostojno delovanje toplotne črpalke v odvisnosti od preklopne temperature.

Tabela 4: Rezultati za primer najnižjih stroškov, izpustov TGP in rabe primarne energije.

	min stroški	min izpusti TGP	min raba primarne energije
$T_{\text{preklopna}}$ [°C]	-4,4	-5,4	-2,0
strošek [EUR]	2823,8	2828,9	2864,4
strošek [%]	97,5	97,7	98,9
izpusti TGP [kg CO_2 ekv.]	6492,5	6477,6	6705,7
izpusti TGP [%]	98,6	98,4	101,8
raba primarne energije [kWh]	51847,0	52313,9	51298,6
raba primarne energije [%]	95,7	96,6	94,7

Minimalne vrednosti stroškov, izpustov TGP in rabe primarne energije so podane v tabeli 4. Rezultati kažejo na širok interval (od -2,0 °C do -5,4 °C) preklopnih temperatur, kjer stroški in raba primarne energije ne odstopata bistveno, pri rabi primarne energije pa mora biti preklopna temperatura nižja od -2,0 °C za zmanjšanje glede na ogrevanje zgolj s TČ.

4 Zaključki

Glede na novo metodologijo obračunavanja omrežnine se lahko za znani profil rabe EE določi obračunsko moč, pri kateri so stroški omrežnine za moč najnižji. V primeru da gospodinjski odjemalec bistveno spremeni rabo EE (nakup TČ, električnega avtomobila, ...), je priporočljivo tudi prilagoditi obračunsko moč in se s tem izogniti prevelikim stroškom presežne moči.
Študija prikazuje, da je ohranitev prvotnega sistema ogrevanja, pri nadgradnji ogrevalnega sistema starejše dvogospodinjske stavbe, smiselna pri novem načinu obračunavanja omrežnine, saj lahko z bivalentnim alternativnim delovanjem toplotne črpalke in kotla na zemeljski plin zmanjšamo stroške, izpuste TGP in rabo primarne energije. Ob primerni nastavitvi temperature preklopa med toplotno črpalko in kotlom na zemeljski plin, lahko zmanjšamo stroške do 2,5 %, izpuste TGP do 1,6 % in rabo primarne energije do 5,3 %. Dodatna prednost bivalentnih sistemov je nižja investicija v toplotno črpalko, saj je za zagotavljanje istih toplotnih potreb dovolj nižja nizivna moč toplotne črpalke.

5 Literatura

[1] Statistični urad Republike Slovenije, *Energetika*. dostopno na: https://pxweb.stat.si/SiStat/sl/Podrocja/Index/186/energetika [ogled: 08. 08. 2024].

[2] S. Frederiksen in S. Werner, *District Heating and Cooling*. Studentlitteratur, 2013.

[3] A. Poredoš, A. Kitanovski, B. Vidrih in P. Poredoš, *Heat pumps for heating and cooling*. Fakulteta za strojništvo, 2018.

[4] M. Beccali, M. Bonomolo, F. Martorana, P. Catrini in A. Buscemi, "Electrical hybrid heat pumps assisted by natural gas boilers: a review," *Applied Energy*, let. 322, str. 119466, 9 2022.

[5] *Učinkovita raba omrežij*. dostopno na: https://www.uro.si [ogled: 12. 08. 2024].

[6] H. Hoops, T. Tjaden in K. Rösken, *RE-Lab-Projects/hplib: v1.9*, 7 2022. dostopno na: https://doi.org/10.5281/zenodo.6792486

NAČRTOVANJE MOBILNE APLIKACIJE ZA PREGLEDOVANJE FINANC

Hana Brce, Jože Guna

Povzetek

Skozi raziskavo smo se osredotočili na načrtovanje mobilne aplikacije za pregledovanje financ, pri čemer smo poseben poudarek dali na oblikovanje dobre uporabniške izkušnje. Cilj aplikacije je omogočiti hiter in enostaven vnos denarnih transakcij, kar spodbuja uporabnike k rednemu beleženju svojih prihodkov in odhodkov. Kot del raziskave smo izvedli kvantitativno raziskavo, analizirali obstoječe aplikacije in opravili intervjuje, da smo pridobili čim več pozitivnih in negativnih izkušenj uporabnikov pri uporabi trenutnih rešitev. Z uporabo programa Figma smo ustvarili žične modele in prototip aplikacije, ki smo ga nato ovrednotili z validiranimi vprašalniki UEQ in MeCUE. Rezultati vrednotenja so potrdili uspeh pri ustvarjanju dobre uporabniške izkušnje. Končni rezultat je prototip aplikacije, ki uporabnikom omogoča preprost pregled financ.

1 Uvod in namen

Uporaba obstoječih mobilnih aplikacij za beleženje financ predstavlja izziv mnogim novim uporabnikom, kjer težave izhajajo iz kompleksnosti in neprijaznosti vmesnika. V veliki meri so posledica slabega načrtovanja, kar vodi do slabe uporabniške izkušnje. Ključnega pomena za uspešno in učinkovito uporabo je zagotoviti intuitiven vmesnik, ki omogoča preprosto uporabo, jasno navigacijo ter prilagodljivost funkcij glede na potrebe posameznega uporabnika. Čeprav gre za splošne vidike oblikovanja uporabniške izkušnje, se zavedamo, da so potrebe uporabnikov lahko izjemno raznolike. Zato je nujno izvesti podrobne raziskave, da bi razumeli specifične zahteve in želje uporabnikov v zvezi z beleženjem financ. [1, 2, 3]

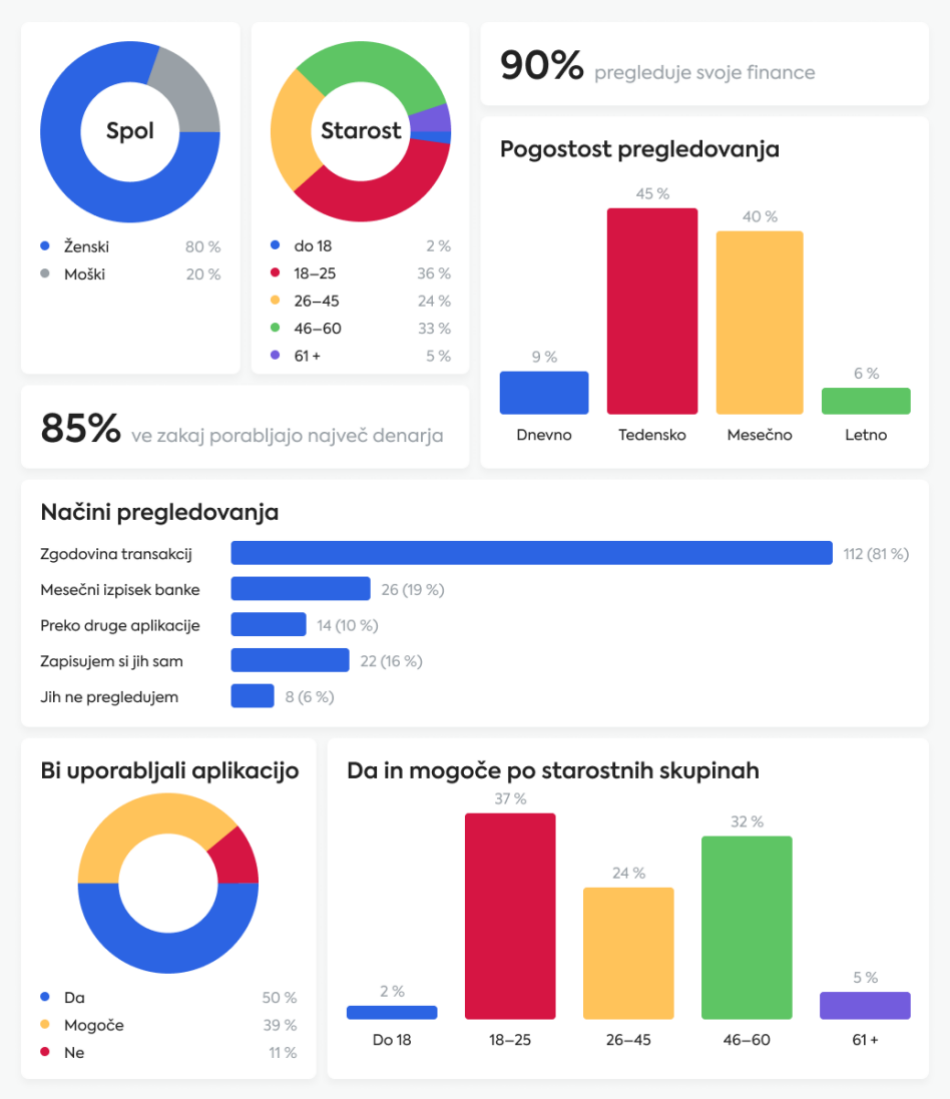
Namen raziskave je razviti uporabniku prijazno in intuitivno mobilno aplikacijo za pregledovanje financ. Cilj je olajšati beleženje finančnih transakcij in s tem izboljšati finančno upravljanje uporabnikov. Raziskava je pokazala, kako lahko z ustreznim načrtovanjem aplikacije in premišljenimi koraki dosežemo dobro uporabniško izkušnjo. Poleg tega bomo pridobili dragocene vpoglede v potrebe in želje uporabnikov glede beleženja financ, kar bo prispevalo k nadaljnjemu izboljševanju finančnih orodij.

Za pridobivanje podatkov o potrebnih funkcionalnosti za aplikacijo smo uporabili več metod. Z metodo anketiranja in analizo že obstoječih aplikacij smo pridobili vpogled v splošne potrebe in navade uporabnikov. Z metodo intervjujev smo podrobneje analizirali individualne potrebe uporabnikov, kar nam je omogočilo natančnejše razumevanje različnih skupin uporabnikov. Za oblikovanje aplikacije smo najprej ustvarili informacijsko arhitekturo kot temelj za žične modele, katere smo oblikovno nadgradili v končni prototip aplikacije. Na koncu smo z uporabo intervjujev in standardnih vprašalnikov še ovrednotili uporabniško izkušnjo naše aplikacije.

2 Metode dela in potek raziskave

2.1 Začetna analiza

Preden smo se lotili oblikovanja aplikacije smo želeli opravili analizo stanja na trgu. Želeli smo pregledati obstoječe aplikacije za beleženje financ, razumeti trenutne navade pregledovanja financ uporabnikov in prepoznati njihove točke frustracij. Za pridobivanje kvantitativnih podatkov, ki so prikazani na sliki 1, smo uporabili metodo anketiranja. V programu Google Forms smo ustvarili kratko anketo z osmimi vprašanji na katero smo prejeli 138 odgovorov.



Slika 1: Pridobljeni podatki iz ankete

Za prepoznavanje prednosti in slabosti rešitev, ki so trenutno na trgu, smo analizirali obstoječe aplikacije za beleženje financ. Iskali smo aplikacije, namenjene vnosu finančnih prilivov in odlivov, pregledu neto vrednosti ter kategoriziranju transakcij. Analizirali smo funkcije, barvne sheme in grafične elemente devetih aplikacij. Podatki iz analize so prikazani v preglednici 1.

Preglednica 1: Rezultati analize podobnih obstoječih aplikacij

Dejavnost v aplikaciji	Money manager	Wallet App	Money manager	Spen-dee	Toshl Finance	FIN	Fin	Monefy	Money Manager
Vključevanje (angl. on boarding)		■	■	■	■	■	■	■	■
Vnos stanja na začetku	■	■	■	■	■	■		■	
Personaliziranje kategorij	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Podkategorije		■			■				
Več računov	■	■	■	■	■		■	■	
Prenos med računi	■	■	■					■	
Proračun za kategorije	■	■		■	■	■			
Redna plačila	■	■	■	■		■	■	■	
Povezava z banko		■	■	■	■				
Prijava z emailom		■	■	■	■	■			■
Plačljiva verzija	■	■		■	■	■	■	■	
Dodajanje PIN	■	■	■	■	■		■	■	
Obvestila	■	■	■		■		■		■
Tortni diagram	■	■	■	■	■			■	■
Povezava med računi		■		■					

Legenda: ■ – Aplikacija vsebuje navedeno dejavnost □ – Aplikacije ne vsebuje navedene dejavnosti

Po analizi podatkov iz anket in obstoječih aplikacij smo se osredotočili na pridobivanje kvalitativnih podatkov. S pomočjo intervjujev smo želeli zbrati konkretne izkušnje in želje potencialnih uporabnikov. Naš cilj je bil pridobiti čim več pozitivnih in negativnih izkušenj uporabnikov pri beleženju financ in s tem zmanjšati tveganje načrtovanja rešitve, ki ne odraža njihovih potreb. Izvedli smo intervjuje z 10 osebami, pri čemer smo uporabili 25 vprašanj.

Vprašanja so zajemala osnovne demografske podatke, navade glede upravljanja financ, uporabo obstoječih bančnih in finančnih aplikacij ter preference glede funkcionalnosti, ki bi jih želeli videti v novi aplikaciji. Po izvedenih intervjujih smo primerjali zapiske in analizirali odgovore, da bi identificirali ponavljajoče se vzorce in razlike. Pridobljeni podatki so nam povedali, da večina intervjuvancev premišljeno upravlja z denarjem, uporablja spletno ali mobilno banko za pregled stanja in zgodovine transakcij ter ceni personalizacijo kategorij in enostavno vnašanje transakcij. Želijo avtomatske opomnike, možnost združevanja statistike za različna časovna obdobja, ter pogrešajo kategorizacijo financ in mesečni pregled pri trenutnih rešitvah.

Na podlagi vseh pridobljenih podatkov smo definirali dve ciljni skupini: dijake in študente brez fiksnega prihodka, ki uporabljajo aplikacijo za pregled trenutne neto vrednosti in načrtovanje

stroškov, ter mlajše zaposlene, ki varčujejo za prihodnost in se osredotočajo na premišljeno ravnanje z denarjem.

2.2 Oblikovanje aplikacije

Začetna analiza nam je ponudila številne uporabne informacije, ki smo jih upoštevali pri nadaljnjem načrtovanju aplikacije, kjer smo se osredotočili na tri glavne dejavnosti v naši aplikaciji: dodajanje nove transakcije, pregled trenutnega stanja in grafični prikaz zapravljanja po kategorijah. Najprej smo definirali informacijsko arhitekturo v katero smo prej omenjene dejavnosti umestili tako, da so uporabniku hitro dostopne. Na podlagi informacijske arhitekture smo izdelali žične modele na papirju in jih nato digitalizirali v programu Figma, katere lahko vidimo na sliki 2.



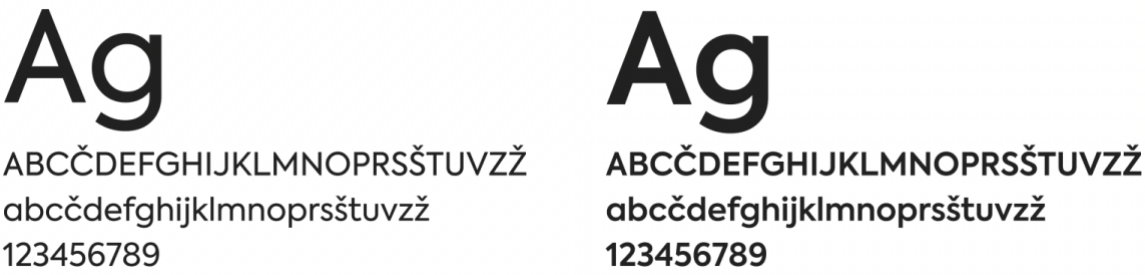
Slika 2: Žični modeli

Žične modele smo nato vizualno in oblikovno nadgradili. Želeli smo zagotoviti enoten in konsistenten videz skozi celotno aplikacijo, zato smo predhodno določili glavne oblikovalske elemente, vključno z barvami, tipografijo, ikonami in gumbi. Izbrali smo nevtralne barvne odtenke, modro za poudarke, ter rdečo in zeleno za prikaz odhodkov in prihodkov (slika 3).



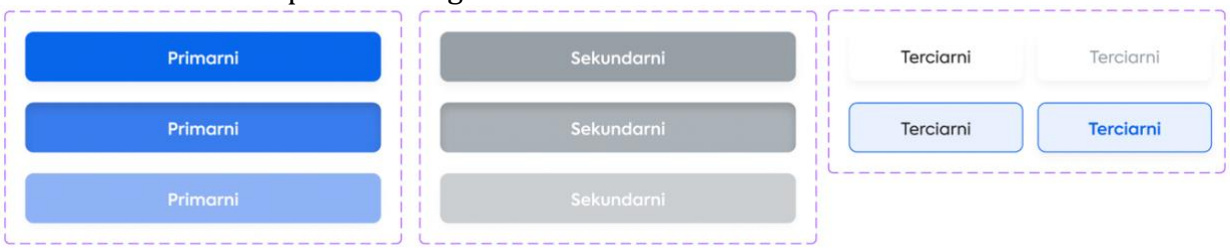
Slika 3: Uporabljene barve

Iskali smo moderno, čisto, linearno pisavo, ki je čitljiva in dobro berljiva tudi v manjših velikostih ter hkrati izraža profesionalnost. Vse te lastnosti smo našli v pisavi Axiforma (slika 4), katero smo uporabili v aplikaciji. Pred začetkom smo določili štiri različne velikosti naslovov v polkrepki različici ter dve različni velikosti za besedila v navadni različici. Na ta način zagotovimo konsistentno velikost naslovov in besedil skozi celotno aplikacijo, kar pripomore k boljši uporabniški izkušnji in profesionalnemu videzu.



Slika 4: Uporabljena tipografija Axiforma

Ikone smo pridobili iz Heroicons [4], kjer smo izbrali obrisne različice (*angl.* outline) za jasnost in prepoznavnost. Pri izbiri smo bili pozorni, da dobro prikažejo svoj pomen. Robove posameznih komponent in gumbov smo zaoblili, kar aplikaciji daje prijaznejši videz. Natančno smo določili izgled primarnega, sekundarnega in terciarnega gumba, kot je prikazano na sliki 5, in jim določili različna stanja – privzeto, aktivno, onemogočeno ter izbrano oziroma neizbrano. Primarni gumb je modre barve in izpostavljen za ključne akcije, medtem ko je sekundarni gumb nevtralne barve za manj izstopajoče funkcije. Terciarni gumb pa je namenjen izbiri med več možnostmi. S tem smo pravtako zagotovili vizualno doslednost.



Slika 5: Primarni, sekundarni in terciarni gumb

Pri nadaljnjem oblikovanju smo dosledno upoštevali vse določene oblikovalske elemente. Posamezne zaslone smo med seboj povezali, s čimer smo dobili končni prototip aplikacije, ki je prikazan na sliki 6.



Slika 6: Končni izgleda aplikacije Soldi

3 Metodologija

Vrednotenje uporabniške izkušnje je ključno za razumevanje, kako uporabniki dojemajo neko storitev oziroma produkt, kar omogoča pridobivanje povratnih informacij o njeni ustreznosti in učinkovitosti. Če je mnenje uporabnikov slabo, to pomeni, da ali storitev ni primerna, ali pa ciljna skupina ni pravilno izbrana. Zato smo tudi predhodno opravili analizo trga, kjer smo definirali ciljne skupine, na podlagi katerih smo potem izbrali 12 uporabnikov za nadaljno vrednostenje. Program Figma je omogočil enostaven prikaz prototipa aplikacije na telefonu, kar je udeležencem dalo dober občutek o končni aplikaciji. Celoten proces je bil podrobno spremljan in zabeležen. [2]

Vrednotenje je bilo izvedeno po metodi hitrega vrednostenja, z enakimi mobilnimi telefoni za vse udeležence. Postopek je bil razdeljen na tri glavne dele:

1. Pridobitev soglasja in spoznavanje udeležencev: Udeleženci so pred začetkom izpolnili soglasje o sodelovanju in odgovorili na vprašanja o svojih osnovnih informacijah in izkušnjah s tehnologijami za pregledovanje financ.
2. Izvajanje scenarijev in izpolnjevanje standardnih vprašalnikov: Udeleženci so na telefonu s prototipom aplikacije izvedli uvodni scenarij – proces vkrcavanja (angl. on boarding) in štiri testne scenarije. Po vsakem scenariju so morali oceniti zahtevnost naloge. Scenariji so bili razdeljeni naključno s pomočjo metode Latin Square[5], kar je pomagalo zagotoviti učinkovito vrednotenje vseh možnih kombinacij uporabniških interakcij. Po opravljenih scenarijih so izpolnili dva standardna vprašalnika, UEQ [6] in MeCUE[7].

3. Pridobitev končnih vtisov: Po izpolnitvi standardnih vprašalnikov smo udeležencem zastavili nekaj vprašanj o njihovi izkušnji z aplikacijo, s poudarkom na odprtih vprašanjih, da bi pridobili čim več povratnih informacij.

Scenariji so zajemali osnovne funkcionalnosti aplikacije:

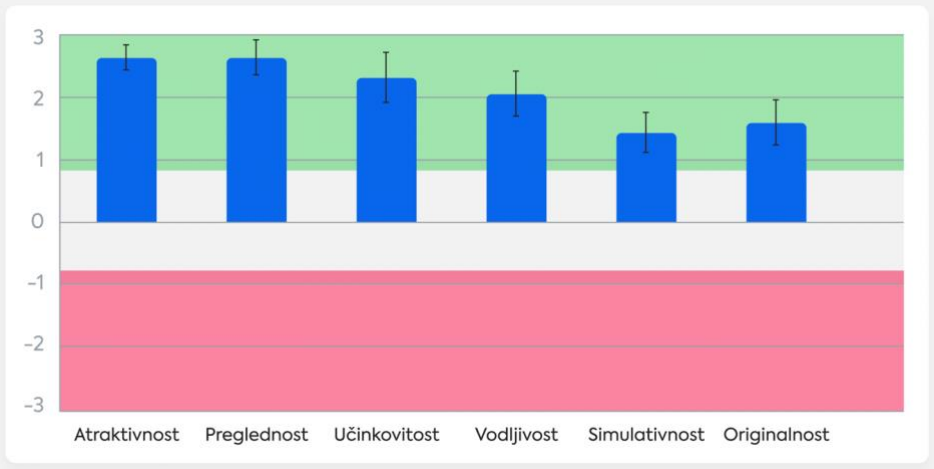
- Scenarij A: Vnos določenega stroška v aplikacijo.
- Scenarij B: Dodajanje ponavljajočega odhodka.
- Scenarij C: Nastavitev opomnika.
- Scenarij D: Dodajanje novega denarnega računa.

Vrednotenje je bilo opravljeno na majhnem številu uporabnikov, zato so bila uporabljena vprašanja odprtega tipa za pridobivanje čim več povratnih informacij. Uporabljeni so bili tudi vprašalniki zaprtega tipa, kot sta UEQ in MeCUE, da bi zmanjšali napačno razumevanje vprašanj in interpretacijo odgovorov.

4 Rezultati in razprava

Rezultati so pokazali, da so vsi udeleženci uspešno opravili scenarije v manj kot petih minutah. Dodajanje stroška (Scenarij A) in dodajanje novega denarnega računa (Scenarij D) sta bila ocenjena kot zelo enostavna. Pri vnosu ponavljajočega stroška (Scenarij B) so nekateri uporabniki naleteli na manjše težave, vendar so na koncu uspešno zaključili nalogo. Prav tako je dodajanje opomnikov (Scenarij C) povzročalo manjše zaplete, vendar je bila naloga ocenjena kot relativno nezahtevna.

Rezultati vprašalnika UEQ so prikazani na sliki 7 in so pokazali visoke ocene za atraktivnost, preglednost in učinkovitost aplikacije, medtem ko je stimulativnost prejela najnižje ocene. Vprašalnik MeCUE je dodatno osvetlil uporabniško izkušnjo, vendar so rezultati teh vprašalnikov pokazali, da obstaja prostor za izboljšave, predvsem glede stimulativnosti in originalnosti aplikacije.



Slika 7: Rezultati vprašalnika UEQ s povprečnimi vrednostmi in 95–odstotnimi intervali zaupanja.

5 Zaključki

V tej raziskavi smo potrdili dobro uporabniško izkušnjo aplikacije, ki smo jo načrtovali, preko odprtih vprašanj in standardnega vrednotenja z dvanajstimi uporabniki, ki so ustrezali našim ciljnim skupinam. Glede na dobljene rezultate lahko sklepamo, da smo izpolnili cilje raziskave in ustvarili dobro uporabniško izkušnjo pri uporabi aplikacije. Ugotovljeno je bilo, da aplikacija dobro deluje v osnovnih funkcionalnostih, vendar so potrebne nekatere izboljšave glede ponavljajočih stroškov in opomnikov. Pridobljene povratne informacije bodo koristne za nadaljnje morebitne izboljšave aplikacije, s katerimi bomo še bolje zadostili potrebam in pričakovanjem uporabnikov.

Na podlagi pridobljenih rezultatov in povratnih informacij bi bilo koristno raziskati možnosti za optimizacijo funkcij za ponavljajoče stroške in opomnike, saj so uporabniki izpostavili potrebo po izboljšavah na tem področju. Poleg tega bi bilo smiselno razširiti obseg uporabniških testiranj, da bi pridobili še širši spekter povratnih informacij in tako bolje razumeli različne potrebe uporabnikov. Nadaljnje raziskave bi se lahko osredotočile tudi na integracijo dodatnih funkcionalnosti, ki bi uporabnikom omogočile še bolj celovito in prilagodljivo upravljanje financ.

6 Literatura

[1] User experience. V *ProductPlan* [dostopno na daljavo]. [citirano 27. 6. 2024]. Dostopno na svetovnem spletu: <https://www.productplan.com/glossary/user-experience/>.

[2] KRUG S. *Don't Make Me Think: A Common Sense Approach to Web Usability, Second Edition*. New riders : , 2006.

[3] What is user Experience(UX)?. V *UXPA International* [dostopno na daljavo]. [citirano 27. 6. 2024]. Dostopno na svetovnem spletu: <https://uxpa.org/about-ux/>.

[4] Beautiful hand-crafted SVG icons, by the makers of Tailwind CSS. V *Heroicons* [dostopno na daljavo]. [citirano 30. 6. 2024]. Dostopno na svetovnem spletu: <https://heroicons.com>.

[5] Balanced latin square generator. V *Damien Masson* [dostopno na daljavo]. [citirano 30. 6. 2024]. Dostopno na svetovnem spletu: <https://cs.uwaterloo.ca/dmasson/tools/latin_square/>.

[6] User Experience Questionnaire. V *User Experience Questionnaire* [dostopno na daljavo]. [citirano 30. 6. 2024]. Dostopno na svetovnem spletu: <https://www.ueq-online.org/>.

[7] MeCUE 2.0. V *MeCUE 2.0* [dostopno na daljavo]. [citirano 30. 6. 2024]. Dostopno na svetovnem spletu: <https://mecue.de/english/home.html>.

VPLIV TLAKA POLNJENJA IN NELINEARNOSTI ODZIVA MATERIALA NA ODBOJ ŽOGE

Mija Brojan

Povzetek

Pri številnih športih in prostočasnih igrah uporabljamo žogo. Za učinkovitost igre je pomembno, da je tlak v žogi ravno pravšnji. V tem prispevku se bomo osredotočili na opazovanje vpliva tlaka napolnjenosti žoge na njen odboj, izgubo energije ter odziv materiala, za katerega pričakujemo, da bo nelinearen. Med drugim bomo upoštevali še vpliv zračnega upora na izgubo energije. Iz praktičnega izvajanja različnih športov z žogo gre pričakovati, da bo posledica padanja tlaka napolnjenosti nižji odboj žoge in relativno večja izguba energije. Za potrebe razumevanja pomena tlaka napolnjenosti smo se odločili za izvedbo eksperimenta, pri katerem smo preverili odnos tlaka v žogi, njen obseg in višino odboja pri treh različnih začetnih višinah (pri 200, 150 in 100 cm) pri prostem padu in preprostih izračunov.

1 Uvod

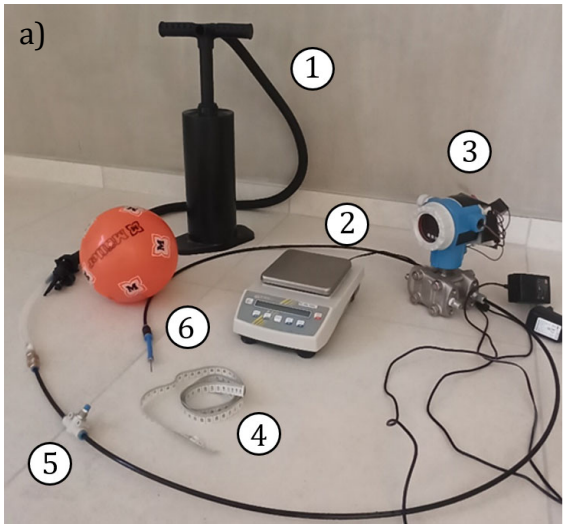
Pri številnih športih in prostočasnih igrah uporabljamo žogo. Ne glede na znanje in tehniko športnika/igralca je pri igrah z žogo pravilna napolnjenost žoge z zrakom pomembna za dober nadzor njenega gibanja. To je še posebej pomembno pri tistih športih, pri katerih je potrebno vodenje žoge. Pri igri in pogostemu ponavljanju gibov se igralec navadi na določene lastnosti, ki jih ima žoga pri odboju od tal, udarcih pri tenisu ali npr. težo pri metih na koš, strelom v gol, podaji ali udarcu itn. Vemo, da ob nezadostnem tlaku žoga ni uporabna, ker ni dovolj prožna, v primeru previsokega tlaka napolnjenosti žoge, pa ne omogoča njenega ustreznega nadzora. Že najmanjša sprememba predvsem napolnjenosti z zrakom po navadi zelo moti igralca in mu otežuje izvajanje gibanja ali strelov oz. udarcev, kot jih je vajen. Nenazadnje sta zelo pomembna tudi oblika in podlaga, ampak ju v tem prispevku ne bomo obravnavali.

Na področju raziskovanja odboja žoge je bilo opravljenih precej raziskav. V raziskovalni nalogi [1] so se ukvarjali z vprašanjem kako tlak v nogometni žogi in vrsta podlage vplivata na igro. S pomočjo eksperimentov so bile uporabljene štiri žoge licencirane s strani mednarodne nogometne organizacije FIFA. Napolnjene so bile s štirimi različnimi tlaki ter preizkušene na štirih različnih podlagah. Izvedeni so bili poskusi kotaljenja, odboja in vodoravnega meta, s čimer so bili ponazorjeni elementi v nogometni igri. Ugotovljeno je bilo, da se žoga z najvišjim tlakom odbije najvišje, prav tako se kotali najdlje, medtem ko let zaradi povratnega udarca žoge v bat ni najdaljši. Žoga z najnižjim tlakom se je najmanj odbila, kotalila in letela. Pri primerjavi površin je bilo ugotovljeno, da največ trenja ustvarja umetna trava, za njo pa po vrsti naravna

trava, beton in parket. Po vseh izvedenih meritvah in poskusih je bilo potrjeno, da mora biti žoga za normalno igro napolnjena z ustreznim tlakom. V prispevku [2] so se ukvarjali s preučevanjem odboja žoge. Zopet so s pomočjo eksperimentov spremljali odboj različnih vrst žog pri različnih tlakih napolnjenosti ter različne vrste podlag. Kot v prej omenjeni raziskavi je bilo ugotovljeno, da se žoga z večjim tlakom odbije višje. Prav tako je odboj višji pri podlagah z manj trenja. V [3] je opisan poskus za ugotavljanje vpliva različnih zračnih tlakov na višino odboja in hitrost košarkarske žoge. Poskus je vključeval metanje košarkarske žoge z višine 2 metrov in merjenje njene največje višine odboja s palico in kamero. Višina odboja je bila nato uporabljena za izračun hitrosti odboja s pomočjo enačbe ohranjanja energije. Rezultati so pokazali linearno odvisnost med tlakom in višino odboja ter hitrostjo, vendar so bile razlike majhne, saj se je višina odboja pri napolnjenosti z 4,5 psi in 9 psi razlikovala le za 1,4 %, hitrost pa za 0,7 %. Prispevek [4] se ravno tako osredotoča na podoben preprost eksperiment odboja žogice za namizni tenis, v katerem merijo izgubo višine po odboju in s tem izgubo energije z različnih višin in na različnih podlagah. V študiji [5] so za raziskavo uporabili 4 žogice z različnimi lastnostmi, pri katerih so opazovali odboj posamezne žoge in ga s pomočjo posnetka zabeležili v graf. Za poskus so uporabili ravnilo s merilno skalo, štoparico, kamero. Pri žogicah so zabeležili material, sestavo (votlo/polno), velikost in maso. Izbrali so 4 višine spusta žogice. Izvedena sta bila dva poskusa. Pri prvem so merili višino odboja, pri drugem pa so merili čas odbijanja žogice, preden obmiruje. S poskusoma dokažejo, da podobna velikost, masa ali sestava še ne zagotovijo podobnih rezultatov.

2 Metode dela in potek raziskave

Za pripravo prispevka smo uporabili različne raziskovalne metode. V prvem koraku smo si postavili raziskovalno vprašanje, na katerega bomo odgovorili: Kako tlak v žogi vpliva na odboj žoge in kako na to vpliva odziv materiala? Zanimalo pa nas bo tudi, koliko energije se izgubi. V ta namen smo načrtovali postopek eksperimenta in izbrali pripomočke, ki jih potrebujemo za izvajanje (predstavljeni so na Sliki 1a). Za eksperiment smo uporabili otroško žogo. S pomočjo zračne tlačilke, tlačnega merilnika Endress-Hauser-PMD75, ki ima natančnost merjenja na 1 mbar, in zračnega ventila smo določevali zračni tlak v žogi. Za meritve smo uporabili žogo pri štirih različni vrednostih zračnega tlaka p v žogi, tj. 76, 126, 171, in 222 hPa. S šiviljskim metrom smo izmerili obseg o žoge s pomočjo katerega smo izračunali prostornino žoge V pri izbranem tlaku. Za določitev mase smo uporabili tehtnico KERN KB 2400, ki ima natančnost merjenja na 0,01 g. Na steno smo namestili merilno skalo s pomočjo katere smo določili začetno višino spusta žoge in določili višino njenega odboja. Žogo smo spustili z začetne višine 200, 150 in 100 cm, (kot kaže Slika 1b). Za vsako začetno višino smo izvedli tri ponovitve.



1 zračna tlačilka

2 precizna tehtnica

3 senzor za merjenje tlaka

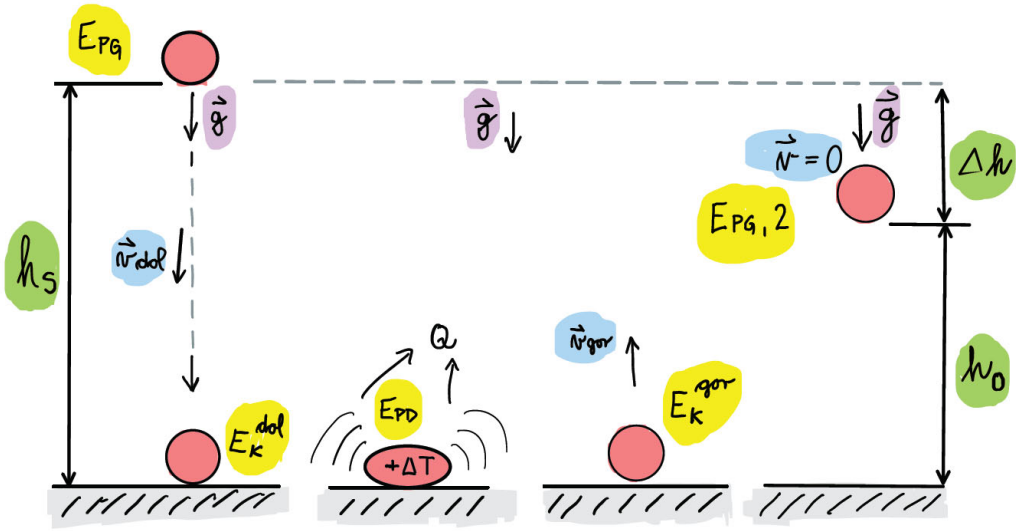
4 šiviljski meter

5 ventil

6 igla za polnjenje žoge

Slika 1: a) Pripomočki za izvedbo eksperimenta. b) merilna skala.

Žogo smo spustili iz treh različnih višin, pri čemer so imele različno gravitacijsko potencialno energijo E_{PG}, ki se med padanjem spreminja v kinetično E_K. V obliki skice to prikazuje Slika 2.



Slika 2: Skica spreminjanja energij pri padanju žoge.

Na začetku (pred metom) imamo gravitacijsko potencialno energijo E_{PG}. Med metom se potencialna energija s spreminjanjem višine spreminja v kinetično E_K, ki doseže največjo vrednost tik pred dotikom žoge s tlemi. Ob dotiku žoge s tlemi se zgodi trk, ob katerem se del te kinetične energije spremeni v potencialno energijo deformacije E_{PD}, del pa se odda v okolico v obliki toplote Q. Žoga je narejena iz nepopolno elastičnega materiala, zaradi česar je energija deformacije sestavljena iz elastične in neelastične deformacije. Poleg materiala se ob trku stisne tudi zrak, s katerim je napolnjena žoga. Ob trku s tlemi, ko se material deformira, nastanejo izgube, ki se kažejo v obliki oddane toplote Q. Izgube, zaradi oddaje toplote v okolico, tako pripišemo nastanku in širjenju zvoka po zraku, (nekaj malega) segretju zraka v žogi ter v

največji meri izgubam pri deformaciji žoge zaradi materiala, ki ni idealno elastičen (temu rečemo izguba zaradi viskoznosti materiala žoge) ter trenju med žogo in tlemi ob stiku, ki nastane ob trku. Tik pred trkom tako velja: $E_{PG} = E_K$, takoj po trku: $E_K = E_{PD} + Q$, kjer smo v členu Q upoštevali izgube zaradi neelastičnosti viskoznosti materiala, trenju ob trku med tlemi in žogo, nastanku zvoka, ter segretju zraka v žogi.

Po trku je edini del energije, ki se lahko povrne, potencialna energija zaradi deformacije E_{PD}. Ker je $E_{PD} < E_K$, to pomeni, da je kinetična energija pri odboju E_K(gor) manjša od kinetične energije tik pred odbojem E_K(dol) oziroma E_K(gor) < E_K(dol). Po odboju se bo kinetična energija E_K(gor) spremenila v gravitacijsko potencialno E_{PG}(po odboju), ki pa bo zaradi tega manjša od E_{PG}(pred odbojem) oziroma E_{PG}(po odboju) < E_{PG}(pred odbojem). Iz enačbe za izračun gravitacijske potencialne energije $E_{PG} = mgh$ (pri čemer so m masa telesa, g gravitacijska konstanta in h višina) je potem jasno, da bo kočno dosežena višina po odboju manjša od višine iz katere smo na začetku spustili žogo. To bomo tudi izmerili in izračunali ter primerjali dobljene rezultate.

3 Rezultati

3.1 Rezultati meritev

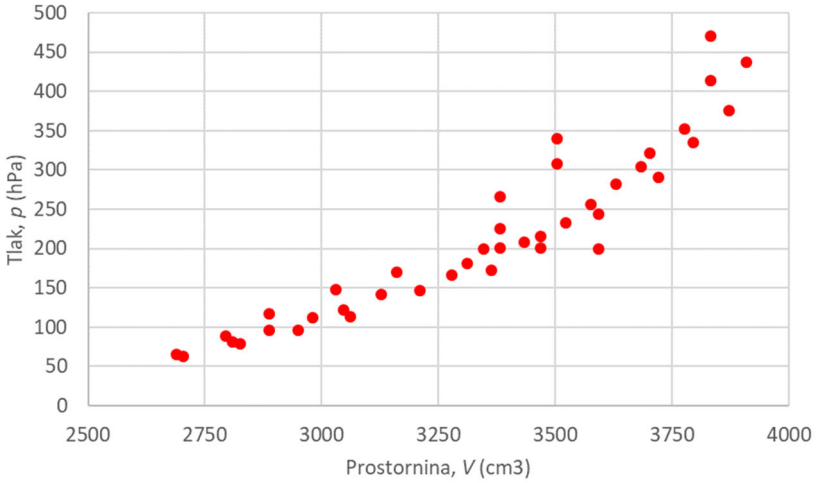
Pri štirih velikostih tlaka p (hPa) smo na treh različnih višinah spusta h_S (cm) merili višino odboja h_O (cm). Izbrali smo višine 200, 150 in 100 cm. Pri vsaki višini smo izvedli tri ponovitve in za končni rezultat h_S izračunali srednjo vrednost. Rezultati odboja pri različnih tlakih v žogi in višini spusta žoge so prikazani v Tabeli 1.

Tabela 1: Rezultati meritev višine odboja pri različnih tlakih polnjenja žoge in višinah spusta

p (hPa)	h_S (cm)	h_O (cm)
385,5	200	118,0
385,5	150	93,7
385,5	100	66,3
245,2	200	107,3
245,2	150	85,3
245,2	100	62,0
182,5	200	99,0
182,5	150	79,7
182,5	100	57,0
125,6	200	87,3
125,6	150	70,7
125,6	100	51,3

Na Sliki 3 je prikazana povezava med tlakom napolnjenosti žoge p (hPa) in spremembo njene prostornine ΔV (cm^3). Pri tem tlak predstavlja obremenitev žoge, sprememba prostornina pa

njeno deformacijo. Če bi bila dobljena porazdelitev v ravni črti, bi to pomenilo odziv žoge na tlak linearen. Ker pa po celotnem območju merjenja dobljena porazdelitev ni ravna (je ukrivljena), to pomeni, da je odziv žoge na polnjenje s tlakom nelinearen. Iz porazdelitve opazimo, da je na začetku pri manjšem tlaku potrebno manj dodatka tlaka za neko povečanje prostornine, kot pri večjih tlakih. Če vzamemo npr. povečanje za 250 cm^3, je na začetku potrebnih približno 50 hPa dodatka tlaka, na koncu pa je za isto povečanje prostornine potrebno približno 150 hPa tlaka. To pomeni, da se pri večji obremenitvi žoga obnaša kot približno 3x bolj toga. Predvidevamo, da bo to vplivalo na njeno odbojnost.



Slika 3: Povezava med tlakom napolnjenosti žoge in spremembo njene prostornine.

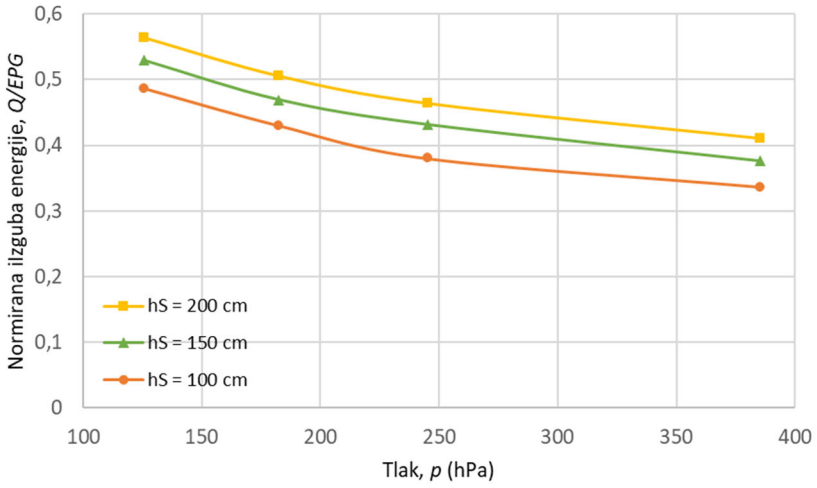
3.2 Rezultati izračunov

S pomočjo formul izračunamo gravitacijsko potencialno energijo in kinetično energijo

$$E_{\mathrm{PG}} = mgh, \tag{1}$$

$$E_{\mathrm{K}} = \frac{1}{2}mv^2, \tag{2}$$

pri čemer sta m in v masa in hitrost telesa, h je višina, na katerem je telo, g pa je gravitacijska konstanta. Iz meritev, katerih rezultati so prikazani v tabeli 1 in enačb (1) in (2), pridobimo podatke za diagrame na Sliki 3. Izguba energije Q je normirana s potencialno energijo žoge na višini spusta. V skladu s pričakovanim in izkušnjami pri igrah z žogo, opazimo, da z večanjem tlaka izgube energije padajo za vse tri višine spusta h_S = 200, 150, 100 cm. To pripišemo večji togosti, ki jo ima material pri večjih tlakih (prbl. 3x večji v območju z velikim tlakom v primerjavi z območjem z manjšim tlakom) in manjšemu vplivu neelastičnosti v materialu v primerjavi z elastičnostjo.



Slika 4: Normirana izguba energije za različne tlake napolnjenosti žoge in višine spusta, h_S = 200, 150, 100 cm.

Zanimivost, ki jo opazimo, je da izguba višine oz. energije za različne višine spusta različna in se veča z večjo višino spusta h_S. To pripišemo zračnemu uporu. Sila zračnega upora je odvisna od gostote zraka ρ, hitrosti telesa v relativno glede na tok medija v katerem potuje, površino preseka telesa A in njegove oblike, ki jo ponavadi vnesemo v enačbo prek koeficienta C_D, [7,8]. Silo izračunamo po enačbi

$$F_U = \frac{1}{2}\rho\, v^2\, C_D A. \tag{3}$$

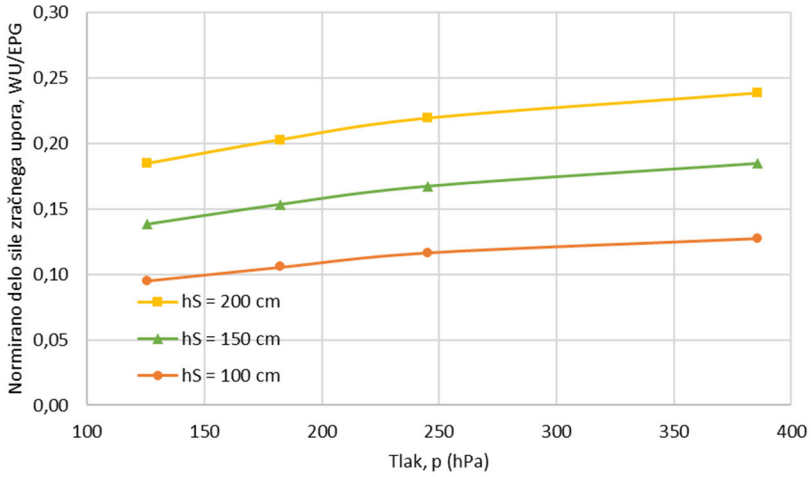
Za telesa v obliki krogle je koeficient upora enak C_D = 0,47, [7,8].

Izguba energije zaradi zračnega upora je enaka delu sile upora po poti, ki jo opravi med padanjem in vzpenjanjem. Za poenostavitev izračuna dela sile zračnega upora W_U bomo predpostavili, da tudi tik pred trkom velja $E_{PG}(z) = E_K$ oziroma $mgz = mv^2/2$, od koder dobimo $v^2 = 2gz$, pri čemer je z višina v gravitacijskem polju. Ta izraz vstavimo v enačbo (3) in dobimo $F_U(z) = \rho C_D A 2gz/2 = \rho C_D A g z$, kar pa pomeni, da je sila zračnega upora F_U linearno odvisna od višine z. To pa je enako, kot pri vzmeti, kjer je delo sile, ki napenja vzmet $W_V = kx^2/2$, kjer je k koeficient vzmeti, x pa njen raztezek. Iz tega sledi

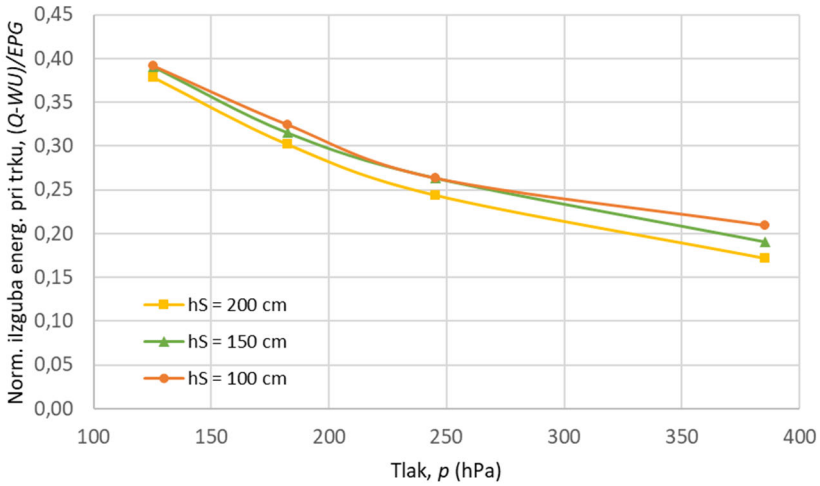
$$W_U = \frac{1}{2}\rho g A C_D z^2. \tag{4}$$

Izguba energije zaradi dela, ki ga pri padanju in vzpenjanju pred in po trku opravi sila zračnega upora je za različne višine pri različnih tlakih napolnjenosti žoge podana Sliki 5. Delo sile zračnega upora je normirano s potencialno energijo žoge na višini spusta. Pri tem smo upoštevali, da je presek žoge A pri različnih tlakih p različen. Presek A je odvisen od tlaka napolnjenosti žoge p, kar lahko razberemo iz Slike 1, če iz dobljene prostornine pri nekem tlaku izračunamo radij žoge. Na sliki 4b) je prikazana normirana izguba energije pri trku za različne tlake napolnjenosti žoge in višine spusta, h_S = 200, 150, 100 cm, z upoštevanjem izgub zaradi zračnega upora. To pomeni, da je v te izgube vključena le izguba energije pri trku. Kot smo pisali že v uvodu, to izgubo energije pripisujemo trenju med žogo in podlago, neelastični deformaciji žoge, pojavu zvoka ter segrevanju zraka v žogi ob trku. Enako, kot prej je izguba energije pri

trku normirana s potencialno energijo žoge na višini spusta. Iz Slike 5 je razviden pričakovan rezultat, da je največ izgub zaradi zračnega upora pri spustu iz večje višine, saj takrat žoga doseže največjo hitrost. Pričakovan pa je tudi porast izgub zaradi zračnega upora pri večjem tlaku, saj ima takrat žoga večji premer. Tako hitrost, kot tudi presek nastopata v enačbi (3) za izračun sile zračnega upora.



Slika 5: Normirano delo sile zračnega upora za različne tlake napolnjenosti žoge in višine spusta, h_S = 200, 150, 100 cm.



Slika 6: Normirana izguba energije pri trku za različne tlake napolnjenosti žoge in višine spusta, h_S = 200, 150, 100 cm in upoštevanjem zračnega upora.

Zanimiv rezultat pa dobimo, če pri izgubah energije odštejemo del zaradi zračnega upora. To je prikazano na Sliki 6. Primerjava s Sliko 4 pokaže, da so sedaj izgube pri spustu z večje višine manjše, kar pripišemo manjši izgubi energije zaradi neelastičnih pojavov v materialu, ki so manj intenzivni pri večjih hitrostih deformacije (žoga pri spustu z večje višine namreč trči ob tla z večjo hitrostjo).

4 Zaključki

Cilj prispevka je bilo odgovoriti na raziskovalno vprašanje kako tlak v žogi vpliva na odboj žoge in kako na to vpliva odziv materiala. Odgovor smo iskali s pomočjo izvedbe eksperimenta in preprostih izračunov. Pri analizi rezultatov meritev in izračunih smo prišli do več ugotovitev. Pri povezavi med tlakom napolnjenosti žoge p (hPa) in spremembo njene prostornine ΔV (cm^3) smo ugotovili, da je odnos nelinearen, kar pomeni, da je odziv žoge na polnjenje s tlakom nelinearen. Opazili smo, da je na začetku pri manjšem tlaku potrebno manj dodatka tlaka za neko povečanje prostornine, kot pri večjih tlakih in sicer, da se pri večji obremenitvi žoga obnaša kot približno 3x bolj toga, zaradi česar smo zaključili, da ima pri višjih tlakih manj izgub energije, odboj pa je bolj elastičen. Zanimivost, ki smo jo opazili je, da je izguba višine oz. energije za različne višine spusta različna in se povečuje z večjo višino spusta h_S, kar smo pripisali zračnemu uporu. Preprost izračun je pokazal, da je to res. Izkazalo se je tudi, da je v primeru upoštevanja zračnega upora izguba energije pri spustu z večje višine manjša, kar pripišemo manjši izgubi energije zaradi neelastičnih pojavov v materialu, ki so manj intenzivni pri večjih hitrostih deformacije (žoga pri spustu z večje višine namreč trči ob tla z večjo hitrostjo).

S pridobljenimi rezultati lahko potrdimo, da je za uspešno izvajanje aktivnosti z žogo pri različnih športih izjemno pomembna višina zračnega tlaka v žogi. Za nadaljnje raziskave predlagamo upoštevanje še drugih parametrov kot npr. vrsto podlage in bolj podrobna analiza trenja med žogo in podlago med trkom.

5 Literatura

[1] Rok Hudournik: Vpliv podlage in tlaka v žogi na nogometno igro, (Mentor: Igor Košak), OŠ Šalek, 2019. link: https://mladiraziskovalci.scv.si/naloga?id=1737, dostop: 5.6.2024

[2] Nejc Medvešček: Igre z žogo v fizikalni učilnici, (Mentor: Milena Valentan), OŠ Majde Vrhovnik, 2021. link: https://zbirke.zotks.si/2021/resources/OS_Astronomija_ali_fizika_638762.pdf, dostop: 5.6.2024

[3] M. Nesa: Effect of pressure in ball bounce height. Green university of Bangladesh, 2021. link: https://www.slideshare.net/slideshow/effect-of-pressure-in-ball-bounce-height/250091878 dostop: 5.6.2024.

[4] The Dynamics of a Bouncing Ball. https://www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/project-ideas/Sports_p007/sports-science/ball-bouncing-dynamics dostop: 5.6.2024

[5] Teach Engineering: Reverse Engineering: Ball Bounce Experiment. dostop: 5.6.2024

[6] Zračni upor: https://sl.wikipedia.org/wiki/Upor_sredstva (dostop: 17.8.2024)

[7] Koeficient zračnega upora za kroglo: https://sl.wikipedia.org/wiki/Koeficient_upora (dostop: 17.8.2024)

Na podatkih hitre kamere temelječa podatkovna identifikacija mehanskih lastnosti

Marcel Čarman

Povzetek

Določanje mehanskih lastnosti konstrukcij je lahko zapleten in zamuden postopek, ki zahteva obsežno predpripravo preizkušanca za testiranje. Napredki na področju umetne inteligence, strojnega vida in strojnega učenja omogočajo poenostavitev in pohitritev tega postopka. V tem članku je podrobno predstavljena in obrazložena arhitektura uporabljene konvolucijske nevronske mreže, ki na podlagi vhodnih parametrov, pridobljenih z vibracijskim testom, napoveduje mehanske lastnosti preizkušanca. Nevronska mreža je natrenirana na podlagi podatkov analitičnega modela preizkušanca, napoved mehanskih lastnosti pa izvedena na podlagi meritve pomikov, pridobljenih z metodami strojnega vida, in lastnih frekvenc, pridobljenih z metodo obratovalne modalne analize, za konzolno vpete 3D tiskane nosilce. Uporabljena je bila koda v jeziku Python, ki temelji na že obstoječih odprtokodnih paketih. Z uporabo naprednih tehnologij lahko izboljšamo in pospešimo proces določevanja mehanskih lastnosti, kar prinaša velike prednosti za industrijo. Z uporabo konvolucijskih nevronskih mrež in strojnega vida je mogoče učinkovito napovedovati mehanske lastnosti brez obsežne predpriprave. To omogoča hitrejše in natančnejše rezultate, kar je ključnega pomena za hitrejši razvoj in boljše prilagajanje potrebam trga. Članek ne le predstavlja teoretične osnove in praktične pristope, temveč tudi poudarja pomen teh inovacij v sodobni industriji. Na koncu so predstavljene možne razširitve oziroma spremembe za merjenje drugih veličin.

1 Uvod

Določanje mehanskih in dinamskih lastnosti konstrukcij je obsežen in zamuden proces, ki zahteva natančno pripravo preizkušanca, prilagoditev delovnega okolja ter premišljeno izbiro ustreznih orodij in nastavitev. Izvajalec mora imeti dobro znanje mehanike za ustrezno analizo in interpretacijo rezultatov. Pogosto se pojavijo težave, ko je del konstrukcije težko ločljiv od preostalega dela ali ko niso znane vse mehanske lastnosti preizkušanca. To je posebej izrazito pri 3D tiskanih konstrukcijah, kjer mehanske lastnosti niso odvisne le od geometrije, ampak tudi od nastavitev tiskanja, kot so vzorec za zapolnitev, delež zapolnitve (ang. *infill*), kot tiskanja, material itd. Pri konvencionalnih metodah je težko natančno napovedati vpliv posameznih nastavitev naenkrat [1]. Če želimo meriti tudi dinamične lastnosti, postane postopek še

bolj zapleten zaradi upoštevanja robnih pogojev oz. pri dinamskih problemih je to predstavlja njihovo vpetje. Pri ustvarjanju matematičnega modela je pomembno, kako dobro popišemo robne pogoje oz. kako dobro zajamemo neidealnost vpetja. Industrija si prizadeva za hitre postopke in minimalno invazivne metode, saj demontaža in montaža konstrukcije povzročata motnje v delovanju strojev in izgubo dohodka za podjetje. Napredek na področju umetne inteligence (ang. *Artificial Intelligence, AI*) omogoča, da postanejo danes resničnost stvari, ki so bile nekoč le znanstvena fantastika. Z naprednimi tehnologijami, kot so strojno učenje in strojni vid, je zdaj mogoče določiti mehanske lastnosti preizkušancev bolj učinkovito in brez obsežne predpriprave. Te inovacije pospešujejo proces testiranja in omogočajo podjetjem hitrejše ter učinkovitejše odzivanje na potrebe trga. Zaradi popularizacije AI se ta tehnologija pogosto uporablja za modalno analizo, zlasti v gradbeništvu za napoved nihanja stavb [2]. Na podlagi podatkov, pridobljenih s hitrimi kamerami in obratovalno modalno analizo, bomo s pomočjo konvolucijske nevronske mreže (ang. *Convolutional Neural Networks, CNN*) predlagali metodo za določanje mehanskih lastnosti nosilcev v dinamskih preizkusih. V eksperimentu so bili uporabljeni trije nosilci različnih dolžin in prereza $5 \times 5\ mm^2$ iz materiala PLA.

2 Metode dela in potek raziskave

2.1 Priprava preizkušancev in Euler - Bernoullijevi nosilci

Za ekspeirment so bili uporabljeni tanki nosilci iz materiala PLA, ki so bili tiskani z naslednjimi nastavitvami:

- 10% infill z vzorcem Gyroid.
- Kvadratni prerez dimenzije 5×5 mm^2.
- Tiskano pod 90° kotom.
- Debelino ekstruzijskega filamenta je bila 0,4 mm.

Nastavitvene za tiskanje so bile nastavljene v programu PrusaSlicer in tiskano na 3D tiskalniku Original Prusa XL.
Izbrani so bili tanki nosilci, ker so se njihove lastne frekvence in nihajne oblike (ang. *mode shapes*), ki bodo predstavljale učno množico pri gradnji AI modela, lahko analitično določile preko Euler - Lagrangeove enačbe (1).

$$w(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \Big(A_n \cosh(k_n\ x) + B_n \sinh(k_n\ x) + C_n \cos(k_n\ x) + D_n \sin(k_n\ x) \Big) e^{-i\omega_n t}, \qquad (1)$$

kjer je w upogib, k_n valovno število, in A_n, B_n, C_n ter D_n koeficienti, ki so odvisni od robnih pogojev. Valovno število je odvisno od dolžine L, lastne frekvence ω_n, masne porazdelitve μ,

Youngov-ega modula E in vztrajnostnega momenta prereza I, kar je opisano v enačbi (2).

$$k_n = \left(\frac{\mu \omega_n^2}{EI} \right)^{\frac{1}{4}} \tag{2}$$

Ker sta bila robna pogoja prosti konec in konzolno vpet konec, so se primarne in sekundarne veličine zapisale kot:

- $w(0,t) = 0 \Rightarrow A_n = -C_n$
- $w'(0,t) = 0 \Rightarrow B_n = -D_n$
- $w''(L,t) = 0$
- $w'''(L,t) = 0$

Z upoštevanjem enačbe (1) in robnih pogojev smo pridobili naslednji sistem enačb zapisan v matrični obliki:

$$\begin{bmatrix} \cosh(k_n L) + \cos(k_n L) & \sinh(k_n L) + \sin(k_n L) \\ \sinh(k_n L) - \sin(k_n L) & \cosh(k_n L) + \cos(k_n L) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_n \\ B_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \tag{3}$$

kjer so rešitve sistema enačb:

$$\cosh(k_n L) \cos(k_n L) + 1 = 0 \tag{4}$$

Vrednosti A_n in B_n predstavljata vektor lastnih vrednosti v matrični enačbi (3), zato je važen le njuno razmerje opisano v enačbi (5). Za lažje računanje smo privzeli, da je $B_n = 1$.

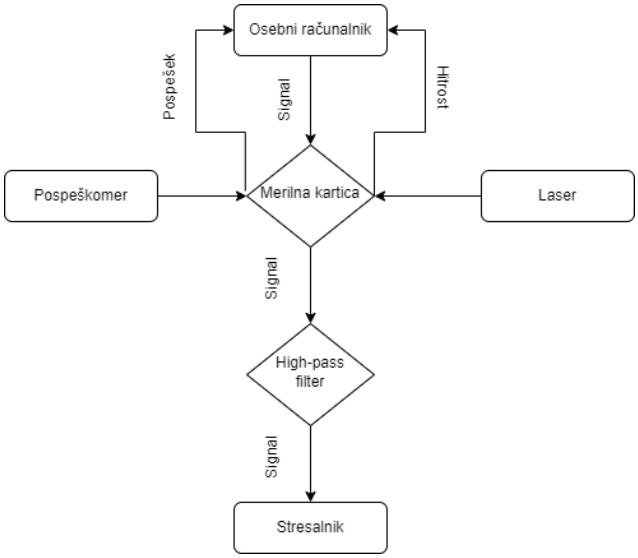
$$A_n = -B_n \frac{\sinh(k_n \cdot L) + \sin(k_n \cdot L)}{\cosh(k_n \cdot L) + \cos(k_n \cdot L)} \tag{5}$$

Rešitev je odvisna od valovnega števila oz. lastne frekvence. Čeprav smo imeli nosilec, ki je kontinualni sistem, smo se omejili na prvih 5 lastnih frekvenc, saj imajo nižje lastne frekvence večji vpliv na dinamsko obnašanje konstrukcije in omejeni smo bili s frekvenčnim razponom stresalnika. Na podlagi teorije o Euler-Bernoullijevih nosilcev, smo v Pythonu napisali kodo za določitev lastnih frekvecn in nihajnih oblik za 1000 različnih nosilcev. Koda za generiranje podatkov je objavlena na spletnem repozitoriju [3].

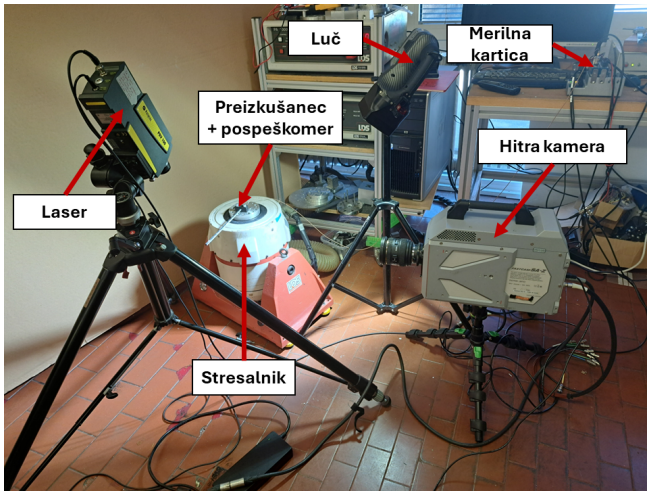
2.2 Določevanje lastnih frekvenc

Za določevanje lastnih frekvenc smo se posluževali metode obratovalne modalne analize. Konzolno vpeti nosilci so bili vzbujeni na vpetem koncu preko stresalnika (ang. *shaker*). Zraven mesta vpetja smo namestili še pospeškomer T333B30, proizvajalca PCB Piezoelectronics, ki je bil povezan na merilno kartico NI9232 skupaj z laserjem PDV 100, proizvajalca Polytec. Laser je meril odziv nosilca za začetno določitev lastnih frekvenc in podatke smo zajemali z osebnim računalnikom s pomočjo Python paketa PyDAQmx [4]. Za sinhronizacijo je skrbel osebni računalnik, kjer je tekel LabView program za sočasni začetek meritve. Signal za stresalnik je

generiral osebni računalnik z uporabo Python paketa pyExSi [5]. Za zaščito stresalnika je bil uporabljen še visoko prepustni filter (ang. *high - pass*) s kritično frekvenco 1,7 Hz. Koda, ki je bila uporabljena, je v celoti objavljena na spletnem repozitoriju [3]. Slika 1 (a) prikazuje merilno verigo. Postavitev merilnega mesta pa prikazuje slika 1 (b), kjer je še vključena hitra kamera in luč, ki smo ju uporabili pri merjenju pomikov.



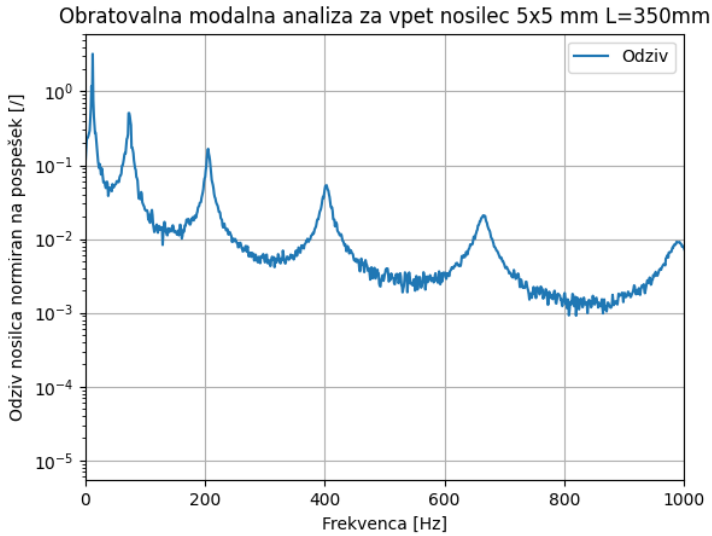
(a) Merlina veriga.



(b) Preiskuševališče.

Slika 1: Postavitev merjenja

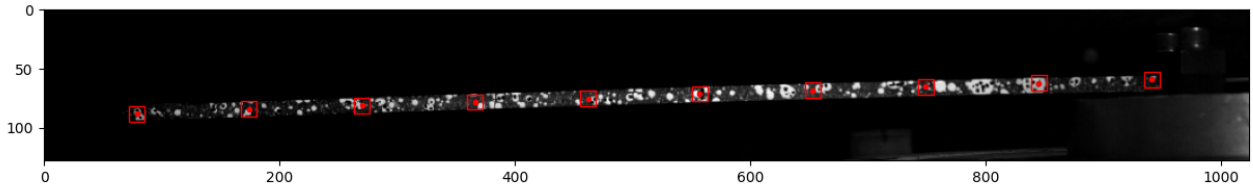
Zabeleženi podatki so bili zapisani v .lvm formatu, ki so bili nato prebrani v programu. Nadaljnja obdelava podatkov, da smo dobili amplitudno - frekvenčni diagram frekvenčne prenosne funkcije, je bila narejena po postopkih opisanih v e-knjigi J. Slaviča [6], kar prikazuje slika 2.



Slika 2: Amplitudno - frekvenčni diagram za nosilec L = 350mm

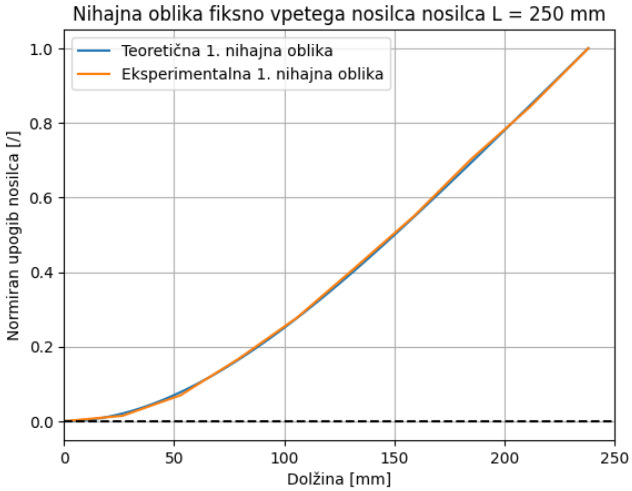
2.3 Določitev nihjanih oblik

Nosilci so bili za določitev nihajih oblik nadalje vzbujani s sinusnim signalom pri pri vsaki od petih določenih lastnih frekvenc. Njihov odziv je bil posnet s hitro kamero Photron SA-Z. Parametre za snemanje so bili določeni v programu Photron FASTCAM Viewer 4 (PFV4), proizvajalca Photron. Osebni računalnik je skrbel za sinhronizacijo preko zunaj sprožilnega signala, kjer je bil napisan program za sočasni pričetek vzbujanja in snemanja. Posnetki so bili zajeti s 10^4 slik na sekundo, kjer je vsak posnetek trajal 1 sekundo. Posnetki so bili shranjeni v .mraw formatu. Določanje pomikov je bilo izvedeno s PyIDI paketom [7]. Koda, ki je bila uporabljena za določanje pomikov, je objavlena v spletnem repozitoriju [3]. Slika 3 prikazuje program, kjer izberemo točke za sledenje. Sam nosilec je bil pred meritvami pobarvan z naključnim vzorcem (ang. *speckle pattern*), da se je tvoril gradient intenzitete pikslov. To smo storili, ker Lucas-Kanade metoda rešuje enačbo optičnega toka, kar pa potrebuje nek gradient intenzitete pikslov [8].



Slika 3: Primer nosilca z označenimi referenčnimi kvadratki za izračun pomikov.

Dobljene obratovalne oblike so bili normirani glede na največji absolutni pomik in od vsakega je bil odštet začetne točke, tako da je bila vrednost pomika v začetni točki vedno 0 in absolutna vrednost največjega pomika vedno 1. Tako smo pridobili nihanje oblike za konzolno vpetega nosilca za vsako lastno frekvenco. Slika 4 prikazuje za primer 1. nihajne oblike.

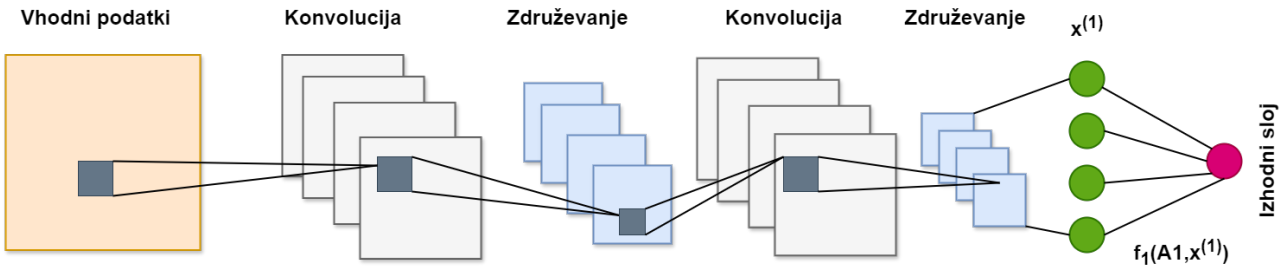


Slika 4: Primerjava eksperimentalne 1. lastne nihanje oblike s teoretično.

Dobljene vrednosti nihanjih oblik v 10 točkah za vsako lastno frekvenco in izmerjenih prvih 5 lastnih frekvenc in masna porazdelitev na enoto dolžine za vsak nosilec so bili vhodni podatki za CNN.

2.4 Konvolucijska nevronska mreža

Ustvarili smo CNN, ki izvede konvolucijo (ang. *convolution*) za vsak vhodni podatek in hkrati se nelinearizacija izvede s pomočjo aktivacijskih funckij *ReLU* in tanh [9]. Za namensko zmanjševanje razsežnosti podatkov po konvoluciji se še izvede združevanje (ang. *pooling*) in sicer globalno maksimalno združevanje. Prikazana slika 5 služi kot prikaz zaporedja izvedbe posameznih operacij, dejanska arhitetektura uporabljenega CNN je bolj kompleksna. Pri uporabljenem CNN je bil uporabljen algoritem Adam [10] za določitev uteži v nevronskem sloju ter 30% podatkov za treniranje CNN so bili rezervirani za validacijo izračuna uteži. Za ustvarjanje CNN modela je bila uporabljen paket Tensorflow [10].



Slika 5: Primer CNN

3 Rezultati

Potrebno je ovrednotit rezultate CNN. V spodnji preglednici 1 so poračunana odstopanja dolžin pridobljenih iz CNN od dejanskih ter Youngovi moduli, ki jih je napovedal CNN.

Tabela 1: Rezultati CNN

Dejanska dolžina v [mm]	**Dolžina iz CNN v [mm]**	**Odstopanje v [%]**	**Youngov modul v [MPa]**
338	310,58	8,28	10,83
288	305,36	6,03	13,02
238	237,77	-0,42	11,30

Efektivni Youngov modul 3D tiskanih materialov z delnim prerezom je težje določljiv, še posebej, če so ti materiali delno zapolnjeni s kompleksno geometrijo. V primeru treh nosilcev

z enakim prerezom, enakim zapolnitvenim vzorcem in enako geometrijo, bi morali teoretično pričakovati enak Youngov modul pri vseh treh nosilcih. Vsi trije Youngovi moduli (10,83 MPa; 13,02 MPa; 11,30 MPa) so si dokaj blizu, pri čemer je njihovo povprečje $11,72$ MPa. Zato lahko predpostavimo, da se efektivni Youngov modul naših $5 \times 5\text{mm}^2$ nosilcev nahaja v območju 11,72 MPa $\pm$ 0,98 MPa ($\alpha = 95\%$). Potrebno je omeniti, da so bili podatki za natreniranje CNN modelirani s polnim prerezom, tako da rezultat 11,72 MPa $\pm$ 0,98 MPa predstavlja ekvivalentni Youngov modul, če bi bil nosilec polnega prereza. Naši nosilci so imeli 0,4 mm debele stene in 10% zapolnjen prerez z vzorcem Gyroid. Večina nosilnosti nosijo stene naših nosilcev, zato so njihove mehanske lastnosti bolj podobne nosilcem z votlim kvadratnim prerezom s 0,4 mm tankimi stenami. Če predpostavimo, da imata nosilca s polnim in votlim kvadratnim prerezom enako upogibno togost ($E_1 \cdot I_1 = E_2 \cdot I_2$), potem ima nosilec z votlim kvadratnim prerezom s 0,4 mm tankimi stenami Youngov modul enak 41,32 MPa $\pm$ 3,46 MPa ($\alpha = 95\%$). Torej je Youngov modul za naše nosilce bližje tej vrednosti, kar je zelo blizu ugotovljenim vrednostim Youngovih modulov za materiale tiskane pod 90° kotom iz materiala PLA [11].

4 Zaključki

Rezultati naše raziskave so pokazali, da se eksperimentalno dobljene dolžine dobro ujemajo z dejanskimi ter da je s pomočjo nevronskih mrež mogoče uspešno napovedati geometrijske in mehanske lastnosti 3D natisnjenih, dinamsko obremenjenih mehanskih struktur. Z dobrimi rezultati raziskave smo tudi potrdili, da je ta metoda dobra alternativa konvencionalnim, saj je nedotična in neinvazivna. Pri realnem primeru bi lahko izvajali meritve med samim obratovanjem stroja brez demontaže, potrebno pa bi bila prilagoditev analitičnega modela in nevronske mreže z dejanskim robnim pogojem.

Za nadaljnje delo bi bilo smiselno, da bi z nevronsko mrežo poskušali napovedati lastne frekvence in nihajne oblike na podlagi že znanih geometrijskih in mehanskih lastnosti preizkušanca, saj so modalne analize bistveno bolj časovno zamudne. Prav tako je lažje pridobiti podatke o geometriji in mehanskih lastnostih konstrukcije kot o lastnih frekvencah, saj so te odvisne od vpetja. Druga izboljšava bi bila, da bi model CNN trenirali na podlagi realnih podatkov in ne sintetičnih, ker bi tako lahko bolje zajeli neidealnosti, ki so prisotne pri vsakem realnem preizkušancu. Alternativno bi lahko analitični model zamenjali z matematičnim, ki bolje popisuje neidealnost vpetja.

5 Literatura

[1] T. Galeta, P. Raos, J. Stojšić, I. Pakši: *Influence of Structure on Mechanical Properties of 3D Printed Objects*. Procedia Engineering **149**(2016) str. 100–104 ISSN 1877-7058 doi: 10.1016/J.PROENG.2016.06.644.

[2] M. P. González, J. L. Zapico: *Seismic damage identification in buildings using neural networks and modal data*. Computers Structures **86**(2008) str. 416–426 ISSN 0045-7949 doi:10.1016/J.COMPSTRUC.2007.02.021.

[3] M. Čarman: *The Diplomska naloga Marcel Čarman source code repository*. 2024 URL `https://github.com/mc8970/Diplomska-naloga--Marcel-Carman`.

[4] P. Cladé: *PyDAQmx*. 2023 URL `https://pythonhosted.org/PyDAQmx/`.

[5] LADISK: *The pyExSi source code repository*. 2023 URL `https://github.com/ladisk/pyExSi`.

[6] J. Slavič: *Procesiranje signalov*. GitHub, [e-knjiga] 2023 URL `https://jankoslavic.github.io/procesiranje_signalov`.

[7] LADISK: *The PyIDI source code repository*. 2023 URL `https://github.com/ladisk/pyidi`.

[8] OpenCV.org: *Introduction into Computer Vision - Optical Flow*. 2024 URL `https://docs.opencv.org/3.4/db/d7f/tutorial_js_lucas_kanade.html`.

[9] S. L. Brunton, J. N. Kutz: *Data-Driven Science and Engineering*. 6. izdaja Cambridge University Press, 2019 ISBN 9781108380690 doi:10.1017/9781108380690 URL `https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781108380690/type/book`.

[10] tensorflow.org: *The Tensorflow source code repository*. 2024 URL `https://github.com/tensorflow/tensorflow`.

[11] Y. Zhao, Y. Chen, Y. Zhou: *Novel mechanical models of tensile strength and elastic property of FDM AM PLA materials: Experimental and theoretical analyses*. Materials Design **181**(2019) str. 108089 ISSN 0264-1275 doi:https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108089 URL `https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127519305271`.

IDINA ZGODBA: KAJ JE PRIVEDLO DO ZLOČINOV IN KAJ JE PRINESLO DOGAJANJE PO DRUGI SVETOVNI VOJNI NA NAŠIH TLEH

Lovrenc Cink, Bine Grilc, Vita Pintar, Nik Zlatič

Povzetek

Smo državljani svobodne in demokratične države. To dejstvo mnogi radi poudarjajo. Potrebno pa se je zavedati, da biti državljan zahteva tudi osebni vložek. Ena od stvari, ki jih je dolžan vsak državljan, je poznavanje zgodovine lastne države. Ta članek nam lahko služi kot orodje ravno pri tem. Dogajanje med drugo svetovno vojno in po njej na naših tleh se večkrat izkaže za precej perečo temo. Z ekipo smo si želeli v tem zgodovinsko obarvanem članku z znanstveno metodo predstaviti zgodbo gospe Ide Meglen, ki je bila žrtev komunističnega nasilja. Odločili smo se za aktualno temo, si zastavili raziskovalna vprašanja in se lotili raziskovanja teme. Raziskovanje je potekalo morda na nekoliko drugačen način – s pogovorom s pričo in analizo drugih virov. Na koncu smo podatke še analizirali in podali zaključke ter odgovore na raziskovalna vprašanja. Ena od naših glavnih ciljev sta bila tudi verodostojnost in objektivnost. Slednjo je v družboslovnih znanostih precej težje popolnoma doseči, nam pa je znanstvena metoda, ki je ustaljen postopek raziskovanja, delo precej olajšala.

1 Uvod

Ko govorimo o dogajanju med drugo svetovno vojno na naših tleh in o revoluciji ter praktično državljanski vojni, ki je potekala, lahko hitro pride do nesoglasij ali celo prepira. Za razumevanje celotne slike je potrebno razlikovati kakšne so bile motivacije posameznih skupin in ne enačiti vseh struj, ki so se pojavile znotraj skupin. Potrebno se je zavedati, da stvari v življenju niso nikoli črno-bele, sploh pa ne v vojni in ko se gre za potegovanje za oblast. V našem članku želimo predstaviti vidik gospe Ide Meglen in njeno doživljanje omenjenega časa v slovenski zgodovini. Sami smo njenemu pričevanju dodali svojo raziskavo in razmislek o motivih za dejanja in posledicah dogajanja. Zato je v prvem delu članka predstavljena zgodba Ide Meglen, s katero smo se v živo pogovarjali na njenem domu, preoblikovana v pripoved. V drugem delu sledi bolj znanstveno-raziskovalni del, v katerem si bomo odgovorili na naslednja vprašanja:

- Kaj je bil motiv za komunistični teror med in po vojni?
- Kakšne posledice je to prineslo že med vojno?
- Kakšne so bile posledice po vojni?
- Kakšne so posledice danes?

2 Metode dela in potek raziskave

Glavni del raziskave predstavlja pogovor z Ido Meglen – živo pričo, ki nam je predstavila svojo zgodbo. Pogovor smo posneli in ga nato večkrat poslušali ter ga preoblikovali v zapis. Pri zapisovanju smo si pomagali še z različnimi viri, ki govorijo svojo zgodbo o dogodkih, o katerih nam je pripovedovala Ida. V zaključkih pa smo želeli s pomočjo njene zgodbe odgovoriti na v uvodu zastavljena vprašanja.

3 Idina zgodba

Gospa Ida Meglen se je rodila leta 1929 kot najmlajša od sedmih otrok v družini Sever. Otroštvo je preživela v Kompoljah v Dobrepoljski dolini. Svojih otroških let se z veseljem spominja, a ta žal niso trajala dolgo. Spomladi 1941, ko je bila stara 12 let, je v Jugoslavijo prišla Hitlerjeva vojska. Ozemlje današnje Slovenije je bilo razdeljeno med Nemčijo, Italijo in Madžarsko. Ljubljano in Dolenjsko, kjer je bila tudi rojstna hiša Ide Meglen, je zasedla Italija. Njena politika do Slovencev ni bila tako stroga in agresivna kot na primer nemška. Slovencem so dovolili nekaj narodne in kulturne neodvisnosti ter slovenščino kot uradni jezik v šolah. Prepričani so bili, da bo močna italijanska kultura preplavila ozemlje in da bodo Slovenci z dovolj časa izgubili narodno zavest. Gospa Ida se italijanske okupacije spominja na pozitiven način.

Razmere so se začele slabšati, ko je Komunistična partija Slovenije začela izvajati revolucijo. Gibanje se je zaradi šibkega italijanskega nadzora hitro širilo. KPS je povsod po državi novačila partizanske enote in tudi iz Kompolja se je nekaj fantov pridružilo partizanom. Vendar partizani svojih vojaških akcij niso usmerjali proti Italijanom, temveč so se osredotočili na izvajanje terorja nad ideološko drugače prepričanim slovenskim prebivalstvom. Najbolj so trpele katoliške družine. Gospa Ida se spominja, da so jih komunisti, ki so bili infiltrirani tudi v italijanske vrste, prezirali pri razdeljevanju hrane, ki jo je okupator uvažal zaradi lakote, in pogosto kradli po njihovih domovih. Italijani so se na partizansko agresijo odzvali z roško ofenzivo, ki je potekala leta 1942, od julija do novembra. V povračilni akciji je bilo ustreljenih veliko talcev, še več pa jih je bilo deportiranih v koncentracijska taborišča, na primer na Rab. Partizanske enote so utrpele izgube in so se morale umakniti s tako imenovanega osvobojenega ozemlja ter se začasno skriti. Fašisti pa so se maščevali nad nedolžnimi civilisti.

Zaradi partizanske agresije in ustrahovanja so se mladi fantje iz konservativnejših družin začeli povezovati in organizirati v vaške straže, prostovoljne protikomunistične milice. Delovali so obrambno, njihova glavna naloga pa je bila zaščititi vasi pred nasiljem in ropanjem, ki so ga izvajale partizanske enote. Bili so neusposobljeni in slabo oboroženi, pri slednjem so jim kasneje pomagali Italijani. Boj med partizani in vaškimi stražami je bil predvsem ideološki spopad. Razdeljenost med Slovenci se je med vojno še povečala, posledice tega spopada prepričanj pa so najbolj občutili civilisti. Spor je dosegel vrhunec z italijansko kapitulacijo 1943. Ob umiku Italije iz Slovenije so partizani zasedli ljubljansko

pokrajino in italijansko orožje. V terorju, ki so ga partizani izvajali nad vaškimi stražami, je padel tudi grad Turjak.

Po nekaj tednih je naše območje prešlo pod nadzor Nemcev in nadzor nad regijo se je poostril. Partizansko delovanje je bilo omejeno, Nemci pa so, ko so uvideli nevarnost, ki jo predstavljajo komunisti, podprli odpor vaških straž. Nastala je organizirana združba slovenskih domobrancev. Pridružila sta se jim tudi Idina starejša brata Jože in Ivan. Seveda pa stvar ni bila tako črno-bela. Nemci so kmalu po prevzemu oblasti nad območjem s komunisti sklenili pakt o nenapadanju, ki jim je pomagal ohraniti stabilnost v regiji. Sodelovanje je ustrezalo tudi partizanom, saj so lahko še naprej izvajali revolucijo in čistke. V eni izmed bitk v tem času je bil ubit Idin brat Ivan. Umrl je leta 1944, ko so z domobranci varovali železnico pri Sv. Antonu pri Zdenski vasi, da je ne bi partizani vnovič sabotirali. Ker so bili partizani številčnejši, so se bili domobranci prisiljeni umakniti, a umik Ivanu žal ni uspel in končal je tragično.

Po izkrcanju v Normandiji 4. Junija 1944 je nemška moč začela slabeti, s tem pa se je krepila komunistična partija na območju današnje Slovenije. Njihove priprave na povojni prevzem oblasti so bile v polnem teku in želeli so oslabiti drugače misleče prebivalstvo. Maja 1945 so se z nemško kapitulacijo začenjali časi begunskih valov skozi Slovenijo. Mnogo Slovencev je v tistem času bežala na Koroško. Ida je takrat imela 16 let in tudi njena družina se je iz strahu pred prihajajočim odločila za beg. Na pot so se peš odpravili oče, mati, sestri Francka in Milka ter Ida. Prvi večer so prispeli v Šmarje-Sap in prenočili pri sorodnikih. Šli so peš skozi Ljubljano in Kranj do prelaza Ljubelj, kjer so skozi predorom prečkali Alpe na avstrijsko stran. Po cesti do predora se je vila dolga vrsta ljudi. Med njimi so bili civilisti, politični begunci, nemški vojaki in številni domobranci. Tok beguncev se ustavil pri vhodu v predor, saj so na drugi strani potekali boji med partizani, ki so zaprli most čez Dravo, da bi beguncem preprečili pobeg, in združenimi silami begunske vojske. Glavno vlogo v boju je imel Rupnikov bataljon, katerega član je bil tudi Idin brat Jože. V bitki je Rupnikov bataljon potisnil partizane na drugo stran in jih nato premagal. Po ponovnem odprtju predora se je družina Sever odločila, da mejo raje prečkajo čez prelaz, saj je bilo tam manj ljudi in posledično varneje. Hodili so skoraj vso noč in se proti jutru spustili na Vetrinjsko polje. Ida se spominja kako čustven je bil zanjo pogled na to dolino, saj jo je spominjala na rodne kraje. Tam so bivali na prostem. S seboj niso imeli dovolj hrane, zato so morali za hrano prositi po hišah v Celovcu. Večino časa so bili lačni, zato so bili hvaležni za vsak dar. Za preživetje so morali biti iznajdljivi. V svoji pripovedi nam je omenila, kako so si za pripravo obrokov zakurili v starem avtomobilskem platišču in nanj postavljali lonce.

Po približno 14 dneh bivanja na prostem so jih Angleži obvestili, da jih bodo premestili v Italijo, kjer bodo imeli boljše pogoje za bivanje. Obljubili so jim, da bodo nastanjeni v begunskem taborišču z barakami. Slovenski domobranci so imeli prednost pri potovanju in so bili prvi odpeljani. S seboj so lahko vzeli svoje družine, zato se je družina Sever vkrcala na enega prvih transportov. Veliko civilistov pa je ostalo zadaj, saj so računali, da bodo pozneje prišli po njih. Sprva so bili vzhičeni, a je začetno navdušenje kaj kmalu

usahnilo. Angleški brigadir Toby Low in jugoslovanski polkovnik Franc Hočevar sta namreč sklenila dogovor, da jim Angleži vrnejo ubežnike, da bi komunisti sami poskrbeli zanje. Toby Low je deloval na lastno pest, kljub prepovedi tovrstnih izmenjav s strani angleškega vrha. Kmalu pa so nekateri začeli sumiti, da nekaj ni v redu. Opazili so, da se ne peljejo proti Italiji temveč nazaj proti Sloveniji. Iz strahu pred maščevanjem so nekateri poskušali zbežati, a žal neuspešno. Pri avstrijskem mestu Pliberk je potekla predaja beguncev komunistom. Partizani so jim odvzeli denar, nakit in vse ostalo kar je imelo kanček vrednosti ter jih natrpali v živinske vagone in jih z vlakom odpeljali do Celja. Tam so jih vodili po mestu, jih zaničevali, po njih pljuvali in jih pretepali. Ida se spominja, da je cesta izgledala kot reka krvi zaradi vsega nasilja. Nato so se peš odpravili proti Teharjam. »*Koncentracijsko taborišče Teharje je bilo ustanovljeno leta 1945 s strani takratne povojne oblasti. Namenjeno je bilo predvsem pripadnikom slovenskega domobranstva in civilistom, ki so se ob koncu vojne zatekli na Koroško in bili s strani zaveznikov vrnjeni v domovino.« [1]* Pot je bila mučna zaradi nečloveškega nasilja in terorja, ki so ga izvajali partizani še posebej nad pripadniki domobranskih enot.

Vse grozote o katerih nam gospa Ida pripovedovala do sedaj, pa so se po vstopu v taborišče zgolj še stopnjevale. Ob vstopu v tabor Teharje so jih popisali in jim odvzeli vse, kar so imeli. Obdržati so smeli le osnovna oblačila. Razdeljeni so bili v skupine, in sicer v skupino mladoletnikov, mladih domobrancev ter starejših domobrancev. Mladoletnike, katerih je v taboru bilo 400, so izpustili, a so jih na poti domov ubili partizani, ki so jih čakali v zasedah. Taborišče je bilo sestavljeno iz več barak, vse naokoli pa je bila visoka ograja. V vsakem vogalu je bil stražni stolp. Na stranišče so hodili ob ograjo. V taborišču so sicer bile barake, vendar jih je bilo premalo za vse. Zato so v barakah bivale ženske, moški pa so spali kar na prostem. Ida se spominja, da je bila prostorska stiska velika. Fantje so na tleh ležali tesno eden ob drugem kot vžigalice v škatli. Od osmih zvečer do sedmih zjutraj so morali vsi ležati. Če je kdo vstal in ni legel nazaj, ko so mu partizani grobo ukazali in streljali nad njim, so ga ustrelili in pustili, da je izkrvavel med drugimi. Higiena in prehrana sta bili prav tako na zelo nizkem nivoju. Veliko težav so povzročale uši, stenice, miši in podgane. Dr. Janez Zdešar, ki je bil prav tako eden izmed zaprtih, se prehrane spominja tako: »*Pred kuhinjo so nam stražarji nabrcali kar po tleh prazne konzervne posode. Vsak je eno vzel, jo nekoliko očedil prahu in druge umazanije in se postavil v vrsto. Toda kakšno razočaranje! Za menažo je bila vrela popolnoma neslana voda. V njej je v moji porciji bilo pet luščin in dva cela fižola. Vode pa je bilo približno pol litra. To naj bi bila menaža.« [2]* Veliko ljudi je imelo zaradi slabe prehrane in vode prebavne težave, kar je pomenilo, da je moralo veliko domobranskih vojakov pogosto odvajati blato leže, med svojimi soborci.

Vsako noč se je dogajalo, da so prihajala in odhajala tovorna vozila in vsako jutro je kateri od domobrancev manjkal. Idin brat Jože Sever je bil poklican prvo noč. Skupaj s še drugimi je bil odpeljan in Ida ga ni videla nikoli več. Odpeljani so bili na različne lokacije, kjer so bili izvensodno pobiti in zmetani v množična grobišča. Na območju Celja je kar zadeva tega znana zloglasna Huda jama.

Sestre Sever (Francka, Milka in Ida) so bile iz taborišča izpuščene avgusta 1945. Bile so med redkimi, ki so iz taborišča prišli živi (veliko družin domobranskih vojakov je bilo pobitih). Najprej so se z vlakom odpeljali v Ljubljano. Ida se spominja, da jim je na ljubljanski postaji nekdo prinesel hlebce kruha. Zaradi slabe hrane v Teharjah so bili vsi zelo lačni, eden od njih pa je takoj ob zaužitju kruha silovito bruhal in bil več dni bolan. Iz Ljubljane so odšli v Velike Lašče, kjer so jih ponovno zaprli za nekaj dni, nato pa so jih končno izpustili. Tam so nekaj časa zadrževali tudi očeta, ki so ga več dni vodili po Velikih Laščah, na hrbtu pa je imel napis "Sem izdajalec slovenskega naroda". Ko so se končno vrnili v Kompolje, so bili razočarani. Hiša je bila namreč popolnoma izropana. V njihovi odsotnosti je komunistična partija iz hlevov pobrala vso živino in vse pridelke. Prvih nekaj tednov niso imeli ničesar za jesti, a so se jih kmalu usmilili sosedje, ki se jih niso izogibali, in jim prinašali hrano. Poleg gmotnega pomankanja se Ida spominja tudi pomanjkanja moške delovne sile, saj je bilo veliko število fantov iz doline pobitih. Za nameček so bile ustanovljene še kmetijske zadruge, ki so položaj kmetov še poslabšale, kot se spominja Ida. Glavni vzrok so bile visoke provizije in zapostavljanje »sovražnikov naroda«. Gospa Ida Meglen je bila ob vrnitvi domov v 16. letu starosti in spominja se, da je med mladimi dekleti ob vrnitvi vladal strah pred tem, da bodo ostale same, saj je bilo fantov zelo malo. Veliko jih je bilo namreč pobitih in njihovo število se je drastično zmanjšalo.

Ida se je v upanju na boljše življenje odločila za šolanje in se vpisala na trgovski tečaj ter ga opravila z odliko. Zaposlila se je v Zadružni zvezi, kjer je delala med samimi komunisti. Ko so jo zaposlili, so preiskali njeno preteklost, in ker so ugotovili, iz kakšne družine prihaja, je bila po nekaj tednih odpuščena. Nezaupanje je predstavljalo velik problem tudi v letih po vojni. Ida se spominja, da se je zelo malo ljudi med seboj odkrito pogovarjalo, saj se je veliko ljudi, nekdanjih prijateljev, iz strahu odvrnilo. Jugoslovanska tajna policija je izvajala nadzor nad posamezniki še dolga leta po vojni o čemer pričajo tudi arhivska poročila. V prilogi je priloženo poročilo iz leta 1983, v katerem so poleg Ide omenjeni tudi njeni otroci, saj je bila celotna družina še takrat nadzorovana.

Po nekaj letih so se v SFRJ že začele notranje težave in tudi strogost režima je nekoliko popustila. Ida se spominja, da so si takrat vseeno upali kaj povedati. Strah pa je nekako ostal vse do osamosvojitve, leta 1991. Razmere so se občutno izboljšale, a kljub vsemu pa ob tej temi ostaja grenak priokus, ker nikoli ni prišlo do kakršnekoli poravnave. Dejanja komunistične partije niso bila nikoli obsojena kot vojni zločini, nikoli ni prišlo do javnega opravičila vsem svojcem žrtev in v Sloveniji nikoli ni prišlo do lustracije.

Razlogov za slednjo pa je ogromno. Idi in mnogim ostalim so bile kršene osnovne človekove pravice. Če gremo po seznamu splošne deklaracije o človekovih pravicah lahko zlorabe kar naštevamo: kršena ji je bila pravica do osebne svobode, enakopravnosti ne glede na versko in politično prepričanje, pravica do prostosti in osebne varnosti, pravica do zadostnega pravnega obravnavanja ter še mnoge druge. Bila je fizično zatirana v Teharjah, zatirali so jo na gospodarskem področju, ko so njihovo družino ovirali pri kmetovanju in jo odpustili iz službe ter jo zatirali na verskem področju. Kljub terorju na treh osnovnih nivojih je ostala stanovitna v veri in mišljenju. Ohranila je svoje vrednote in

načela ter jih prenesla na svoje otroke. Zaradi vsega kar je prestala, jo še posebej prizadanejo neresnice o tej kočljivi temi, ki se večkrat pojavijo med slovensko javnostjo.

Vseeno pa je Ida na stara leta mirna in zadovoljna. Svoje trpljenje je izročila Bogu in odpustila svojim zatiralcem. V prihodnost zre s pozitivo, saj verjame, da resnica vedno pride na dan in zmaga.

4 Zaključki

V zaključku strnimo vse, kar nam je Ida Meglen povedala, in izoblikujmo končni odgovor na v začetku zastavljena vprašanja.

Kaj je bil motiv za komunistični teror med in po vojni?

Dejanja, ki so bila izvedena in o katerih nam je pripovedovala gospa, so bila politično motivirana. Med vojno je šlo za pripravo terena pred izvedbo revolucije, zato so ideološko drugače prepričane depriviligirali in jih zatirali. Idina družina je bila tega deležna zaradi svojega verskega prepričanja, saj je Cerkev predstavljala velikega sovražnika komunizmu, kot nam je povedala Ida. Zaradi terorja so se mnogi fantje (tudi Idina brata) odločili za upor. To pa nas pripelje do motiva za povojno nasilje. Glavni motiv, poleg dokončanja čistke, je bilo maščevanje. Maščevanje tistim, ki so si drznili zoperstaviti režimu.
Še podrobneje pa smo skozi Idino zgodbo spoznali posledice, ki jih je komunistični teror prinesel.

Kakšne posledice je to prineslo že med vojno?

Prebivalci so bili zaradi terorja že med vojno prizadeti na več načinov. Ida se spominja, da je bila njihova družina večkrat ustrahovana, hkrati pa so bili prikrajšani pri razdeljevanju hrane, ki so jo delili zaradi lakote. Poleg tega so civilisti trpeli italijanske povračilne ukrepe. Že med vojno pa je je življenje izgubilo več fantov, med njimi tudi Idin brat.

Kakšne so bile posledice po vojni?

Odgovor na to vprašanje lahko razdelimo na dva dela: na obdobje takoj po vojni in na daljše obdobje, ko se je življenje že vrnilo nazaj v svoje običajne tirnice, zaznamovanost pa je ostala. Takoj po vojni so bili nasprotniki režima prisiljeni v beg, ki pa se je za večino končal tragično – z vrnitvijo v domovino. Tam jih je čakalo maščevanje v obliki mučenja, ki se ga Ida spominja predvsem iz poti v Teharje in v samem taborišču, mnoge pa je dočakala smrt. Po vrnitvi domov je bila najvidnejša posledica opustošenje domačij. Hkrati je bilo v vasi in okolici tudi veliko pomanjkanje moških. V nadaljevanju je bila Ida večkrat prikrajšana za razne pravice npr. pri zaposlitvi, kar lahko sklepamo tudi za druge. Pomembna posledica pa je bil tudi strah, ki se je zakoreninil globoko v vse, ki so doživeli te grozote in pa v njihove bližnje.

Kakšne so posledice danes?

Ljudje, ki so bili direktno zatirani še vedno občutijo nelagodje ob tej temi. Njihovo življenje bo za vedno ostalo zaznamovano. Tudi njihovi potomci čutijo to zaznamovanost kot je razvidno iz poročila tajne policije v prilogi. Hkrati pa so ti dogodki razklali slovenski narod

in pustili velik pečat na naši družbi. Slednje je opazno tudi v trenutni politični sceni, saj ta razkol privede do sporov, ki jim ni videti rešitve.

Vseeno pa nad situacijo ne gre obupovati. V zgled nam je lahko kako gospa Ida Meglen z odpuščanjem in spravo gleda na svet. Sami tega ne vidimo kot klic k pozabi te teme, ampak poziv, da se od naše narodne zgodovine učimo in uspešneje vodimo državo še mnogo generacij.

VIRI LITERATURE:

Naš glavni vir je predstavljala gospa Ida Meglen, živi vir, ki nam je svojo zgodbo predstavila v pogovoru jeseni leta 2022 v okviru raziskave, ki smo jo opravljali za osebno zanimanje in ob spodbudi profesorja. Zgodbo smo mestoma okrepili s posameznimi viri za dodatno verodostojnost in dopolnjevanje delov, kjer je pripovedovalkin spomin pešal.

Citati

[1] RADANOVIČ, Alanis, 2023, *Taborišče Teharje v luči revij Zaveza in Svobodna beseda : diplomsko delo* [na spletu]. Diplomsko delo. Ljubljana : A. Radanovič. [Dostopano 3 marec 2024]. Pridobljeno s: https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=149845

[2] ZDEŠAR, Janez, Spomini na težke dni: beg iz teharskega taborišča / Janez Zdešar ; - Ljubljana : Družina, 2005. – (Zbirka čas in ljudje ; knj. 17)

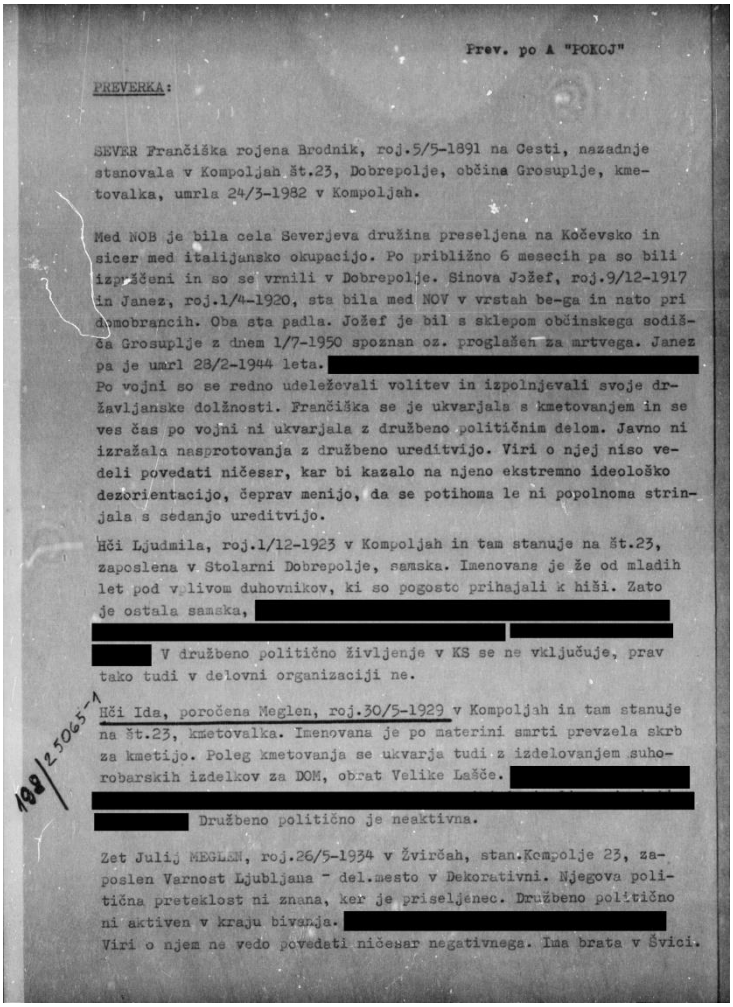
Ostali viri

KOCMUR, Marijan: Umik čez Ljubelj, maj 1945, skozi objektiv Marjana Kocmurja – 1. Izd. Celovec: Mohorjeva družba, 2015
KOZLEVČAR, Ivanka: Križev pot Jakljevih iz Kompolj skozi Teharje, Zaveza Št. 58 - Ljubljana: Nova
slovenska zaveza, September 2005
NOSE, Aleš: II. udarni ali Rupnikov bataljon – Medvode: Ustanova Memores, 2019
Več avtorjev: Represivne metode totalitarnih režimov: zbornik prispevkov z mednarodnega
znanstvenega posveta – Ljubljana: Študijski center za narodno spravo, 2012
ZDEŠAR, Janez: Pričevalec težkih dni : spomini na beg iz teharskega taborišča, življenje v besedi in sliki - 1. Izd. - Ljubljana: Družina, 2017

Priloga je bila pridobljena iz ministrstva za kulturo, v arhivskem fondu SI AS 1931, RSNZ SRS. Gre za vpis v Centralno aktivno evidenco RSNZ SRS in terensko preverko z oznako 198-25065.

PRILOGA:

Tajni zapisnik UDBE, v katerem je opazno, da so Idi Meglen sledili še dolga leta po vojni.



Prev. po A "POKOJ"

PREVERKA:

SEVER Frančiška rojena Brodnik, roj.5/5-1891 na Cesti, nazadnje stanovala v Kompoljah št.23, Dobrepolje, občina Grosuplje, kmetovalka, umrla 24/3-1982 v Kompoljah.

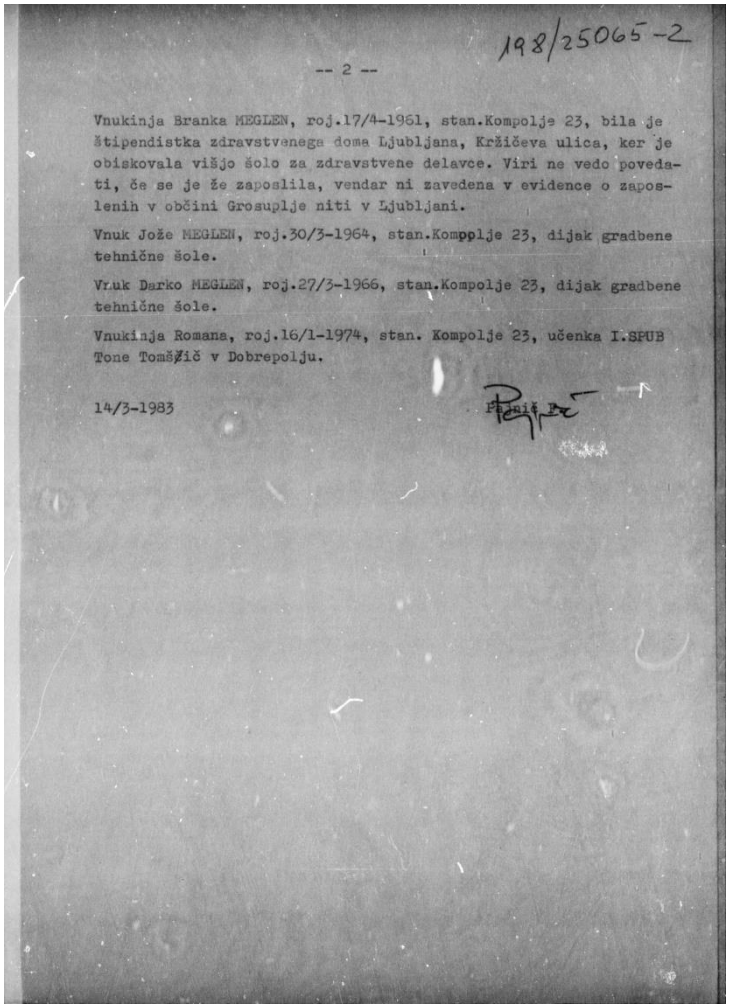
Med NOB je bila cela Severjeva družina preseljena na Kočevsko in sicer med italijansko okupacijo. Po približno 6 mesecih pa so bili izpuščeni in so se vrnili v Dobrepolje. Sinova Jožef, roj.9/12-1917 in Janez, roj.1/4-1920, sta bila med NOV v vrstah be-ga in nato pri domobrancih. Oba sta padla. Jožef je bil s sklepom občinskega sodišča Grosuplje z dnem 1/7-1950 spoznan oz. proglašen za mrtvega. Janez pa je umrl 28/2-1944 leta. [redacted] Po vojni so se redno udeleževali volitev in izpolnjevali svoje državljanske dolžnosti. Frančiška se je ukvarjala s kmetovanjem in se ves čas po vojni ni ukvarjala z družbeno političnim delom. Javno ni izražala nasprotovanja z družbeno ureditvijo. Viri o njej niso vedeli povedati ničesar, kar bi kazalo na njeno ekstremno ideološko dezorientacijo, čeprav menijo, da se potihoma le ni popolnoma strinjala s sedanjo ureditvijo.

Hči Ljudmila, roj.1/12-1923 v Kompoljah in tam stanuje na št.23, zaposlena v Stolarni Dobrepolje, samska. Imenovana je že od mladih let pod vplivom duhovnikov, ki so pogosto prihajali k hiši. Zato je ostala samska, [redacted] V družbeno politično življenje v KS se ne vključuje, prav tako tudi v delovni organizaciji ne.

198/25065-1

Hči Ida, poročena Meglen, roj.30/5-1929 v Kompoljah in tam stanuje na št.23, kmetovalka. Imenovana je po materini smrti prevzela skrb za kmetijo. Poleg kmetovanja se ukvarja tudi z izdelovanjem suhorobarskih izdelkov za DOM, obrat Velike Lašče. [redacted] Družbeno politično je neaktivna.

Zet Julij MEGLEN, roj.26/5-1934 v Žvirčah, stan.Kompolje 23, zaposlen Varnost Ljubljana - del.mesto v Dekorativni. Njegova politična preteklost ni znana, ker je priseljenec. Družbeno politično ni aktiven v kraju bivanja. [redacted] Viri o njem ne vedo povedati ničesar negativnega. Ima brata v Švici.



198/25065-2

-- 2 --

Vnukinja Branka MEGLEN, roj.17/4-1961, stan.Kompolje 23, bila je štipendistka zdravstvenega doma Ljubljana, Kržičeva ulica, ker je obiskovala višjo šolo za zdravstvene delavce. Viri ne vedo povedati, če se je že zaposlila, vendar ni zavedena v evidence o zaposlenih v občini Grosuplje niti v Ljubljani.

Vnuk Jože MEGLEN, roj.30/3-1964, stan.Kompolje 23, dijak gradbene tehnične šole.

Vnuk Darko MEGLEN, roj.27/3-1966, stan.Kompolje 23, dijak gradbene tehnične šole.

Vnukinja Romana, roj.16/1-1974, stan. Kompolje 23, učenka I.SPUB Tone Tomšič v Dobrepolju.

14/3-1983

ANALITIČNI MODEL ZA PRERAČUN PROIZVODNJE PARE Z ZBIRANJEM SONČNEGA SEVANJA

Nejc Golob, Boštjan Drobnič

Povzetek

Živimo v času, ko si želimo spremeniti stare navade porabe energije, ki prinašajo ogromno porabo fosilnih goriv, v zelene, okolju bolj prijazne. Veliko lahko k zmanjšanju porabe fosilnih goriv prispeva industrija. Eden izmed najboljših pristopov je izkoriščanje obnovljivih virov energije. V našem primeru smo se ukvarjali s sončno energijo. Nismo ciljali na zelo razširjene sončne celice za proizvodnjo električne energije, temveč smo obravnavali redkeje uporabljene zbiralnike sončnega sevanja. Z zbiralniki sončnega sevanja želimo pridobiti toploto na višjem temperaturnem nivoju, s pridobljeno toploto pa proizvajati industrijsko paro. Tako lahko z energijo sonca vsaj zmanjšamo porabo zemeljskega plina, če že ne povsem nadomestimo njegovo uporabo. Po pregledu trga sončnih zbiralnikov, smo izbrali najbolj ustreznega za našo aplikacijo. Odločili smo se za parabolične zbiralnike sončnega sevanja. Uporabili smo analitični model za preračun učinkovitosti zbiralnika sončnega sevanja in pridobljene toplote glede na površino in lego, ki sta na razpolago za namestitev sistema. Iz pridobljene toplote smo določili masni tok pare in ocenili uporabnost tehnologije glede na dane vhodne pogoje. Med vhodnimi podatki so zajeti vremenski pogoji v enem letu na izbranem območju in lastnosti izbranih sončnih zbiralnikov, ki jih je podal proizvajalec.

1 Uvod

Če želimo povečati delež obnovljivih virov v končni energiji, se moramo posvetiti novejšim in manj uveljavljenim pristopom za izkoriščanje obnovljivih virov energije. Sončna energija je kot glavni vir obnovljive energije, zagotovo vredna dodatne pozornosti in boljše izrabe. Med manj razširjene načine za pridobivanje koristne energije iz sončne energije spadajo načini za koncentriranje sončnega sevanja. S tem postopkom sončno energijo pretvorimo v toploto tudi za visokotemperaturne aplikacije. Med takšne aplikacije spada pridobivanje industrijske pare. Princip koncentriranja sončnega sevanja je precej preprost – direktno sončno sevanje na večji površini zberemo na manjšo površino, v točko ali v linijo točk, ki ji rečemo sprejemnik. Sončna energija se pretvori v toploto v žarišču koncentrirajočih sistemov, [1]. Točkovni sistemi za koncentriranje sončne energije uporabljajo parabolična zrcala, ki svetlobo odbijajo v točkovno žarišče. Takšen je sistem s sprejemnikom v obliki paraboličnega krožnika, kjer se sevanje zbira v žarišču krožnika. Linijski koncentratorji sončnega sevanja delujejo s paraboličnimi koriti, ki zbirajo sončno sevanje na cevi, kjer se pretaka kapljevina, ki se segreva. To je najbolj uveljavljena tehnologija. Podobno lahko dosežemo tudi s ti. Fresnelovimi reflektorji, ki so sestavljeni iz ravnih zrcal in linijskega sprejemnika, a je učinkovitost nižja in zaradi tega je nižja

tudi najvišja dosegljiva temperatura, [2]. Stolpi za koncentriranje sončne energije so naslednja izmed rešitev na trgu, vodena ogledala sledijo soncu v dveh oseh in obsevajo stolp postavljen na sredini med ogledali.

V naši študiji smo se osredotočili na parabolična korita, saj je sistem najbolj razširjen in praktično uporaben v aplikaciji, ki jo raziskujemo. Uporabljen je v 85 % aplikacij za koncentriranje sončnega sevanja. Spadajo v skupino enoosno pomičnih sistemov. Največkrat so nameščeni v liniji sever-jug in sledijo soncu od vzhoda proti zahodu z nagibom paraboličnega korita. Obstajajo še fiksni in dvoosno pomični sistemi za sledenje soncu, ki se v povezavi s paraboličnimi koriti za industrijske aplikacije načeloma ne uporabljajo, [3]. Korita z dvoosnim sledenjem imajo sicer večjo učinkovitost, saj imajo vedno ničelni vpadni kot, a se poveča mehanska zapletenost, vzdrževalni stroški, zmanjša se robustnost sistema in potrebnih je več cevovodov. Parabolična korita imajo najnižje investicijske stroške in so najbolj razvita, saj obstaja veliko študij na tem področju. So bolj zanesljivi in robustni, od dvoosno pomičnih sistemov. Dosegljive temperature delovnega medija so do 400 °C. Uporabljajo se v sistemih za segrevanje zraka, razsoljevanje vode, hlajenje, pridobivanje industrijske toplote in v elektrarnah, ki delujejo po principu Rankinovega parnega krožnega cikla. V našem primeru nas zanima, koliko pare za potrebe papirniške industrije, bi lahko letno generirali, če bi toploto iz sistema za koncentriranje s paraboličnimi koriti uporabili za proizvodnjo pare.



Slika 1: Glavni sestavni deli paraboličnega zbiralnika, povzeto po [4]

Glavni gradniki paraboličnega korita so sprejemnik, stekleni pokrov in parabolične odbojne površine (slika 1). Sprejemnik je cev, po kateri se pretaka delovni medij, največkrat sintetično olje. Cev sprejemnika je nepremično pritrjena v žarišču paraboličnega zbiralnika. Pokrov je prozoren ovoj sprejemnika, med njima je izpraznjena reža, da se konvektivne toplotne izgube čim bolj zmanjšajo. Parabolični zbiralnik je nameščen na nosilni konstrukciji, ki omogoča sledenje soncu. Obstajajo še cilindrični zbiralniki sončnega sevanja, ki so podobni paraboličnim, le da so žarki pri cilindričnem združeni v žariščno ravnino, pri paraboličnih pa v žariščno linijo. V praksi se cilindrični redko uporabljajo, [3]. V primeru pridobivanje industrijske pare, je v sistemu pomemben še prenosnik toplote oz. uparjalnik, kjer toplota prehaja iz primarnega oljnega kroga na sekundarnega vodnega.

Glavni parametri paraboličnega korita so dimenzijske, optične in termične lastnosti. V modelih je pomembno opredeliti pogoje delovanja. Obstajajo številne študije in pristopi k računanju za analizo paraboličnih korit, [5]. Glavna pristopa za analizo delovanja paraboličnih korit sta pristop, ki temelji na računalniški dinamiki tekočin (CFD) in pristop z analitičnimi toplotnimi modeli. V tem članku smo se osredotočili na modeliranje z analitičnimi enačbami, s katerimi se napove učinkovitost paraboličnih korit. Seveda so tudi pri tem pristopu sprejete določene predpostavke, da je sistem v stacionarnem stanju, zanemarjene so kontaktne toplotne izgube, toplotni tok čez sprejemnik je enakomeren in podobno. Toplotne izgube iz sprejemnika na pokrov so v ustaljenem stanju enake izgubam iz zunanjega pokrova v okolico. Toplotne izgube iz sprejemnika v okolico so le sevalne, saj konvektivne izgube preprečimo s približkom vakuuma med sprejemnikom in pokrovom.

Modeliranje temelji na energijski bilanci med vpadlim sevanjem ter koristnim in izgubljenim toplotnim tokom, enačba (1).

$$\eta_{opt}\, A_a\, G_b = \dot{Q}_u + \dot{Q}_{loss} \tag{1}$$

Pri tem so η_{opt} optični izkoristek kolektorja, A_a vpadna površina kolektorja, G_b gostota direktnega sončnega sevanja, $\dot{Q}_u$ koristni toplotni tok in $\dot{Q}_{loss}$ izgubljeni toplotni tok. Postopek izračuna je razdeljen na pet korakov, [5]. V prvem koraku upoštevamo sevalne in konvektivne izgube iz pokrova v okolico. Drugi korak upošteva, da so toplotne izgube iz sprejemnika v pokrov enake izgubam iz pokrova v okolico. Hkrati predpostavimo, da so izgube le sevalne, zaradi izpraznjenega prostora med sprejemnikom in pokrovom. V tretjem koraku se izhaja iz enačbe za uporabno toploto, ki jo prejme kapljevina v sprejemniku sončne energije, torej toplota prenesena iz sprejemnika na kapljevino. V četrtem koraku rešimo enačbo toplotnih izgub iz drugega koraka in predpostavimo, da je temperaturna razlika med sprejemnikom in kapljevino majhna, zato se lahko razvije v Taylorjevo vrsto. Tako se v enačbi za toplotne izgube znebimo temperature sprejemnika. V petem koraku izhajamo iz dejstva, da je absorbirana toplota enaka vsoti uporabne toplote in toplotnih izgub, to je enako produktu direktnega sončnega sevanja in optičnega izkoristka. Ta je odvisen od optičnih lastnosti sprejemnika, to so absorptivnost, reflektivnost in transmisivnost. Z računanjem brezdimenzijskih števil, s katerimi popišemo razmere v toku kapljevine v sprejemniku, se določi koeficient toplotne prestopnosti med kapljevino in sprejemnikom. Dobimo enačbe petih koeficientov (K_1 do K_5), ki se izračunajo zaporedoma. Izstopno temperaturo iz zbiralnega modula (T_{out}) določimo po enačbi 2.

$$T_{out} = T_{in} + \frac{K_4}{\dot{m}\, c_p}\, G_b - \frac{K_5}{\dot{m}\, c_p}\,(T_{in}^4 - T_{am}^4) \tag{2}$$

Pri tem so T_{in} vstopna temperatura, $\dot{m}$ in c_p masni tok in specifična toplota delovnega medija ter T_{am} okoliška temperatura.

Učinkovitost sprejemnikov lahko pomembno povečamo s selektivni premazi, ki spreminjajo optične lastnosti glede na valovno dolžino svetlobe. Razvoj poteka v smeri cenejših selektivnih premazov, [3].

2 Metode dela in potek raziskave

Da bi z modelom pridobili rezultate čim bližje realnim, je potrebno vanj vnesti realne vhodne podatke. V model je potrebno vnesti podatke o zbiralnikih sončnega sevanja. Poiskali smo primere realnih zbiralnikov dostopnih na trgu. Omejitev pri izboru ustreznih zbiralnikov je bila najvišja dosegljiva temperatura in primerne gabaritne mere. Zbiralniki morajo doseči vsaj 260 °C delovnega medija, saj za proizvodnjo pare v uparjalniku potrebujemo 160 °C in to je vstopna temperatura delovnega medija v prvi sončni zbiralnik. Do zadnjega zbiralnika se temperatura povečuje. Skupen prirast temperature je izbran in določen na 100 °C. Tako pridemo do temperature 260 °C in tolikšno temperaturo želimo dosegati z delovnim medijem, ki paro proizvaja iz napajalne vode pri dobrih 130 °C.

Za našo aplikacijo so bili izbrani sončni zbiralniki proizvajalca Aalborg CSP, tip AAL-Trough 4.0, dostopnim na referenci [6]. Za analitični preračun potrebujemo geometrijske in optične lastnosti zbiralnika. Predpostavi se konstantna vrednost koeficienta toplotne prestopnosti na okolico. Dolžina enega modula zbiralnika je 12 m, širina 5,7 m in goriščna razdalja 1,8 m. Notranji premer sprejemnika je 6,6 cm, zunanji 7 cm. Pokrov ima notranji premer 10,9 cm in zunanjega 11,5 cm. Njegova emisivnost je 0,9. Optična učinkovitost zrcala je 0,75 in toplotna prestopnost na okoliški zrak 10 W/(m^2 K).

Poleg podatkov o zbiralnikih, potrebujemo za izračun proizvedene količine pare v enem letu tudi podatke o vremenu na izbrani lokaciji. V spletnih bazah vremenskih podatkov so za izbrane lokacije na voljo urni podatki o povprečnem energijskem toku globalnega in difuznega sončnega sevanja. Oba energijska tokova sta izražena v enoti energijskega toka na kvadratni meter vodoravne površine. Ti podatki niso neposredno ustrezni za naš model, saj sprejemniki sončnega sevanja sledijo soncu, zato je energijski tok sončnega sevanja večji, ker je vpadni kot direktnega sončnega sevanja ves čas blizu ničnega kota. Zaradi sistema sledenja soncu zbiralniki letno obratujejo več časa in z njimi pridobimo več toplote. Zaradi sistema sledenja je potrebno z analitičnim modelom direktno sevanje na vodoravno ploščo preračunati na enoosno pomično ploskev. Za preračun je bil uporabljen model v simulacijskem okolju TRNSYS 17, [7]. Iz spletne baze so bili poleg podatkov o sončnem sevanju pridobljeni tudi urni podatki o zunanji temperaturi, [8].

Zaradi intenzivnega spreminjanja temperature delovnega medija med obratovanjem, je bilo potrebno upoštevati spreminjanje lastnosti delovnega medija s temperaturo. Iskali smo analitični popis za spreminjanje gostote, specifične toplote, dinamične viskoznosti in toplotne prevodnosti s temperaturo medija. Izhajali smo iz podatkov o lastnostih delovnega medija pri različnih ekvidistantnih temperaturah. Delovni medij je olje Syltherm800, proizvajalca Dow [9]. Gre za silikonski polimer z dolgotrajno obstojnostjo, zasnovan za uporabo kot prenosna kapljevina za toploto v visokotemperaturnih aplikacijah. Iz podatkov o vseh lastnostih kapljevine pri različnih temperaturah, je bila izvedena polinomska regresija drugega reda, da smo dobili regresijske koeficiente za vsako od lastnosti. Tako smo za vsako lastnost dobili

predpis funkcije, s katero smo lastnosti kapljevine aproksimativno določili pri delovnih temperaturah v vsakem zbiralnem modulu.

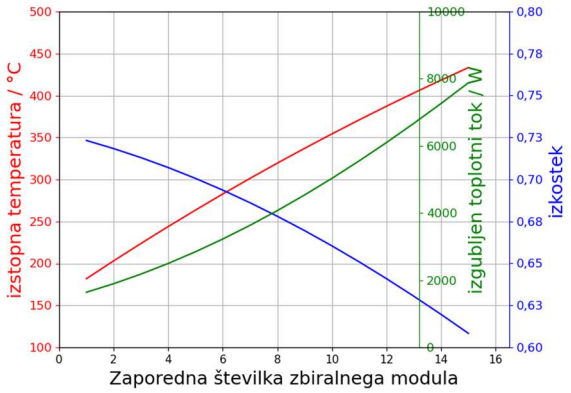
Sistem za zbiranje sončnega sevanja je sestavljen iz več modulov, ki so med sabo povezani zaporedno. Izstopna temperatura delovnega medija iz prvega modula je enaka vstopni temperaturi v drug modul. Število modulov izberemo glede na površino, ki je na voljo za postavitev sistema. Temperatura na izstopu iz zadnjega modula, specifična toplota pri tej temperaturi in masni tok delovnega medija nam povedo, kolikšen energijski tok uporabne toplote dosegamo pri določenih pogojih.

Za prenos toplote iz delovne snovi na kapljevito vodo uporabimo uparjalnik, ki je prenosnik toplote, na primer z U-cevmi, kjer se toplota prenaša preko sten cevi. Preneseno toploto uporabimo za segrevanje vode in proizvodnjo pare. V analitičnem modelu predpostavimo, da se olje v izmenjevalniku toplote vedno ohladi do približno enake temperature, zato je vstopna temperatura medija v prvi modul konstantna.

Začnemo z računanjem iskanih vrednosti za sistem z le enim modulom. Računamo le za primer, ko je sončno sevanje na sprejemnik večje od nič. Ko ni sončnega sevanja, se izstopna temperatura ter temperaturi sprejemnika in pokrova predpostavijo kot enake okoliški temperaturi. Pomembna je srednja temperatura medija, ki je definirana kot razlika med izstopno in vstopno temperaturo medija v modulu. Ta temperatura definira lastnosti kapljevine in prenosa toplote. V prvem približku se jo nastavi, kot da je enaka vstopni temperaturi medija v zbiralnik. Nato se začne zanka z iterativnim izračunom srednje temperature medija, ki se zaključi s posodobitvijo njene vrednosti na razliko med izstopno in vstopno. Računanje se zaključi, ko je razlika med zaporednima iteracijama srednje temperature manj kot stotinka stopinje Celzija. Nato lahko z lastnostmi medija pri srednji temperaturi izračunamo uporabni toplotni tok, toplotni tok izgub, temperaturi sprejemnika in njegovega pokrova in termično učinkovitost zbiralnika sončnega sevanja.

Na spreminjanje lastnosti s temperaturo ima velik vpliv dolžina modula, zato je pristop z računanjem lastnosti glede na srednjo temperaturo manj uporaben za zelo dolge module. Zato ni vseeno, če računamo z n zaporedno vezanimi moduli dolžine L, ali z enim modulom dolžine $n \cdot L$. Razlika je v upoštevanju spreminjanja lastnosti snovi s temperaturo. Če računamo z enim zelo dolgim modulom, računamo z eno srednjo temperaturo medija. Ko v modelu upoštevamo število modulov, računamo s srednjo temperaturo vsakega modula.

Opazujemo izračunane veličine v sistemu z več moduli (slika 2). Prikazani diagram dobimo pri gostoti direktnega sončnega sevanja 800 W/m^2, vstopni temperaturi medija 160 °C, pri pretoku 3500 kg/h in zunanji temperaturi 10 °C. Izstopna temperatura proti izstopu narašča skoraj linearno, izgubljen toplotni tok se veča parabolično, prav tako parabolično pada termični izkoristek posameznega modula. Termični izkoristek je vse manjši, saj je vstopna temperatura v modul višja in zato se hitro povečujejo tudi sevalne in konvektivne izgube, ker se s temperaturo medija dvigata tudi temperaturi sprejemnika in pokrova.



Slika 2: Potek temperatur in izkoristka v sistemu

Temperaturo delovnega medija želimo ohranjati, spreminjati pa pretok delovnega medij po sistemu zbiralnikov. Če se gostota sončnega sevanja poveča, se pretok sorazmerno poveča, da se v zbiralniku segreva večja količina delovnega medija in sprejme več toplote pri enaki končni temperaturi. Pretok delovnega medija izračunamo v posebnem preračunu iz podatkov o sončnemu sevanju in zunanji temperaturi v vsaki obravnavani uri. Izberemo želeni prirast temperature v sistemu zaporedno vezanih zbiralnikov sončnega sevanja. Ker želimo zmanjšati število računskih operacij za izračun masnega pretoka, določimo predpis funkcije, s katero bomo glede na zunanjo temperaturo in sončno sevanje določili masni pretok. Najprej tvorimo tabelo z ekvidistantnimi vrednostmi sončnega sevanja in zunanjih temperatur, ki se pojavijo v celem letu obratovanja sistema. Za te kombinacije vrednosti iterativno izračunamo masne pretoke, kar znese 40 iterativnih preračunov. Nato z uporabo matričnih operacij določimo polinomski regresijski model z dvema spremenljivkama (enačba 3). Spremenljivki sta torej gostota sončnega sevanja (G) in zunanja temperatura (T).

$$\dot{m} = -454{,}7 + 0{,}7725 \cdot T + 0{,}0039 \cdot T^2 + 14{,}31 \cdot G + 3{,}298 \cdot 10^{-5} \cdot G \cdot T - 1{,}458 \cdot 10^{-6} \cdot G \cdot T^2 \qquad (3)$$

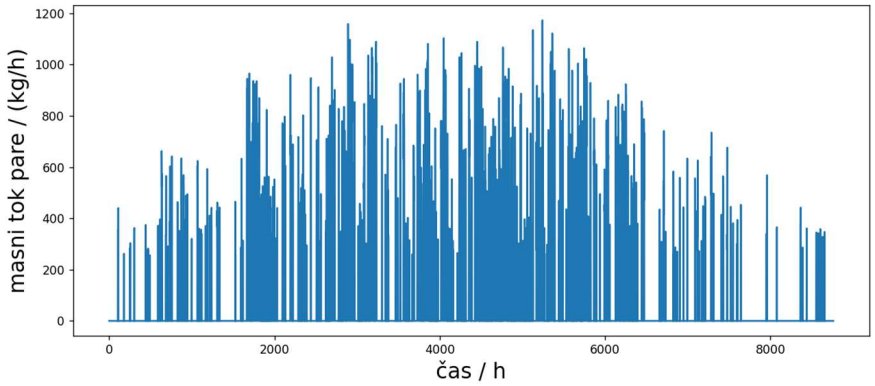
Ker je sistem enačb (40 enačb in 6 neznank) predoločen, koeficiente dobimo po metodi najmanjših kvadratov. Pri tem odvisne in neodvisen spremenljivke zapišemo v svoji matriki, iščemo pa vektor koeficientov. Rešimo matrično enačbo in dobimo vektor koeficientov. S takšnim postopkom se izognemo iterativnim preračunom za vsako uro v letu (8760), ki so računsko veliko bolj zahtevni od 40 iterativnih preračunov, ki jih potrebujemo za tvorbo zanesljivega modela za določitev masnega pretoka. Pri tem modelu je potrebno določiti tudi najmanjše sončno sevanje, ko pretok začne naraščati iz ničnega in se s tem začne obratovanje sistema. Delovanje je potrebno zakasniti, saj se mora olje segreti na delovno temperaturo. To se v modelu upošteva tako, da se izloči ure, kjer je povprečno sevanje manjše od 200 W/m^2.
Ko je znan masni pretok medija v vsaki uri v letu ter določena vstopna temperatura medija in prirast temperature v sistemu zbiralnikov, določimo pridobljeno toplotno moč preko specifičnih toplot medija pri vstopni in izstopni temperaturi. Toplotno moč lahko izrazimo za

vsako uro v letu, za vsako uro obratovanja sistema ali skupno toplotno energijo, ki jo pridobimo v enem letu obratovanja.

3 Rezultati

S pridobljeno toplotno energijo bi radi proizvajali paro, zato nas zanima masni tok proizvedene pare. To določimo iz pogojev v uparjalniku. Toplotne izgube v uparjalniku zanemarimo. V našem primeru predpostavimo tlak napajalne vode v uparjalniku 3 bar, pri tem tlaku je temperatura nasičenja 133,5 °C, [10]. Iz teh določenih parametrov določimo latentno toploto uparjanja vode, kot razliko specifične entalpije nasičene pare in nasičene kapljevine. Za naše parametre je potrebno 2163,4 kJ za kg nasičene pare.

Vsi izračuni so predvideni za 2000 m^2 veliko površino na območju Ljubljane. Glede na vso razpoložljivo površino, se določi število modulov paraboličnih zbiralnikov. Pri določanju postavitve modulov je potrebno predvideti dovolj prostora, da se moduli lahko nagibajo za soncem in ne delajo sence sosednjemu modulu. Načeloma je površina zbiralnikov manjša od polovice površine, ki je na voljo. To natančno določi proizvajalec zbiralnikov sončnega sevanja. Za naš sistem smo v najboljšem primeru predvideli 15 zaporedno povezanih zbiralnikov. Skupna površina vseh zbiralnikov znaša 1026 m^2. Tak sistem bi v Ljubljani deloval 1297 ur letno, kar je 15 % časa v letu. Pri tem upoštevamo, da sistem deluje, ko je sončno sevanje večje od 200 W/m^2. V času obratovanja povprečno proizvaja 568 kg/h pare. Skupna pridobljena toplotna energija znaša 443 MWh/leto, med obratovanjem je povprečna toplotna moč 340 kW.



Slika 3: Masni tok proizvedene pare skozi leto

Diagram masnega toka proizvedene pare (slika 3) ima povsem enake trende, kot diagram masnega toka delovne snovi in proizvedene toplote. Vsi omenjeni diagrami s trendi sledijo poteku energijskega toka sončnega sevanja. Konvektivne toplotne izgube so tako nizke, da nizka zunanja temperatura nima prevladujočega vpliva s tem, da bi izgube v hladnejših mesecih preprečile obratovanje sistema. Če proizvedeno količino pare primerjamo s porabo pare ljubljanske papirnice, ki za potrebe tehnologije porablja med 17 t/h in 27 t/h industrijske pare podobnih parametrov, [11], ugotovimo, da je zmogljivost obravnavanega sistema razmeroma majhna, hkrati pa je proizvodnja pare precej neenakomerna.

4 Zaključki

S kombinacijo analitičnih modelov, ki smo jih uporabili za preračun delovanja paraboličnih zbiralnikov sončnega sevanja, smo izračunali količino pridobljene visokotemperaturne toplote in proizvedene industrijske pare, glede na lokacijo in površino, ki sta na voljo. Preračun je mogoče prilagoditi tudi za druge aplikacije in za zbiralnike drugih proizvajalcev ter za preračun pare drugačnih parametrov. Glede na izračunano količino pare, bi za konkretno aplikacijo potrebovali veliko večjo površino za postavitev zbiralnikov, če upoštevamo porabo industrijskega obrata. Hkrati bi morali za zmanjšanje nihanja proizvodnje pare shranjevati presežke toplote in jih uporabljati v času, ko ni na voljo dovolj sončnega sevanja. V izbrani aplikaciji je sončna energija torej možna alternativa fosilnim gorivom, vendar zahteva izredno veliko razpoložljivo površino in visoko začetno investicijo, ki mora za zanesljivo obratovanje vključevati tudi ustrezne kapacitete za shranjevanje toplote.

5 Literatura

[1] A. Fernández-García, E. Zarza, L. Valenzuela, M. Pérez, Parabolic-trough solar collectors and their applications, Renewable and sustainable energy reviews 14, 2010.

[2] A. Cooper Thomas, et al., Contactless steam generation and superheating under one sun illumination, Nature communications, vol. 9:5086, 2018.

[3] S. Suman, M. K. Khan, M. Pathak, Performance enhancement of solar collectors—A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 49, pp. 192-210, 2015.

[4] M. S. Răboacă, et al., Concentrating solar power technologies, *Energies*, vol. 19, 2019.

[5] E. Bellos, C. Tzivanidis, Analytical expression of parabolic trough solar collector performance, Designs, vol. 9, 2018.

[6] AAL-Trough™, 4th generation parabolic trough technology. Dostopno na: https://www.aalborgcsp.com/fileadmin/user_upload/beUid/1/1-Downloadable_materials/1-Brochures/1-ENG/2018-03-07_Aalborg_CSP_AAL-Trough_4.0_4-pager_ENG.pdf, ogled: 27. 7. 2024.

[7] Trnsys. Dostopno na: https://www.trnsys.com/index.html.

[8] Meteonorm Software, Worldwide irradiation data. Dostopno na: https://meteonorm.com/en/ , ogled: 16. 7. 2024.

[9] DowTherm. Dostopno na: https://www.npl.washington.edu/TRIMS/sites/sand.npl.washington.edu.TRIMS/files/manuals-documentation/syltherm-800-technical-data-sheet.pdf, ogled: 11.7 . 2024.

[10] Fakulteta za strojništvo UL, Laboratorij za termoenergetiko, Tabele termodinamskih lastnosti vode in vodne pare, Ljubljana, 2017.

[11] K. Ambrožič, Proizvodnja industrijske pare za tehnološki proces v papirni industriji. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, 2022.

Deformacija elastičnega nosilca v nehomogenem magnetnem polju

Tomaž Jurkovič, Miha Brojan

Povzetek

Elastični nosilci z magnetnimi lastnostmi predstavljajo potencial za razvoj brezkontaktno krmiljenih naprav, ki so lahko izkoriščene na širokem spektru področij. Ker je interakcija med magnetnimi mehkimi materiali in dodanim magnetnim poljem v splošnem kompleksna, je bila raziskava na danem področju zaenkrat usmerjena na stacionarno homogeno magnetno polje. V tem članku smo obravnavali konzolno vpete nosilce in analizirali njihove deformacije glede na različne vrste obremenitev z magnetnim poljem. Matematične modele smo izpeljali na podlagi Euler-Bernoullijevih predpostavk in teorije deformacij tretjega reda ter elastične in magnetne potencialne energije nosilca. Za simulacijo spremenljivega magnetnega polja smo uporabili magnetnego polja vodnika v zanki, po katerem teče električni tok.

1 Uvod

Magnetizem je lastnost materialov, ki jim omogoča, da se med sabo brezkontaktno privlačijo ali odbijajo. Magnetne sile med takimi materiali izhajajo iz električnih tokov na atomskem nivoju v strukturi materiala [1]. Ker razlog za te sile izhaja iz električnega toka, lahko tok, in s tem magnetno polje, manipuliramo tako, da na magnetni material delujejo sile na v naprej predviden način.

Interakcijo med lastnimi magnetnimi polji materialov in dodanimi magnetnimi polji, proizvedenimi z vodniki oz. tuljavami, izkorišča področje magnetnih mehkih nosilcev. Ti nosilci lahko izkazujejo hitre in velike deformacije na brezkontakten način. Njihova uporaba izkazuje velik potencial na širokem spektru tehnoloških področij, kot so mehka robotika in fleksibilna elektronika, kjer so bili do sedaj že uporabljeni v tehnologiji mikroskopskih plavalcev [2]. Ostala področja so tudi senzorika in blaženje vibracij [3] ter biomedicina, kjer je bila predstavljena zmožnost navigiranja skozi kompleksno možgansko ožilje [4].

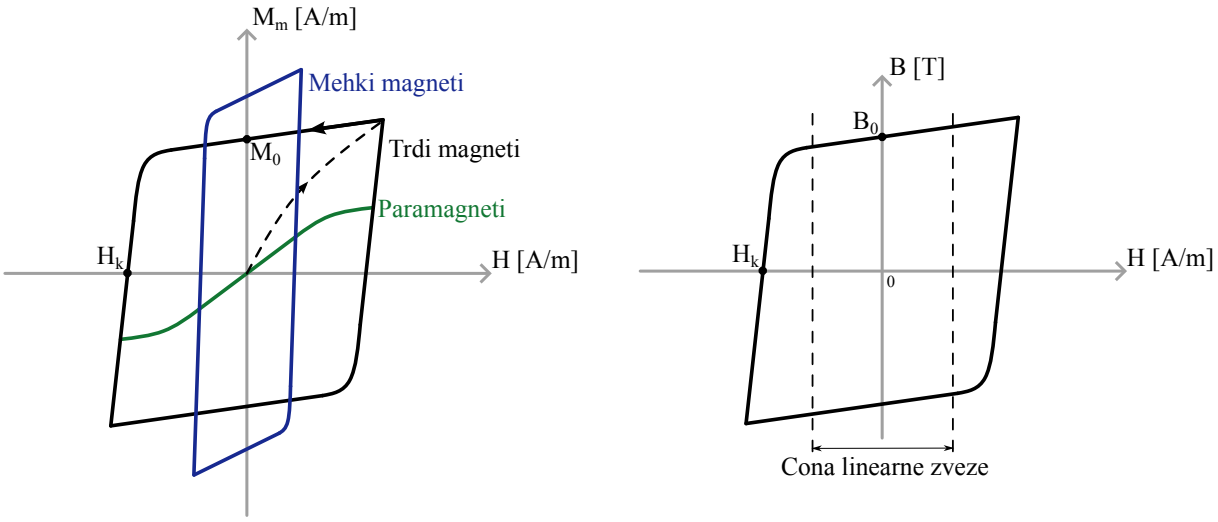
Raziskave s tega področja so se dolgo osredotočale na mehko-magnetne elastične materiale, ki so omejeni na osnovnejše deformacije v dodanem magnetnem polju [2]. V zadnjem času v ospredje prihajajo trdo-magnetni elastični materiali. Leta 2018 so Zhao et al. [2] predstavili in validirali nelinearni matematični model, ki opisuje deformacije idealnega trdo-magnetnega mehkega materiala v konstantnem magnetnem polju. Delo so med drugimi nadaljevali Wang

et al. [4], ki so model računsko poenostavili, ter Dadgar-Rad in Hossain [3], ki sta v model vključila tudi efekt viskoznosti materialov.

2 Metode dela in potek raziskave

2.1 Zahteve materiala

Za napoved deformiranja materiala po metodi, opisani v tem članku, potrebuje material izkazovati dve pomembni lastnosti. Prva lastnost je zmožnost zadržitve magnetizacije po zadostni obremenitvi in posledični odstranitvi dodanega magnetnega polja. Na sliki 1(a) je razvidno, da po točki maksimalne magnetizacije, mehki in trdi magneti po odsotnosti dodanega magnetnega polja nekaj magnetizacije zadržijo (označeno z M_0), paramagneti, pa je ne. Druga pomembna lastnost je visoka relativna permeabilnost materiala, ki predstavlja močno magnetno ojačanje notranje magnetizacije, ob izpostavitvi dodanemu magnetnemu polju. To lastnost izkazujejo tako mehki, kot tudi trdi magneti. Ker pa je za natančno napoved deformacij pomembno, da je zveza med dodanim magnetnim poljem in magnetizacijo linearna, smo se v tem članku osredotočili na trde magnete, saj izražajo široko območje linearne zveze (slika 1(b)).



(a) *(b)*

Slika 1: (a) Skica zveze med magnetizacijo in jakostjo zunanjega magnetnega polja, (b) skica območja linearne zveze.

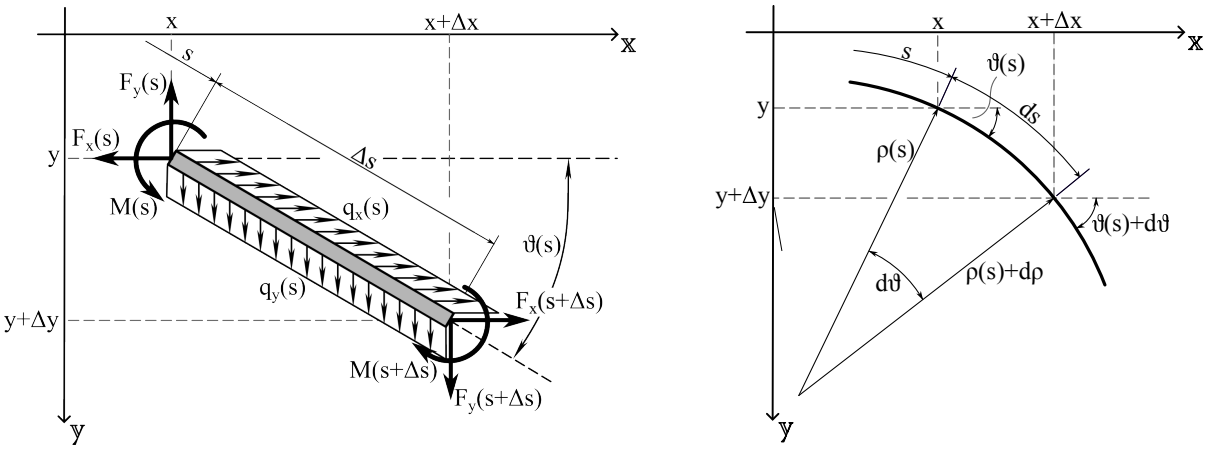
2.2 Upogib nosilca

Nosilci, ki jih v tem članku obravnamo, imajo relativno veliko razmerje med dolžino in debelino, zaradi česar strižne napetosti v nosilcu zanemarimo in uporabimo Euler-Bernoullijeve predpostavke [5]. Ker pa so velike tudi deformacije, obravnavamo upogib v skladu s teorijo deformacij tretjega reda. Zvezo med napetostmi zaradi magnetnih pojavov ter deformacijami

zapišemo s pomočjo energijskih prispevkov posameznega fizikalnega mehanizma. Za simulacijo nehomogenega magnetnega polja, obravnavamo magnetno polje vodnika v zanki, po katerem teče električni tok.

2.2.1 Euler-Bernoullijeva teorija III reda

Obravnavamo infinitezimalen delček upognjenega nosilca, glej sliko 2(a).



Slika 2: (a) Obremenitve, notranje sile in momenti na infinitezimalnem delcu upognjenega nosilca, (b) majhen delec upognjenega nosilca.

S pomočjo ravnotežne enačbe vseh sil, ki delujejo v smeri osi x:

$$-F_x(s) + F_x(s+\Delta s) + q_x(s)\Delta s = 0, \tag{1}$$

po smeri y:

$$-F_y(s) + F_y(s+\Delta s) + q_y(s)\Delta s = 0, \tag{2}$$

in ravnotežne enačbe vseh momentov, ki delujejo na točko s:

$$\begin{aligned} &- M(s) + M(s+\Delta s) - F_x(s+\Delta s)\Delta s \sin(\vartheta(s)) + F_y(s+\Delta s)\Delta s \cos(\vartheta(s)) - \\ &- q_x(s)\Delta s \frac{\Delta s \sin(\vartheta(s))}{2} + q_y(s)\Delta s \frac{\Delta s \cos(\vartheta(s))}{2} = 0, \end{aligned} \tag{3}$$

lahko po deljenju enačb z Δs in z uporabo limit, ko gre Δs proti 0, dobimo glavno ravnovesno enačbo za upogibni moment nosilca, ki je izražena z zasukom tangente na nosilec ϑ:

$$-M'(s) - F_x(s)\sin(\vartheta(s)) + F_y(s)\cos(\vartheta(s)) = 0. \tag{4}$$

Glede na sliko 2(b), zapišemo s pomočjo predpostavke $d\rho \approx 0$ in razmerjima med krožnim lokom ds in obsegom kroga ter med kotom $d\vartheta$ in 360°:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d\vartheta}{ds} = \vartheta'(s). \tag{5}$$

Po Euler-Bernoullijevih predpostavkah, zapišemo definicije napetosti v smeri osi x:

$$\sigma_x = \frac{M}{I_z} y, \tag{6}$$

deformacij v smeri osi x [6]:

$$\epsilon_x = \frac{y}{\rho}, \tag{7}$$

in Hooke-ovega zakona [6]:

$$\sigma_x = E\ \epsilon_x. \tag{8}$$

Iz En. (5)-(8) sledi:

$$M(s) = EI_z \vartheta'(s). \tag{9}$$

S pomočjo slike 2(b) določimo tudi povezavi med x, y in s:

$$x(s) = \int_0^s \cos(\vartheta(s))\ ds, \tag{10}$$

$$y(s) = \int_0^s \sin(\vartheta(s))\ ds. \tag{11}$$

2.2.2 Elastična potencialna energija nosilca

Elastično potencialno energijo oz. energijo deformacije nosilca lahko v splošnem razdelimo na energijo zaradi upogiba, energijo zaradi raztezka in energijo zaradi torzije [7]. Energijo zaradi raztezka ter torzije bomo zanemarili. Obravnavamo torej elastično potencialno energijo nosilca, obremenjenega z upogibnim momentom v smeri osi z.
Za splošno uporabo nas zanima elastična potencialna energija nosilca na enoto volumna. Pričnemo z zvezo med energijo, napetostjo in deformacijo [8]:

$$\int_V \Psi_{el}\ dV = \int_V \frac{1}{2} \sigma_x \epsilon_x\ dV. \tag{12}$$

S pomočjo En. (6), (7) in $dV = dA\ ds$, En. (12) razširimo:

$$\int_V \frac{1}{2} \sigma_x \epsilon_x\ dV = \int_s \int_A \frac{1}{2} \frac{1}{\rho} \frac{M}{I_z} y^2\ dA\ ds. \tag{13}$$

Z definicijo vztrajnostnega momenta prereza s težiščem v izhodišču koordinatnega sistema: $I_z = \int_A y^2\ dA$ ter En. (5) in (9), En. (13) pretvorimo:

$$\int_V \Psi_{el}\ dV = \int_s \frac{1}{2} E\ (\vartheta')^2 I_z\ ds. \tag{14}$$

Z odvajanjem En. (14) po s in deljenjem z A, podamo končno enačbo za potencialno energijo nosilca na enoto volumna:

$$\Psi_{el} = \frac{1}{2} \frac{EI_z}{A} (\vartheta')^2. \tag{15}$$

2.2.3 Magnetna potencialna energija

Magnetna potencialna energija je definirana kot delo, ki je potrebno za ponovno poravnavo magnetnega momenta v nosilcu z dodanim magnetnim poljem. Predpostavljena so magnetna polja v jakostih mnogo pod koercivnostjo nosilca [2].
Enačba magnetne potencialne energije nosilca na enoto volumna [4]:

$$\Psi_{mag} = -(\mathbf{F} \cdot \mathbf{M}) \cdot \mathbf{B}_a, \tag{16}$$

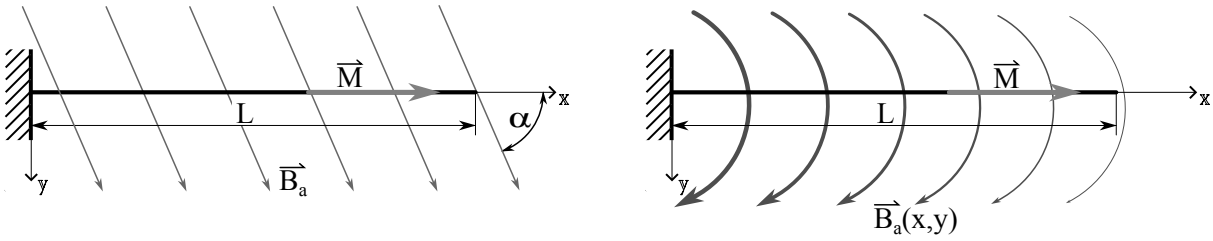
kjer je $\mathbf{F}$ gradient deformacij, $\mathbf{M}$ je vektor zaostale magnetizacije po osi nosilca, $\mathbf{B}_a$ pa vektor dodanega magnetnega polja. Gradient deformacij lahko razdelimo na rotacijo ($\mathbf{R}$) in razteg ($\mathbf{U}$):

$$\mathbf{F} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{U} \tag{17}$$

Ker osni razteg nosilca zanemarimo, je tenzor gradienta deformacij definiran samo z rotacijskim tenzorjem oz. $\mathbf{F} = \mathbf{R}$.

2.3 Razvoj matematičnega modela

Zanima nas matematični model, ki bo opisoval deformacije nosilcev na sliki 3. Nosilca naj bosta dolžine 150 mm, modula elastičnosti 10 MPa, njuna zaostala magnetizacija pa naj bo v smeri njune osi, predpostavljena kot po osi in prerezu konstantna. Nosilec v homogenem polju naj bo konstantnega prereza debeline 2 mm in širine 20 mm, nosilec v nehomogenem polju pa naj bo po osi spremenljivega, prizmatičnega, a še vedno vitkega prereza.



(a) *(b)*

Slika 3: (a) Nosilec v homogenem magnetnem polju, (b) nosilec v nehomogenem magnetnem polju.

Diferencialno enačbo za izris upogibnice določimo na osnovi teorije minimalne potencialne energije nosilca. Teorija navaja, da od vseh možnih deformacij nosilca, naredijo skupno potencialno energijo najmanjšo ravno tiste, ki zadoščajo ravnovesnim enačbam, [9]. V našem primeru jo predstavlja vsota elastične in magnetne potencialne energije. Glede na funkcijske spremenljivke s, ϑ, ϑ', lahko enačbo minimuma zapišemo v obliki [4]:

$$\frac{d}{ds}\left(\frac{\partial \Psi_{el}}{\partial \vartheta'}\right) = \frac{\partial \Psi_{mag}}{\partial \vartheta} \tag{18}$$

Oziroma v razširjeni obliki z En. (15) in (16):

$$\frac{d}{ds}\left(\frac{\partial}{\partial\vartheta'}\left(\frac{1}{2}\frac{EI_z}{A}(\vartheta')^2\right)\right) = \frac{\partial}{\partial\vartheta}\Big(-(\mathbf{F}\cdot\mathbf{M})\cdot\mathbf{B}_a\Big). \tag{19}$$

Glede na sliko 3, zapišemo gradient deformacij ter vektor zaostale magnetizacije:

$$(\mathbf{R}) = \begin{pmatrix}\cos(\vartheta) & -\sin(\vartheta)\\ \sin(\vartheta) & \cos(\vartheta)\end{pmatrix}, \tag{20}$$

$$(\mathbf{M}) = \Big(M_0, \quad 0\Big) = \Big(\tfrac{B_0}{\mu_0}, \quad 0\Big). \tag{21}$$

Vektor dodanega magnetnega polja se med nosilcema razlikuje. Najprej ga podamo za nosilec na sliki 3(a):

$$(\mathbf{B}_a) = \Big(B_a\cos(\alpha), \quad B_a\sin(\alpha)\Big). \tag{22}$$

Dobljene komponente vstavimo v En. (19) ter zapišemo končno enačbo za deformacije nosilca na sliki 3(a):

$$\frac{EI_z}{A}\vartheta''(s) = -\frac{B_0}{\mu_0}B_a\sin(\alpha-\vartheta(s)). \tag{23}$$

Sedaj podamo še vektor dodanega magnetnega polja za nosilec na sliki 3(b):

$$\mathbf{B}_a = \Big(B_{ax}(x,y), \quad B_{ay}(x,y)\Big), \tag{24}$$

kjer sta smerni komponenti gostote dodanega magnetnega polja, določeni po Biot-Savartovemu zakonu za linijski električni tok vodnika v zaprti zanki:

$$B_{ax}(x,y) = \frac{\mu_0 I_c p}{4\pi}\int_0^{2\pi}\frac{y\cos(\varphi)}{\big((x-p\cos(\varphi))^2+(-p\sin(\varphi))^2+y^2\big)^{\frac{3}{2}}}\,d\varphi, \tag{25}$$

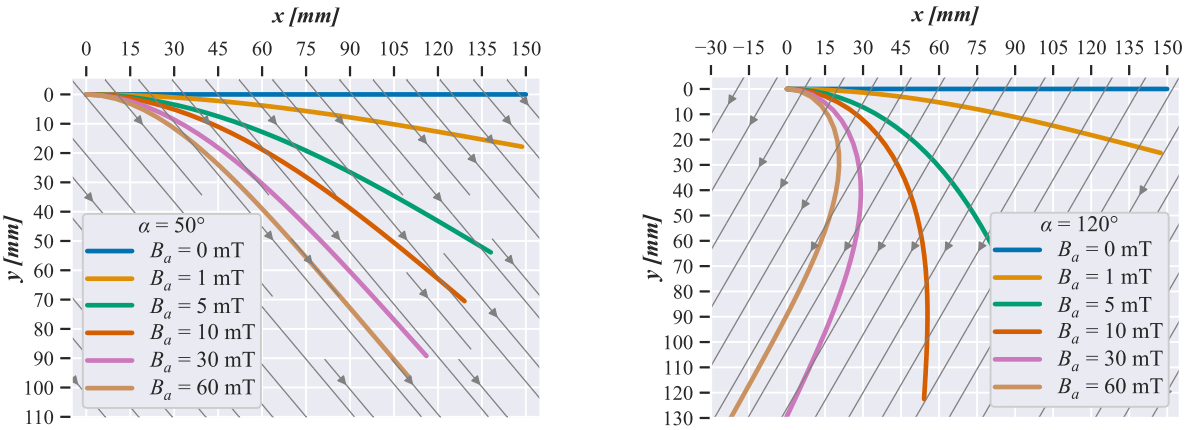
$$B_{ay}(x,y) = \frac{\mu_0 I_c p}{4\pi}\int_0^{2\pi}\frac{p-x\cos(\varphi)}{\big((x-p\cos(\varphi))^2+(-p\sin(\varphi))^2+y^2\big)^{\frac{3}{2}}}\,d\varphi. \tag{26}$$

Komponente ponovno vstavimo v enačbo (19), tokrat upoštevamo še spremenljivost prereza nosilca v nehomogenem polju. Zapišemo končno enačbo za deformacije nosilca na sliki 3(b):

$$\begin{aligned}\frac{EI_z(s)}{A(s)}\vartheta''(s) + \frac{EI_z'(s)}{A(s)}\vartheta'(s) - \frac{EI_z(s)A'(s)}{(A(s))^2}\vartheta'(s) = \\ = \frac{B_0}{\mu_0}\Big(B_{ax}(x,y)\sin(\vartheta(s)) - B_{ay}(x,y)\cos(\vartheta(s))\Big).\end{aligned} \tag{27}$$

3 Rezultati

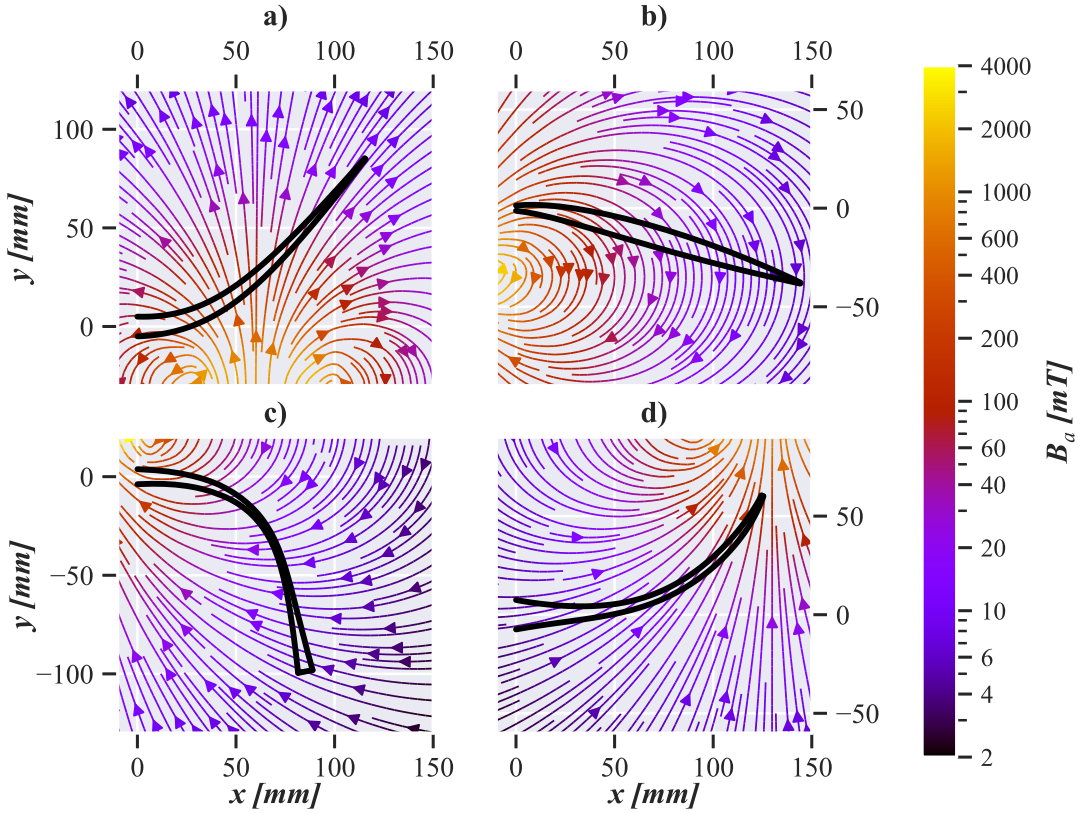
Deformacije nosilca iz slike 3(a) so prikazane na sliki 4. Opazimo, da se nosilec s povečevanjem gostote dodanega magnetnega polja izravnava s magnetnimi silnicami.



(a) *(b)*

Slika 4: Upogibnice nosilca v konstantem magnetnem polju gostote od 0 do 60 mT in pod kotom a) 50° in b) 120°.

Deformacije nosilca iz slike 3(b) so prikazane na sliki 5. S postavljenim modelom lahko analiziramo upogibe nosilcev spremenljivih prerezov, katerih površino prereza lahko opišemo z zvezno odvedljivo funkcijo. Pri obravnavi je potrebno upoštevati, da ima z večanjem površine prereza nosilca, pri upogibu vedno večji vpliv strig, ki pa je v okviru naših enačb zanemarjen.



Slika 5: a), b), c), d) Upogibnice nosilcev spremenljivih prerezov, obremenjenih z nehomogenim dodanim magnetnim poljem.

4 Zaključki

V članku smo obravnavali nosilce iz mehkega materiala z magnetnimi lastnosti, ki se upognejo v dodanem magnetnem polju. Matematične modele, ki opisujejo njihov upogib, smo razvili z izpeljavo enačb za napetosti in deformacije nosilcev. Pri izpeljavi smo upoštevali Euler-Bernoullijeve predpostavke, teorijo deformacij tretjega reda ter magnetne in elastične energijske prispevke fizikalnih mehanizmov, ki napetosti in deformacije povezujejo. Zaradi vitkosti nosilcev smo zanemarili strižne napetosti ter spremeljivost zaostalega magnetnega polja po prerezu nosilca. Da smo lahko predpostavili linearno zvezo med magnetizacijo nosilca ter dodanim magnetnim poljem, smo upoštevali jakosti polja mnogo pod vrednostjo koercivnosti. Ugotovili smo, da je deformacija nosilca z magnetim poljem uporabna oblika brezkontaktnega upogibanja. Dosežemo lahko skoraj poljubne deformacije z manipulacijo magnetnega polja, ki bi jih bilo s konvencionalimi metodami bolj zamudno in težje doseči.

5 Literatura

[1] H. C. Ohanian in J. T. Markert, *Physics for Engineers and Scientists, Volume 2, Third Edition*. W. W. Norton Company, 2007.

[2] R. Zhao, Y. Kim, S. A. Chester, P. Sharma in X. Zhao, "Mechanics of hard-magnetic soft materials," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, št. 124, str. 243–363, 2019.

[3] F. Dadgar-Rad in M. Hossain, "Large viscoelastic deformation of hard-magnetic soft beams," *Extreme Mechanics Letters*, št. 54, 2022.

[4] L. Wang, Y. Kim, C. F. Guo in X. Zhao, "Hard-magnetic elastica," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, št. 142: 104045, 2022.

[5] A. Öchsner, *Classical Beam Theories of Structural Mechanics*. Springer Nature Switzerland AG, 2021.

[6] S. P. Timoshenko, *Strength of Materials, Part 1: Elementary Theory and Problems*. D. Van Nostrand Company, 1940.

[7] O. M. O'Reilly, *Modeling Nonlinear Problems in the Mechanics of Strings and Rods: The Role of the Balance Laws*. Springer, 2017.

[8] Y. Yang, M. Li in F. Xu, "A 3d hard-magnetic rod model based on co-rotational formulations," *Acta Mechanica Sinica*, št. 38: 222085, 2022.

[9] J. N. Reddy, *Theory and Analysis of Elastic Plates and Shells*. CRC Press, Taylor Francis Group, 2006.

SPODBUJANJE GOVORNO-JEZIKOVNEGA RAZVOJA OTROK PRISELJENCEV V VRTCU

Klara Kadunc, Ana Pirc

Povzetek

Dvojezičnost je kompleksen pojav družbe, ko posameznik razume ter/ali obvlada dva jezika. Razvoj dvojezičnosti poteka različno glede na posameznika, dva jezika pa se lahko otrok uči simultano ali pa sukcesivno. Pogosto se govorno-jezikovni razvoj dvojezičnih govorcev začne že v vrtcih, kar lahko spremljamo predvsem pri otrocih priseljencev. Vzgojitelji si pri spodbujanju govorno-jezikovnega razvoja otrok priseljencev pogosto pomagajo z neverbalno komunikacijo, celo slikovnim gradivom, pomembno pa je, da se zavedamo otrokovih osebnih ter interesnih lastnosti, starosti ter motiviranosti posameznega otroka za učenje novega jezika. Pogosto si lahko pri spodbujanju pomagamo tudi s Kurikulom za vrtce (1999), Konvencijo o otrokovih pravicah (1989) ipd. *V zadnjih letih je v slovenskih vrtcih največ otrok priseljencev iz Bosne in Hercegovine, Kosova ter Makedonije. Velik vpliv na slednje otroke imajo vzgojitelji vrtcev, ki se pri dvojezičnih otrocih spoprijemajo z različnimi izzivi kot so jezik, vera, komunikacija s starši ipd. Cilj prispevka je ugotoviti, kakšno vlogo in vpliv imajo pedagoški delavci vrtcev v različnih slovenskih regijah na otroke priseljence ter kako spodbujajo govorno-jezikovni razvoj pri teh otrocih. S pomočjo ankete, ki sva jo izvedli v vrtcih, sva preverili, kateri izzivi so vzgojiteljem največji, kako si pri njih pomagajo ter kakšen pomen imajo starši otrok priseljencev. Udeleženci raziskave so tako predvsem pedagoški delavci različnih slovenskih vrtcev, ki nam osvetlijo velik pomen vključenosti staršev v govorno-jezikovni razvoj posameznega otroka, iznajdljivost vzgojitelja pri delu ter kako zelo je pomembna pozitivna naravnanost do dvojezičnih otrok, saj so vzgojitelji zgled tako ostalim otrokom v skupini kot tudi staršem otrok.*

1 Uvod

Otroci priseljenci ob selitvi v novo okolje doživijo kulturni šok. Ob vseh izzivih, s katerimi se spopadejo, predstavlja enega največjih prav gotovo (ne)znanje večinskega jezika novega okolja. V predšolskem obdobju otrokom priseljencem pomemben zgled predstavljajo vzgojitelji v vrtcih, ki poskrbijo, da se otrok v novem okolju počuti dobrodošlo. Slednji so otrokom velikokrat tudi v pomoč pri usvajanju novega jezika, pri čemer je pomembno, da spoštujejo otrokovo dvojezičnost in se zavedajo pomena otrokovega maternega jezika.

Namen članka je raziskati, kako si vzgojitelji prizadevajo otroku priseljencu olajšati prehod v novo okolje in kako lahko prispevajo h govorno-jezikovnemu razvoju teh otrok ter s tem spodbuditi vzgojitelje k razmišljanju o tej vse bolj aktualni temi.

2 Teoretično ozadje

2.1 Dvojezičnost kot kompleksen pojav

Definicij dvojezičnosti je skoraj toliko, kolikor je njihovih avtorjev. Vsak posameznik – bodisi laik bodisi strokovnjak – dvojezičnost pojmuje drugače. Nekateri za dvojezično označijo osebo, ki zelo dobro obvlada oba jezika, medtem ko drugi menijo, da je dvojezičen nekdo, ki ima en materni jezik, drugega pa se načrtno in sistematično uči v šoli (Furlan, 2002). Kriteriji za definiranje dvojezičnosti se tako glede na avtorje razlikujejo. Oestreicher (1974) dvojezičnost definira kot »popolno obvladovanje dveh različnih jezikov, pri katerih ne prihaja do medsebojnega vplivanja med jezikovnima procesoma«, medtem ko Macnamara (1967) pravi, da je dvojezičen tudi tisti posameznik, ki »razume, govori, bere ali piše foneme/grafeme, uporablja besednjak, osnovno sintakso ali operira s pomeni določenega jezika« (Oestreicher, 1974; Macnamara, 1967; Skutnabb - Kangas, 1981, v Furlan, 2002).

Proces usvajanja jezika tako pri enojezičnih kot tudi pri dvojezičnih normativno razvitih otrocih ni enak. Odvisen je od otrokove motivacije, njegovih značajskih sposobnosti, izpostavljenosti jeziku, možnosti uporabe, posameznikovih umskih mehanizmov itn. Glede na omenjene dejavnike razlikujemo dve različni smeri razvoja dvojezičnosti – zaporedno in simultano (Fierro-Cobas in Chan, 2011). O simultani dvojezičnosti govorimo, ko otrok oba jezika usvaja sočasno do tretjega leta starosti; lahko bi dejali, da ima dve materinščini, saj je v uporabi obeh suveren in oba vrednoti enakovredno (Furlan, 2002). Simultani dvojezični govorci so lahko otroci priseljencev, kjer se v domačem okolju enakovredno uporabljata oba jezika. Treba je razlikovati med terminoma *otroci priseljenci* in *otroci priseljencev*; slednji so tisti, katerih starši so se preselili v Slovenijo, sami pa so bili tu že rojeni, medtem ko so se otroci priseljenci rodili v drugi državi in se šele nato preselili v Slovenijo (prav tam, str. 15, v Kisilak, 2021). Za zaporedno oz. sukcesivno dvojezičnost je značilno, da posameznik z usvajanjem drugega jezika začne šele potem, ko je že usvojil osnove prvega, torej maternega jezika. Zaporedna dvojezičnost je tako značilna predvsem za otroke priseljence, ki z drugim jezikom do selitve v novo okolje največkrat še niso imeli stika. Termin »drugi jezik« ni enakovreden terminu »tuji jezik«. Tuj jezik je namreč tisti, ki se ga načrtno in sistematično učimo ter ga vsak dan ne uporabljamo; gre za jezik, ki z družbenim okoljem, v katerem oseba živi, nima neposredne povezave. Vzgibi za učenje tujega jezika so ponavadi karierne ali izobraževalne narave (Prebeg - Vilke, 1995). Za drugi jezik je sicer prav tako značilno, da ga oseba usvoji po tem, ko je prvi jezik že usvojila, vendar s to razliko, da je ta pomemben za družbo, v kateri posameznik živi. Prav zato drugi jezik pojmujemo tudi kot jezik okolja. Otrok jezik okolja prav tako kot materinščino usvaja, kar pomeni, da se njegovih prvin uči spontano, zgolj z izpostavljenostjo jezikovnih dražljajem (Fatur, 2001, v Raztresen, 2015).

2.2 Dvojezičnost pri otrocih priseljencih

Za otroke priseljence predstavlja slovenščina drugi jezik, torej jezik okolja. Usvajanje drugega jezika se razlikuje od usvajanja prvega jezika. Slednjega otrok usvaja nagonsko. Prvi jezik je tisti, ki se ga »otrok nauči od matere oz. govornega okolja, s katerim je v stiku« (Toporišič, 1992, str. 100, v Raztresen, 2015). Otrok za usvojitev prvega jezika ne

potrebuje posebnega učenja slovnice; zadostuje zgolj izpostavljenost jezikovnim dražljajem posameznega jezikovnega koda. Usvajanje prvega jezika poteka spontano in do tretjega leta starosti hitro, saj je jezikovna zmožnost ključna za preživetje. Slovenščina je za večino otrok priseljencev drugi jezik, ki se ga začnejo učiti s prihodom v drugo družbeno okolje. Drugi jezik naj bi bil glede na raven obvladovanja na drugem mestu, značilno pa je, da so otroci priseljenci za njegovo učenje zaradi strahu pred izgubo socialne identitete bolj motivirani kot njihovi starši (Raztresen, 2015). Otrok jezik okolja usvaja v vsakodnevnih dejavnostih in interakcijah z vrstniki, zaradi česar je zaželeno, da obiskuje vrtec, v poznejših letih pa se drugega jezika uči načrtno in sistematično v okviru dodatnih ur učenja slovenščine (Zaman, 2020).

V šolskem letu 2022/23 kot tudi v šolskem letu 2023/24 največ otrok tujega državljanstva, ki obiskujejo slovenski vrtec, prihaja iz Bosne in Hercegovine, sledijo Kosovo, Makedonija, Srbija, Ukrajina, Hrvaška … Prevladujejo torej države jugovzhodne Evrope, sledijo otroci iz Azije, nato Severne in Srednje Amerike, zelo malo pa je otrok priseljencev iz Afrike, Južne Amerike ter Avstralije. Prav tako je bilo največ otrok priseljencev v vrtcu starih 5 let ter moškega spola. V šolskem letu 2018/19 je bilo otrok priseljencev, ki obiskujejo vrtec v Sloveniji, 4681, medtem ko se je v šolskem letu 2023/24 njihovo število skoraj podvojilo, saj je bilo v slovenske vrtce vpisanih 7626 otrok priseljencev (Statistični urad Republike Slovenije, 2022).

Ker imajo otroci priseljenci z obvladovanjem jezika okolja pogosto težave, se ob vstopu v šolo soočajo s slabšimi učnimi rezultati in posledično slabšimi možnostmi nadaljnjega izobraževanja, z nižjo samopodobo, izgubo socialne identitete ter z občutkom odtujenosti in podrejenosti (Peček in Lesar, v Vižintin, 2017). Prav zato je pomembno, da se otroka priseljenca oz. otroka priseljencev že v predšolskem obdobju spodbuja k usvajanju jezika okolja, pri čemer igra pomembno vlogo vrtec s svojimi zaposlenimi (Zaman, 2020).

2.3 Spodbujanje dvojezičnosti v predšolskem obdobju

»Predšolsko obdobje je za učenje socialnih veščin, govora in jezika ter za razvijanje motoričnih spretnosti najpomembnejše obdobje v otrokovem razvoju« (Bratuž Mitrović, A., 2016). Naloga vrtca je, da vzgojitelji dejavnosti in delo načrtujejo z upoštevanjem omenjenih področij. Pri načrtovanju dela z otroki priseljenci si lahko pomagajo z dokumenti, ki zagotavljajo zakonsko podlago za vključevanje otrok tujcev. Mednje spadajo: *Kurikulum za vrtce* (1999), *Konvencija o otrokovih pravicah* (1989), *Bela knjiga o vzgoji in izobraževanju v Republiki Sloveniji* (2011), *Predlog programa dela z otroki priseljenci na področju predšolske vzgoje, osnovnošolskega in srednješolskega izobraževanja* (2018) ter *Smernice za vključevanje otrok priseljencev v vrtce in šole* (2012) (Kisilak, 2021). Področje učenja slovenščine kot jezika okolja v predšolskem obdobju je v omenjenih dokumentih obravnavano precej pomanjkljivo, zato so vzgojitelji pri nač rtovanju dela z otroki priseljenci pogosto prepuščeni lastni iniciativi in znanju.

Za otroke v prvem starostnem obdobju (od enega do treh let) poteka usvajanje jezika okolja le v okviru rednih dnevnih dejavnosti, kar pomeni, da otrok jezik usvaja spontano, z nenehno izpostavljenostjo jezikovnim dražljajem v okolici. Jezikovno razumevanje bo razvil glede na kontekst in vzgojiteljevo uporabo ustaljenih sporazumevalnih vzorcev (npr. “postavite se v vrsto”, “umijte si roke”). V drugem starostnem obdobju je učenje jezika bolj sistematično in načrtovano. Otroci se jezika okolja učijo v posebnih, manjših

skupinah. Oblike in metode dela se prilagodijo starosti in potrebam otrok (Predlog programa dela z otroki priseljenci na področju predšolske vzgoje, osnovnošolskega in srednješolskega izobraževanja, 2018). Po S. Rutar idr. (2018, str. 23–24, v Kisilak, 2021) je zaželeno, da se v vrtcu izvaja urice za jezik, kjer sodelujejo vsi otroci v oddelku, vodi pa jih vzgojitelj z dodatnimi znanji za poučevanje slovenščine kot drugega tujega jezika, zato je naloga vrtca, da vzgojiteljem zagotovi možnost dodatnega izobraževanja in usposabljanja, namenjenega pridobivanju dodatnih kompetenc za delo z otroki priseljenci.

2.4 Vloga vzgojitelja pri delu z dvojezičnimi otroci

Vzgojiteljem primanjkuje znanja za delo z otroki priseljenci, poleg tega pa velik problem predstavlja tudi neznanje jezika, ki je materni jezik otroka priseljenca, zato je lahko komunikacija tako z otrokom kot tudi s starši na začetku otežena. Obstajajo načini, ki pomagajo vzgojiteljem premostiti komunikacijsko oviro. Za razumevanje navodil in prikaz dnevne rutine lahko vzgojitelji uporabijo različne vizualne pripomočke, znakovno sporazumevanje, v veliko pomoč je tudi neverbalna komunikacija. V začetni komunikaciji naj bodo stavki kratki, besedišče pa osnovno. Ker kulturna raznolikost bogati, je zaželeno, da otrok priseljenec ostalim otrokom v skupini predstavi aktivnost v svojem jeziku – lahko gre za branje slikanice, recitiranje pesmice, predstavitev plesa itn. Obenem bo otrok skozi igro in interakcijo z vrstniki ter strokovnimi delavci spontano usvajal slovenščino kot jezik okolja (Smernice za vključevanje otrok priseljencev v vrtce in šole, 2012).

Pomembno je, da se vzgojitelj zaveda, da je vključevanje otrok v novo okolje dolgotrajen proces. M. A. Vižintin (2015, str. 39–40, v Kisilak, 2021) pravi, da otrok ob selitvi v tujo državo doživi kulturni šok, saj je v novem okolju priča drugačni kulturi, jeziku in družbenim prvinam. Naloga vzgojitelja je, da razvija občutek pripadnosti skupini, s čimer bo zagotovil, da bo otrokova stiska postopoma vedno manjša. Vzgojitelj si mora prizadevati za vzpostavitev sodelovanja s starši otroka priseljenca, saj bo otrok le tako lahko uspešno napredoval v usvajanju jezika okolja, ki predstavlja temelj za socialno vključenost, kasneje učno uspešnost, pozitivno samopodobo itn. Čeprav mora vzgojitelj stremeti k temu, da otrok usvoji jezik okolja, mora starše in otroka spodbujati k ohranjanju lastne kulturne identitete in jezika. Dobro znanje maternega jezika je namreč predpogoj za učenje drugega jezika (Domej, 2001, v Raztresen, 2015).

3 Spodbujanje govorno-jezikovnega razvoja otrok priseljencev v praksi

3.1 Metoda in postopek zbiranja podatkov

Da bi ugotovili, na kakšen način si v slovenskih vrtcih prizadevajo k vključevanju in spodbujanju govorno-jezikovnega razvoja otrok priseljencev, sva izvedli vprašalnik anketnega tipa, ki ga je ustrezno izpolnilo 41 zaposlenih iz različnih vrtcev po Sloveniji.

Anketni vprašalnik sva sestavili sami z orodjem Enka. Sestavljen je bil iz 14 vprašanj, od tega je bilo prvih pet vprašanj demografskega tipa. Vprašalnik je vseboval 6 vprašanj odprtega tipa, 3 vprašanja pol odprtega ter 5 vprašanj zaprtega tipa. Izpolnjevanje

posameznikom ni vzelo več kot 7 minut, sodelovanje pa je bilo anonimno. Vprašalnik sva poslali vodstvu več slovenskih vrtcev in jih prosili, da k izpolnjevanju spodbudijo svoje zaposlene. Dobili sva odgovore 41 sodelujočih, njihove odgovore sva nato natančno pregledali ter jih povzeli v nadaljevanju.

3.2 Rezultati

Vseh 41 anketirancev, ki so anketo ustrezno izpolnili, je bilo ženskega spola, kar nakazuje na feminizacijo v vzgojiteljskem poklicu. Nihče od anketiranih ni bil star več kot 61 let, medtem ko je bila več kot polovica anketiranih, natančneje 61 %, starih med 41 in 60 let, 32 % jih je bilo starih med 21 in 40 let , 7 % pa pod 20 let. Pričakovano se je delovna doba približno dveh tretjin anketiranih gibala med 11 in 30 leti. V vzorcu so izrazito prevladovale vzgojiteljice predšolskih otrok; pedagoški delavci (socialni pedagog, specialni pedagog, psiholog …) in posameznice z drugim nazivom (delovni terapevt, profesor, študent) so predstavljali zgolj eno tretjino vseh anketiranih. Največji delež anketiranih, natančneje 44 %, svoj poklic opravlja v osrednjeslovenski regiji, sledi dolenjska z 29 %, primorska (12 %), štajerska (10 %), notranjska (2 %) in Prekmurje (2 %). Zaposlenih s koroške in gorenjske regije v vzorcu ni bilo.

Iz odgovorov razberemo, da največ otrok, tako kot to potrdi tudi Statistični urad RS, prihaja iz držav bivše Jugoslavije, predvsem Bosne in Hercegovine, Hrvaške in Makedonije, veliko pa je tudi albansko govorečih otrok, ena izmed anketiranih ima v svoji skupini tudi otroka iz Ukrajine. Delež teh se je v zadnjih letih zaradi vojnih razmer na ukrajinskih tleh močno povečal (Radiotelevizija Slovenija, 2023). Od vseh popolnih odgovorov o številu priseljencev v skupini, sta le dve sodelujoči odgovorili, da v skupini nimajo otrok priseljencev, ostalih deset pa jih imajo od 1 pa vse do 9. V povprečju je v eni vrtčevski skupini anketiranih 2,67 otroka priseljenca. Glede na to, da je na to vprašanje v polnosti odgovorilo zgolj 12 sodelujočih, je vzorec premajhen in lahko tudi zavajajoč in zato ni primeren za posplošitev.

Na sprejem otroka v vrtcu se večina anketiranih pripravi s pomočjo staršev, saj se pred prihodom otroka v vrtec zberejo na sestanku ter se tudi s pomočjo prevajalcev pogovorijo o navadah otroka. Iz nadaljnjih odgovorov lahko nato razberemo večinoma dva načina priprave na otrokov vstop v vrtec. Nekatere anketirane same poskrbijo, da se seznanijo z osnovnimi frazami ter kulturnimi navadami otroka, nekatere pa spodbudijo starše, da se z otroki pogovorijo o prihajajočem prehodu, z njimi govorijo ter spoznavajo slovenski jezik in kulturo. Večina poudari tudi pomen neverbalne govorice v obliki slikovnega gradiva ter tudi gest, ki pomagajo, da se otroci hitreje in lažje vključijo v novo okolje. Sledi tudi priprava preostalih otrok v skupini, ki glede na odgovore večinoma poteka v obliki pogovora o državi, iz katere otrok prihaja, ali pa zgolj kot opozorilo, da se iz novega otroka ne norčujemo, ga povabimo k igri ipd.

Anketirane odgovarjajo, da otroke priseljence spodbujajo pri govorno-jezikovnem razvoju, tako da se z njimi pogovarjajo, večkrat ponovijo nove in najbolj uporabne fraze in besedne zveze ter so pri tem predvsem strpne. Poleg tega govorno-jezikovni razvoj razvijajo tudi z igro ter preprostimi slikovnimi gradivi. Posebej so omenile še velik vpliv pozitivnega odnosa odraslih do otrok priseljencev, saj se po tem zgledujejo tudi preostali otroci. V odgovorih lahko preberemo tudi, da so otroci zelo prilagodljivi, se hitro učijo in

socializirajo, vseeno pa je pomembno, da se zavedamo obdobja 3–4 mesecev, ki jih otrok potrebuje, da sam spregovori v slovenskem jeziku.

Največji izziv anketiranim predstavlja predvsem otrokov jezik ter sodelovanje s starši, nekoliko manj pa otrokova kultura. Pri spodbujanju govorno-jezikovnega razvoja otrok priseljencev si tako največ pomagajo z izkušnjami kolegic oz. kolegov, spletom; strokovnost ter ustreznost metod in načinov dela, pridobljenih na ta način, pa je včasih lahko vprašljiva. Nekoliko manj pa jim pomagajo izobraževanja, razni priročniki in dokumenti za delo z otroki priseljenci kot so npr. *Kurikulum za vrtce* (1999), *Konvencija o otrokovih pravicah* (1989), *Bela knjiga o vzgoji in izobraževanju v Republiki Sloveniji* (2011), *Predlog programa dela z otroki priseljenci na področju predšolske vzgoje, osnovnošolskega in srednješolskega izobraževanja* (2018) ter *Smernice za vključevanje otrok priseljencev v vrtce in šole* (2012) (Kisilak, 2021). Nekatere se pri spodbujanju govorno-jezikovnega razvoja otrok priseljencev osredotočajo na svoje lastne izkušnje ter v proces vključijo tudi starše. Zanimivo je tudi, da je 75% anketiranih odgovorilo, da se čuti opolnomočeno za delo z otroki priseljenci, preostalih 25% pa ne. Slednje poudarjajo, da je odvisno tudi, kateri jezik otrok govori in kakšen je odnos staršev do slovenskega jezika; pri tem pa čutijo potrebo po delavnicah za delo s starši otrok priseljencev.

4 Zaključki

Glede na rezultate raziskave meniva, da se anketirani vzgojitelji v slovenskih vrtcih zavedajo svoje vloge in odgovornosti pri vključevanju otrok priseljencev v novo kulturno in družbeno okolje. Kljub temu, da se anketirani vzgojitelji večinoma čutijo opolnomočene za delo z otroki priseljenci, jim največjo oviro pri delo z njimi še vedno predstavlja neznanje otrokovega maternega jezika, posledično pa je oteženo tudi sodelovanje s starši. Slovenski vrtci bi v pomoč vzgojiteljem za nekajmesečno obdobje lahko zagotovili pomoč prevajalcev, ki ne bi bili prisotni zgolj na uvodnem sestanku, temveč tudi pri delu v skupini in pri sodelovanju s starši. Vrtec bi prav tako moral poskrbeti in spodbuditi vzgojitelje k udeležbi na dodatnih izobraževanjih s področja dela z otroki priseljenci, kjer bi vzgojiteljem podali še več materiala za njihovo konstruktivno delo. Do večje ozaveščenosti vzgojiteljev bi pripomoglo tudi, če bi izvedli akcijo o spoznavanju dvojezičnosti ter s tem povezane delavnice o spodbujanju govorno-jezikovnega razvoja otrok priseljencev. Prizadevati bi si morali, da čim več vzgojiteljev pridobi kompetence za poučevanje slovenščine kot tudi drugega tujega jezika, saj je to za posameznika kot tudi njegovo delo izjemno uporabno znanje, predvsem v današnjem času, ko narašča število priseljencev in njihovih otrok. Spodbujanje govorno-jezikovnega razvoja otrok priseljencev bi lahko bolj podrobno raziskali tudi, če bi anketo izvedli izven časa počitnic in dopustov, saj meniva, da je bil zato odziv nekoliko manjši, rezultati pa zato manj zanesljivi.

Usvojitev jezika okolja otroku priseljencu bistveno olajša adaptacijo v novem okolju, saj je znanje jezika ključno za tkanje socialne mreže, za izobraževanje in delovanje v družbi. Človeško bitje je za usvajanje jezikov najdovzetnejše prav v obdobju zgodnjega otroštva, zato je pomembno, da si vrtec s svojimi zaposlenimi skozi sodelovanje s starši prizadeva za čim uspešnejšo usvojitev jezika okolja, pri čemer se ne sme zanemariti otrokovega maternega jezika. Pomemben vpliv imajo tudi starši otrok priseljencev, ki lahko svoje otroke pripravijo ter najbolj pritegnejo k učenju tujega jezika, saj svoje otroke tudi najbolj poznajo. Vsekakor pa so starši tudi otrokov zgled v govorno-jezikovni rabi ter skupaj z

vzgojitelji ključne osebe, ki spodbujajo otrokov zgodnje, a vsekakor najpomembnejše obdobje razvoja dvojezičnosti.

6 Literatura

[1] Bratuž Mitrović, A. (2016). Vključevanje otrok tujcev v vrtec. https://www.medkulturnost.si/wp-content/uploads/2020/01/Vklju%C4%8Devanje-otrok-priseljencev-v-vrtec.pdf

[2] Fierro-Cobas, V. in Chan, E. (2011). Language development in bilingual children: A primer for pediatricians. Contemporary pediatrics, 18(7), 79–98. http://courses.washington.edu/sop/Bilingualism_PrimerPediatricians.pdf

[3] Furlan, M. (2002). Simultana ali sukcesivna dvojezičnost–to je dilema. *Psihološka obzorja, 11*(4), 55–68. https://www.dlib.si/details/URN:NBN:SI:DOC-BX973RKR

[4] Kisilak, N. (2021). *Vključevanje otrok priseljencev v vrtec* [Diplomsko delo]. Univerza v Mariboru, Pedagoška fakulteta. https://dk.um.si/Dokument.php?id=154898&lang=slv

[5] Prebeg-Vilke, M. (1995). *Otrok in jeziki. Materinščina in drugi jeziki naših otrok*. Sanjska knjiga.

[6] Predlog programa dela z otroki priseljenci na področju predšolske vzgoje, osnovnošolskega in srednješolskega izobraževanja. (2018). ISA institut. https://www.medkulturnost.si/wp-content/uploads/2018/09/Predlog-programa-dela-z-otroki-priseljenci.pdf

[7] Radiotelevizija Slovenija (15. 7. 2023). *Selitveni prirast pozitiven, največ prispevali Ukrajinci*. https://www.rtvslo.si/slovenija/selitveni-prirast-pozitiven-najvec-prispevali-ukrajinci/675205

[8] Raztresen, K. (2015). *Nudenje logopedskih storitev pripadnikom neslovenskih jezikovnih in narodnih skupnosti v Republiki Sloveniji* [Diplomsko delo]. Univerza v Ljubljani, Pedagoška fakulteta. http://pefprints.pef.uni-lj.si/2884/1/Diplomsko_delo_Katja_Raztresen.pdf

[9] *Smernice za vključevanje otrok priseljencev v vrtce in šole.* (2012). Zavod Republike Slovenije za šolstvo. http://eportal.mss.edus.si/msswww/programi2014/programi/media/pdf/smernice/cistopis_Smernice_vkljucevanje_otrok_priseljencev.pdf

[10] Statistični urad Republike Slovenije. (b. d.). https://pxweb.stat.si/SiStat/sl/Podrocja/Index/192/izobrazevanje

[11] Vižintin, M. (2017). *Medkulturna vzgoja in izobraževanje*. Založba ZRC.

[12] Zaman, E. (2020). Slovenščina kot drugi jezik v vrtcih in šolah: za otroke priseljence. *Vzgoja*, *22*(86), 44–45. http://www.dlib.si/details/URN:NBN:SI:doc-V0XLCBGU

PROBLEMATIKA VEČNIH KEMIKALIJ PFAS V PAPIRNATIH SLAMICAH
"ŠTUDENTSKA TEHNIŠKA KONFERENCA - ŠTEKAM"

Nejc Pavlovič, Nejc Karo Lindič

Povzetek

Evropska unija je s ciljem zmanjšanja plastičnih odpadkov uvedla prepoved izdelkov iz plastike za enkratno uporabo, kar je spodbudilo uporabo alternativ, kot so papirnate slamice. Te so postale priljubljene zaradi dostopnosti in prepričanja, da so okolju prijazne. Papir, iz katerega so narejene, vsebuje kemikalije, kot so Per- in polifluoroalkilne snovi (PFAS), ki zagotavljajo vodoodpornost, vendar so te snovi lahko škodljive tako za okolje kot za zdravje ljudi. Dve neodvisni raziskavi sta dokazali prisotnost PFAS v večini papirnatih slamic, kar odpira pomembna vprašanja o njihovi varnosti. PFAS so izjemno obstojne kemikalije z veliko podskupinami. Zaradi močnih vezi so obstojne v naravi, kjer povzročajo škodljive vplive na ekosisteme. Kopičijo se namreč v vodi in prsteh, s tem pa vstopajo v prehranjevalno verigo. Pri ljudeh se v telesu bioakumulirajo predvsem perfluoroalkilne kisline (PFAAs), ki so toksične za nekatere organe. Preučuje pa se tudi rakotvornost kislin PFAAs, najpogosteje zastopanih podvrsti delcev PFAS v papirnatih slamicah. Čeprav so PFAS prisotne v skoraj vseh papirnatih slamicah obeh raziskav, je vnos s pitjem po takih slamicah relativno majhen. Dolgotrajna izpostavljenost tem delcem in njihova potencialna nevarnost zahtevata dodatne raziskave.

1 Uvod

Ena izmed politik zelenega prehoda Evropske unije je ukinitev izdelkov iz plastike za enkratno uporabo. Na trgu se je pojavilo veliko nadomestnih proizvodov, predvsem iz papirja. Tak primer so tudi papirnate slamice, ki so v restavracijah in kavarnah začele nadomeščati plastične. Zaradi široke in tudi cenovne dostopnosti so papirnate slamice postale pogostejše kot kovinske ali steklene, v družbi pa veljajo za popolnoma neškodljive okolju. Pogostokrat ljudje zmotno mislimo, da se papir v naravi hitro razgradi in pri tem ne pusti posledic, za razliko od plastike pa negativni vplivi na prvi pogled niso očitni. Vendar se moramo zavedati, da papir, namenjen za uporabo v slamicah ali kozarcih, za trdnost in obstojnost potrebuje kar nekaj dodatnih primesi, ki pa niso nujno okolju prijazne, prav tako pa lahko negativno vplivajo tudi na človeka. Namen tega članka je povzeti določene ugotovitve doslej izvedenih raziskav. V tem prispevku se bomo osredotočili na morebitne vplive kemikalij v papirnatih slamicah in ovrednotili smiselnost reševanja problemov plastičnih odpadkov s papirnatimi nadomestki, ki lahko prav tako vsebujejo škodljive snovi, obenem pa želimo podbuditi bolj celosten pristop k reševanju sodobnih problemov.

2 Omejitev uporabe plastičnih slamic

Zaradi težnje po zmanjšanju plastičnih odpadkov je bila v Evropski uniji sprejeta direktiva Evropskega parlamenta in Sveta Evrope o zmanjšanju vpliva nekaterih plastičnih proizvodov na okolje. Cilj direktive, ki je bila sprejeta leta 2019, je zmanjšati količino plastičnih odpadkov in njenega kopičenja v okolju ter spodbuditi uporabo krožnih proizvodov, torej takih, ki se lahko uporabijo večkrat. Skladno s to direktivo je plastični proizvod za enkratno uporabo tak, ki je vsaj delno izdelan iz plastike, hkrati pa ni namenjen večkratni uporabi. Ker omenjena direktiva prepoveduje prodajo te vrste proizvodov, je bila prodaja plastičnih slamic po vsej Evropski uniji posledično prepovedana. [1] Tudi v Sloveniji je bila prodaja plastičnih slamic kot tudi drugih proizvodov iz plastike za enkratno uporabo od leta 2021 prepovedana z uredbo, ki je v skladu z omenjeno direktivo. Izjema velja le za plastične slamice, ki so na trgu dostopne kot medicinski pripomoček in skladno z Uredbo 2017/745/EU. [2]

Glavni cilj te direktive je že omenjeno zmanjšanje količine odpadkov in s tem varovanje okolja in zdravja ljudi. Eden večjih problemov so morski odpadki, saj naj bi bilo od 80 do 85 % vseh odpadkov na morskih obalah iz plastike, v to pa niso všteti tudi proizvodi iz mikroplastike. Uredba ne navaja konkretnih alternativ plastičnim proizvodom, priporoča le, da jih je možno večkrat uporabiti ali da jih je možno reciklirati. [1] Posledično pa se zastavlja vprašanje, kako vplivajo na zdravje in okolje nadomestni izdelki iz papirja, ki lahko vsebujejo različne okolju in zdravju nevarne kemikalije, kot so PFAS (per- in polifluoroalkilne snovi).

3 Papirnate slamice kot alternativa plastičnim

Ob prepovedi plastičnih slamic za enkratno uporabo so se na svetovnem trgu pojavile mnoge alternative, kot so bambusove, steklene in kovinske slamice, najpogostejše pa so papirnate slamice. Te so se verjetno najbolj uveljavile zaradi cenovne dostopnosti, priročne oblike in družbene prepričanosti o njihovi hitri razgradljivosti.

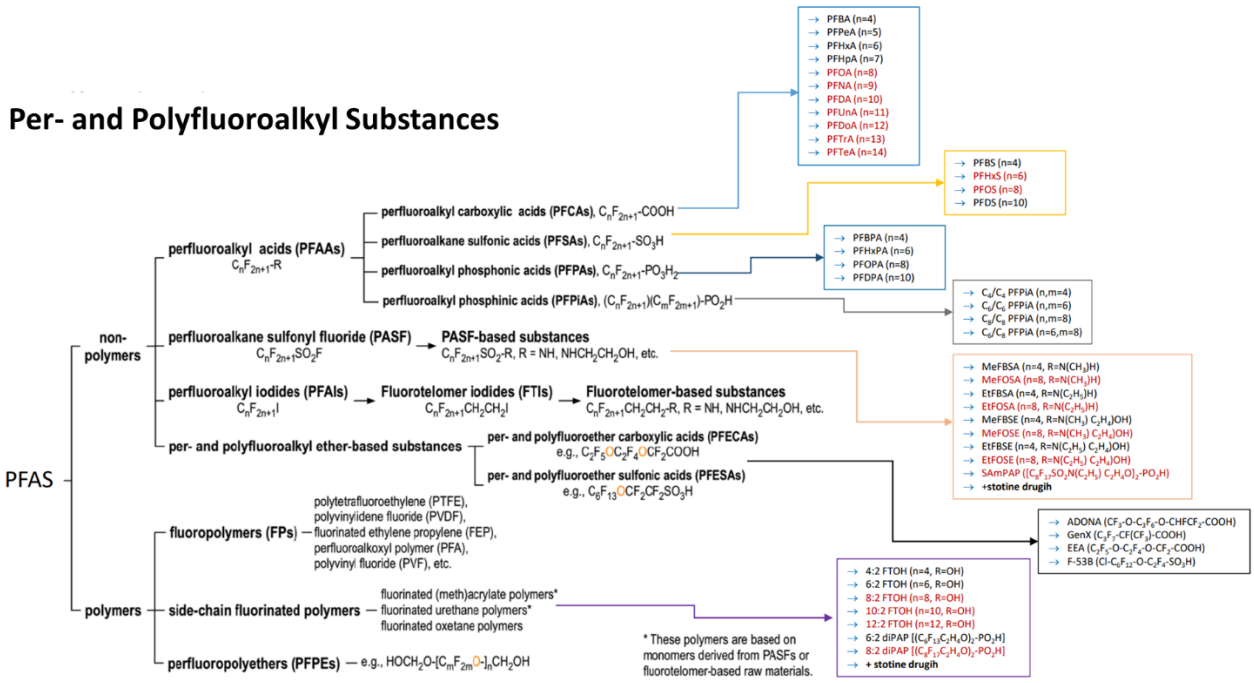
3.1 Sestava papirnatih slamic

Papir, ki sestavlja slamice za enkratno uporabo, mora biti vodoodporen. Da je ta lastnost dosežena, so papirni osnovi med postopkom izdelave pogosto dodane per- in polifluoroalkilne snovi (PFAS). [5]

3.2 (Kaj so) PFAS

Per- in polifluoroalkilne snovi (PFAS) so skupina tisočih umetnih kemikalij, ki se v družbi široko uporabljajo. Nekatere snovi te družine so uvrščene tudi med obstojna organska onesnaževala (ang. “POPs”). Vsebujejo enega ali več ogljikovih atomov z vezanimi fluorovimi atomi namesto vodikovih atomov. Snov ima splošno formulo C_nF_{2n+1}-R, kjer R predstavlja dodatne funkcionalne skupine (npr. sulfonat, karboksilna kislina) (Slika 1). Per- ali polifluoroalkilna enota je kemično in termično zelo stabilna z izjemno močnimi ogljiko-fluorovimi vezmi ter je

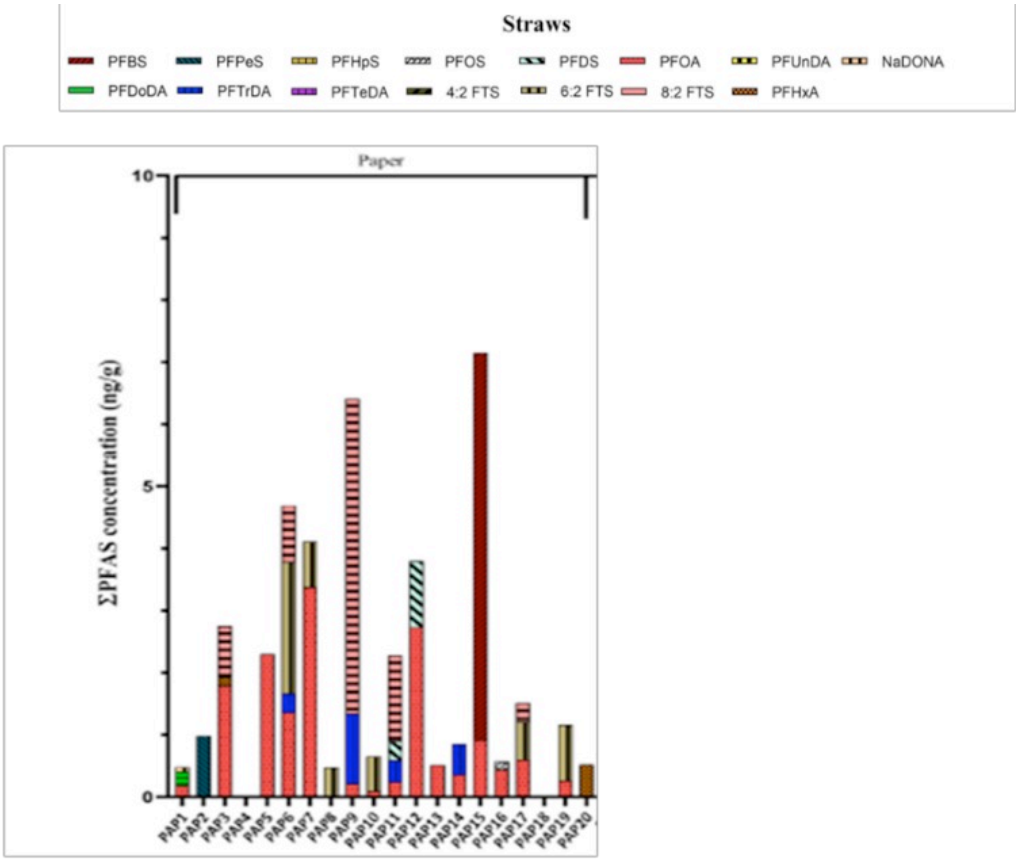
odporna na vodo in masti. Zaradi teh fizikalnih in kemijskih lastnosti so PFAS idealne površinsko aktivne snovi in primerne za izdelke za zaščito površin. [3] Med glavne sektorje, ki uporabljajo PFAS, spadajo vesoljska in avtomobilska industrija, letalstvo, proizvodnja materialov za stik z živili, tekstilna predelava, gradbeništvo in medicina. Poznamo več tisoč različnih vrst PFAS. Najbolj razširjene so perfluoroalkilne kisline, še posebej perfluorooktanojska kislina (PFOA) in perfluorooktan sulfonska kislina (PFOS). [11]



Slika 1: Družina PFAS snovi, [11]

3.3 Vsebnost PFAS v papirnatih slamicah

Raziskava iz leta 2021, ki je potekala na Univerzi na Floridi pod vodstvom Aline Timshine, je pokazala vsebnost PFAS v papirnatih in drugih rastlinsko vezanih slamicah. V 36 od 38 od tako sestavljenih slamic je bilo zaznanih 21 od 53 različnih PFAS. [4] V poznejši razširjeni raziskavi, izvedeni v Belgiji pod vodstvom Thima Groffena iz leta 2023, so raziskovali prisotnost PFAS v slamicah iz papirja, bambusa, nerjavečega jekla, stekla in plastike. Vzorce so zbirali po veleblagovnicah, restavracijah s hitro hrano in drugih trgovinah. Zbrali so 20 vzorcev, med katerimi jih je 90 % vsebovalo 16 različnih podskupin PFAS. V skoraj vseh papirnatih slamicah so bile snovi PFAS, njihova maksimalna koncentracija je bila 7.15 ng/g. Najpogostejša oblika je bila perfluorooktanojska kislina (PFOA) (na grafu označena z rdečo). [5] PFAAs veljajo za zelo trdovratne/obstojne in v okolju mobilne kisline. Za njih je značilno, da so amfifilne, kar pomeni, da imajo tako polarni kot nepolarni značaj.



Slika 2: Vsebnost delcev PFAS v papirnatih slamicah po evropski raziskavi, [5]

4 Problematika vsebnosti nerazgradljivih delcev PFAS v papirnatih slamicah

Zaradi vsestranske in prekomerne uporabe delcev PFAS v različnih materialih so te zaznali že v človeškem telesu in povsod v naravi, celo v zelo odmaknjenih legah. Vsestranska uporabnost, ki je posledica velike skupine podvrsti delcev PFAS in nekaterih njihovih ključnih lastnosti, kot so hidrofobnost, oleofobnost, velika površinska aktivnost in termostabilnost, je razlog, da te delce danes najdemo že povsod. Čeprav so delci PFAS izjemno obstojni, lahko pod določenimi pogoji, npr. med zgorevanjem, razpadejo na druge delce, kot so perfluoroalkilne kisline (PFAAs). Med najbolj obstojni podvrsti sodita perfluorooktanojska kislina (PFOA) in perfluorooktan sulfonska kislina (PFOS), ki lahko negativno vplivata na človeško telo in okolje. Več raziskav je dokazalo, da lahko PFOA, PFOS in druge PFAAs privedejo do povišanih ravni holesterola v krvi, toksičnosti za jetra in reproduktivne organe ter do nastanka raka. Kljub temu, da ni veliko raziskav, ki bi potrjevale vsesplošno nevarnost delcev PFAS, so nevarnosti delcev PFAAs dovolj pomembne za celotno skupino PFAS. PFAAs so namreč najpogostejši končni produkti razkroja delcev PFAS, ki imajo zmožnost bioakumulacije v človeškem telesu, telesu vodnih živali in okolju. [6]

4.1 Vpliv PFAS na okolje – ekotoksikološke raziskave

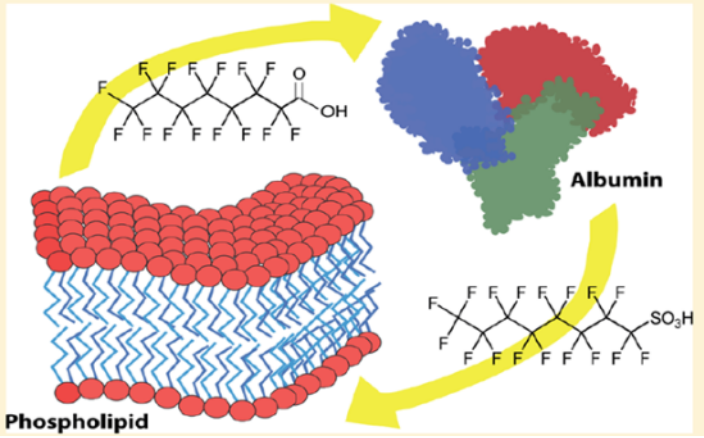
PFAS se zaradi obstojnih vezi in zato nezmožnosti hitre razgradnje v okolju kopičijo – posledično so znane kot »večne kemikalije« (ang. “forever chemicals”). Razpolovna doba nekaterih PFAS je ocenjena na več kot 1000 let v zemlji. [6] Njihova prisotnost lahko povzroči škodljive vplive na rastline, vodne organizme in kopenske prostoživeče živali. PFAS onesnažujejo zemljo in površinsko ter podzemno vodo. Toksičnost snovi se povečuje z daljšanjem verige perfluoriranih ogljikovih atomov. Daljše verige so pogostejše v sedimentih, medtem ko so krajše prisotne v vodah. PFAS v tleh omejujejo habitatno funkcijo tal, saj lahko njihova toksičnost in prisotnost oksidativnega stresa negativno vplivata na preživetje talnih organizmov. V tako onesnaženi prsti se zaradi večje stopnje umrljivosti in zaviranja rasti izgubi večje število črvov in deževnikov. Perfluoroalkilne kisline (PFAAs) se prek prsti bioakumulirajo v rastline in podzemne organizme, kar predstavlja vstopno točko za prehranjevalno verigo in posledično prenos na človeka. [7]

4.2 Bioakumulacija PFAAs v človeškem telesu in toksičnost

Različne raziskave so že preučevale bioakumulacijo delcev PFAAs v človekovem telesu. Delci PFAAs pa so tudi najpogostejši končni produkt razpada delcev PFAS, ki so jih odkrili v večini papirnatih slamic evropske raziskave. [6] V telesu se zaradi svojih lastnosti ne vežejo na lipide, ampak na proteine, predvsem na albumin v krvi, ki te delce prenaša naprej po telesu. Posledično se PFAA naprej vežejo na lipide v celični membrani po celem telesu. [8] Pri raziskavah o prisotnosti delcev PFAAs v človeškem telesu se zato uporablja humani biomonitoring (HBM), kjer se pri majhnem vzorcu krvi meri prisotnost omenjenih kemikalij. [9] PFAAs so pogosto tudi v maščobnih kislinah, ki nase vežejo beljakovine in se kopičijo tudi v jetrih in drugih organih, bogatih s proteini. Osem različnih raziskav, opravljenih na nekaterih sesalcih in ribah, je pokazalo, da je bila pri 78 % vzorčenih živali najvišja koncentracija PFAAs v krvi in v jetrih. [8] Na bioakumulacijo PFAAs v človeškem telesu vpliva tudi dolžina verige posameznega delca PFAAs. Delci z daljšimi verigami in različne kisline, kot sta PFSAs (perfluoroalkan sulfonske kisline, C_nF_{2n+1}-SO_3H) in PFCAs (perfluoroalkil karboksilne kisline, C_nF_{2n+1}-COOH), imajo višji bioakumulacijski potencial. Ti delci so bili zaznani tudi v različnih papirnatih slamicah evropske in ameriške raziskave. Delci PFAAs s krajšimi verigami se iz telesa izločijo hitreje. [6]

Ker se PFSAs in PFCAs vežejo na albumin v krvi in s tem pridejo do organov, kot so jetra, ledvice in ščitnica, so lahko za te organe toksični. Nekateri delci so lahko toksični tudi za endokrine žleze v ščitnici in receptorje za estrogen in androgen, saj so ti proteinski in posledično nase vežejo delce PFAAs. Toksični so lahko tudi za embrionalni razvoj, saj lahko delci PFOA in PFOS vplivajo rast ploda v maternici. Ostali PFAAs imajo vpliv tudi na imunski sistem, saj lahko zavirajo imunski odziv in s tem povečajo tveganje za razvoj bolezni, odziv cepiv pa je manj učinkovit. Glede na ugotovitve California Office of Environmental Health Hazard Assessement obstaja tudi korelacija med PFOS in poškodbo verige DNK. [6]

Glede na priporočila Agencije ZDA za varstvo okolja (U. S. Environmental Protection Agency) je referenčna doza za PFOA za človeka 20 ng/kg/dan, medtem ko Agencija za strupene snovi in register bolezni (Agency for Toxic Substances and Disease Registry) to dozo postavlja pri 3 ng/kg/dan [4], področje pa je še zelo novo in je zato potrebnih več raziskav.



Slika 3: Prehod delcev PFAAs med albuminom in fosfolipidnim dvoslojem, [8]

4.3 Rakotvornost

Različne raziskave potrjujejo, da so delci PFAAs, predvsem PFOA, rakotvorni. PFOA je bila leta 2014 uvrščena na seznam možnih rakotvornih snovi, leta 2023 pa jo je delovna skupina Mednarodne agencije za raziskave raka (International Agency for Research on Cancer – IARC) razglasila za človeku rakotvorno snov. Najpogostejše oblike rakavih obolenj, kjer obstaja povezava z delci PFOA, so rak na ledvicah, modih, dojkah in ščitnici. [10] Ker je raziskav, ki bi z gotovostjo potrjevale vsesplošno rakotvornost delcev PFAAs, premalo in ker ni podatka, kakšna doza delcev bi lahko povzročala raka, je povezava med delci PFAAs, rakom in papirnatimi slamicami negotova.

5 Ugotovitve

V papirnatih slamicah so zaznali koncentracije okolju in ljudem škodljivih snovi. Obe opravljeni raziskavi sta pokazali vsebnost delcev PFAS v skoraj vseh testiranih vzorcih. Izmed vseh vzorcev samo 4 slamice (od 58) niso vsebovale delcev PFAS. Tudi ti štirje vzorci bi lahko vsebovali delce PFAS, a raziskavi nista zajemali vseh snovi te družine, prav tako naprava za merjenje ni zaznala možnih izjemno majhnih koncentracij snovi PFAS. Možna bi bila tudi prisotnost drugih delcev PFAS, ki pa v raziskavah niso bili zajeti. PFAS so v slamicah pogosto dodani zaradi hidrofobnih značilnosti, lahko pa so posledica že prej onesnažene papirne celuloze (osnove). Kot je dokazano, so delci PFAS prisotni v prsti in se zaradi bioakumulacijskega potenciala lahko nenačrtno prenesejo v papirno osnovo.

Najpogostejše snovi iz te skupine kemikalij, najdene v slamicah, so bile perfluoroalkilne kisline, izmed teh pa je bila najpogostejša PFOA. Ta ob enkratnem vnosu v telo ne predstavlja resnejših

problemov, saj referenčna doza ob pitju z eno slamico ni dosežena. PFAAs (med njimi PFOA) pa se v telesu nabirajo in dokazano vežejo na fosfolipidni dvosloj in hormonske receptorje za estrogen in androgen. Kot "večne kemikalije" PFAS (med njimi tudi PFAAs) v naravi povzročajo onesnaženje vodnih ekosistemov in se kopičijo v zemlji. Zaradi obstojnosti v naravi, zmožnosti kopičenja in negativnega vpliva na človeka so papirnate slamice, ki vsebujejo PFAS, okoljsko in zdravstveno vprašljive.

6 Zaključki

Čeprav lahko PFAS negativno vplivajo na človeško telo, je dejanska količina delcev, vnesenih s pitjem po papirnatih slamicah, zaenkrat še pomanjkljivo raziskana, zato njihova morebitna škodljivost za zdravje še ni znana. Slamice s PFAS so lahko škodljive tudi kot odpadek, saj PFAS pri razgradnji slamic vstopijo v ekosisteme. Da bomo z gotovostjo zatrdili, ali papirnate slamice manj škodujejo okolju kot plastične, bodo potrebne dodatne raziskave. Potrebne bi bile raziskave predvsem na področju dolgotrajne izpostavljenosti celic in organizmov dejanskim fiziološko dosegljivim koncentracijam PFAS in raziskave, ki bi ugotovile količine vnosa PFAS med pitjem po papirnatih slamicah. Pri tem bi bilo smiselno preučiti različne pogoje, pri katerih je slamica v stiku z tekočino (temperature, čas), ter upoštevati tudi vrsto pijače (sladka, kisla, gazirana, alkoholna …). S tako opravljenimi študijami bi dobili boljši vpogled v morebitna tveganja za zdravje in okolje, kar bi omogočilo ustrezne omejitve na področju uporabe PFAS v izdelkih za vsakdanjo rabo. S tem bi zaščitili tako ljudi pred morebitnimi negativnimi učinki na zdravje kot tudi pomagali ohraniti naravne ekosisteme in jih zaščititi pred onesnaženjem. Pred nadaljnjim omejevanjem plastičnih proizvodov za enkratno uporabo bi bilo posledično smiselno postaviti bolj natančne in premišljene smernice ter alternative.

7 Literatura

[1] Direktiva Evropskega parlamenta in Sveta o zmanjšanju vpliva nekaterih plastičnih proizvodov na okolje, 2019, https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-11-2019-REV-1/sl/pdf

[2] Uredba o zmanjšanju vpliva nekaterih plastičnih proizvodov na okolje, PISRS, 2022, https://pisrs.si/pregledPredpisa?id=URED8415

[3] Bevin E. Blake, Suzanne E. Fenton, Early life exposure to per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) and latent health outcomes: A review including the placenta as a target tissue and possible driver of peri- and postnatal effects, Toxicology, Volume 443, 2020, 152565, https://doi.org/10.1016/j.tox.2020.152565

[4] Timshina, Juan J. Aristizabal-Henao, Bianca F. Da Silva, John A. Bowden, The last straw: Characterization of per- and polyfluoroalkyl substances in commercially-available plant-based drinking straws, Chemosphere, Volume 277, 2021, 130238, https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130238

[5] Pauline Boisacq, Maarten De Keuster, Els Prinsen, Yunsun Jeong, LievenBervoets, Marcel Eens, Adrian Covaci, Tim Willems & Thimo Groffen, Assessment of poly- and perfluoroalkly substances in commercially available drinking straws using targeted and suspect screening approaches, 2023, Food Additives & Contaminants: Part A, 40(9), 1230–1241, https://doi.org/10.1080/19440049.2023.2240908

[6] Simona A. Bălan, Thomas A. Bruton, Kimberly G. Hazard, Towards a PFAS-free future, Green Chemistry Series No. 81, The Royal Society of Chemistry, 2024

[7] Tatiane Medeiros Melo, Marina Schauerte, Annika Bluhm, Michal Slaný, Michael Paller, Nanthi Bolan, Julian Bosch, Andreas Fritzsche, Jörg Rinklebe, Ecotoxicological effects of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) and of a new PFAS adsorbing organoclay to immobilize PFAS in soils on earthworms and plants, Journal of Hazardous Materials, Volume 433, 2022, 128771, https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128771

[8] Carla A. Ng and Konrad Hungerbühler, Bioaccumulation of Perfluorinated Alkyl Acids: Observations and Models, Environmental Science & Technology, 2014, 48 (9), 4637-4648, https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es404008g

[9] Per- in polifluoroalkilne snovi PFAS, NIJZ, https://nijz.si/wp-content/uploads/2023/06/PFAS.pdf

[10] PFAS Exposure and Risk of Cancer, National cancer institute https://dceg.cancer.gov/research/what-we-study/pfas

[11] PFAS – Per – per- in polifluoroalkilne snovi, zakaj so „večne“ ?, NIJZ, https://nijz.si/wp-content/uploads/2023/11/PFAS-per-in-polifluoroalkilne-snovi-zakaj-so-vecne.pdf

RAČUNALNIŠKA SIMULACIJA DOVAJANJA UČINKOVINE ZA KEMOTERAPIJO PREK TIKSOTROPNEGA MEDIJA

Jacopo Komic, Enej Istenič, Miha Brojan

Povzetek

Raziskave na področju onkologije so prinesle več različnih pristopov in postopkov zdravljenja rakavih obolenj, med katerimi je kemoterapija eden izmed najpogostejših. Glavni cilj terapije je uničenje rakavih celic, za kar so uporabljene močne človeku toksične kemikalije. Same spojine so tako dizajnirane, da v čim večji meri učinkujejo na celice z rakavimi lastnostmi, kar pa ne pomeni, da so do drugih celic nedolžne. Lokalnost delovanja zdravila je zato ključnega pomena, saj bo del kemikalije škodoval zdravemu tkivu. Za ta namen je lahko uporabna tiksotropija, saj višja viskoznost omeji sposobnost zdravila, da se prekomerno širi po tkivu oziroma telesu, kar pomeni, da je razmerje med uničenimi rakavimi in zdravimi celicami višje. Poleg tega, lahko viskoznost upočasni sprostitev učinkovine iz fluida, kar omogoča daljše trajanje delovanja zdravila. Sam pojav tiksotropije pa je že fascinanten, ki raziskovalcem, kljub dobremu razumevanju karakterističnih fizikalnih lastnosti, še vedno ni izdal splošnega reološkega modela. S tem se lahko pričakuje, da bo zdravilo, kateremu so bile inducirane tiksotropne lastnosti, v primerjavi z običajnim zdravilom, ki temelji na newtonski viskoznosti, zasedalo manjši volumen tkiva v odvisnosti od časa. To bi lahko omogočalo večji nadzor vpliva kemikalij na rakave oziroma zdrave celice in torej pripravo specifične terapije za vsak primer, kar bi potencialno dvignilo učinkovitost zdravljenja in omejilo nezaželene stranske učinke.

1 Uvod

Kemoterapija je lahko sistemska ali lokalna. Sistemska se uporablja, ko je rak že metastaziral, kar pomeni, da se je iz izvorne lokacije, prek krvnega obtoka, limfatičnega sistema ali z direktno invazijo, začel širiti v druge dele telesa. V tem primeru je terapija izvedena z intravenozno injekcijo ali oralno s ciljem, da učinkovina doseže celotno telo. Zaradi tega, so vse celice podvržene toksičnosti in hud udarec utrpijo tudi hitro delilne celice, ki niso rakave (npr. celice lasnih mešičkov, sluznice prebavnega trakta, kostnega mozga, itn.), kar povzroči znane stranske učinke (izpadanje las, bruhanje, zmanjšanje števila krvnih celic, itn.). Lokalna kemoterapija pa se uporablja, ko je rak še omejen, z namenom učinkovanja v čim večji meri na škodljive celice in v čim manjši meri na zdrave, kar pa ne zagotavlja, da ne bo kemikalija vseeno dosegla krvnega

obtoka in tako celotno telo ter povzročila stranske učinke [1].

Tiksotropija je potencialno lahko uporabna pri lokalni kemoterapiji. Strižna obremenitev med injiciranjem bi povzročila padec viskoznosti ter posledično enostavnejše brizganje. Zatem bi tiksotropnemu zdravilu ponovno narasla viskoznost in krepko omejila zmožnost nadaljnega prekomernega širjenja po tkivu. To pomeni, da bi se s primeru prilagojenimi postopki lahko "ciljalo" rakavo tvorbo; če se učinkovina zadrži v manjšem (ustreznem) volumnu, se več kemikalije sproži na škodljive celice in posledično manj na zdrave. Poleg tega lahko viskoznost omogoči počasnejše spuščanje spojine iz medija, kar povzroči daljše obdobje učinkovanja in manjše nelagodje bolnika.

Mehanske obremenitve lahko disperzijskim fluidom povzročijo kompleksne spremembe v mikrostrukturi; zaradi tega pride do nastopa različnih pojavov, med katerimi je tiksotropija. Reološki model, ki bi splošno veljal za opis širokega spektra fluidov je dandanes še vedno neznan [2].

Definicija tiksotropije je dovolj trdno postavljena; raziskovalci se strinjajo v tem, da je to zvezno zmanjševanje viskoznosti, ko je fluid strižno obremenjen in kasnejša povrnitev začetne viskoznosti, ko je strižna obremenitev prekinjena. Stebri definicije so osnovanost pojava na viskoznosti, časovna odvisnost viskoznosti in reverzibilnost fenomena [2].

Reološko vedenje tiksotropnega fluida je mogoče razumeti na podlagi mikrostrukture, ki je odvisna od mehanske zgodovine vzorca. Relativno šibke privlačne sile med atomi povzročijo nastanek agregatov, ki se običajno razvijejo v mrežasto strukturo, ki zapolni volumen kapljevine. Medatomske vezi so dovolj šibke, da jih strig in posledično tečenje prelomi. Posledica tega je manjši upor proti toku oziroma manjša viskoznost. Ko je strižna obremenitev zaustavljena, je atomom omogočena ponovna povezava v agregate in omrežje s pomočjo šibkih vezi - ta proces ni trenuten. Tako je ponovno dosežena začetna viskoznost oziroma upor proti tečenju. Vredno je omeniti, da je zmerna strižna obremenitev in posledična zmerna hitrost tečenja v nekaterih primerih lahko vzrok za rast agregatov, saj namesto da bi vezi podirala, vzbuja trke med delci, ki se tako lažje med sabo povežejo. Na mikrostrukturo fluida se lahko vpliva z izbiro različnih zmernih obremenitev oziroma kombinacij le teh (ali odsotnosti) - to je strukturna histereza. Ko je fluid neobremenjen že toliko časa, da je omrežje zapolnilo volumen, se material začne naknadno starati prek strukturnih preureditev. Ključni mehanizmi pri nastopu tiksotropije so van der Waalsove sile, Coulombove sile, vodikova vez, sterično oviranje in Brownovo gibanje [2].

2 Metode dela in potek raziskave

Modeliranje toka kompleksnega fluida po človeškem tkivu ni trivialno in zato so potrebne določene predpostavke. Viskoznost zdravila je podana v obliki:

$$\mu = \mu_0 \lambda^n, \tag{1}$$

kjer je μ_0 vrednost neobremenjenega fluida [2]. Koeficient n predstavlja "moč" odvisnosti viskoznosti od strukturnega parametra λ; ta je podan z enačbo (2):

$$\frac{\mathrm{d}\lambda}{\mathrm{d}t} = h_+ (1 - \lambda) - h_- \dot{\gamma}\, \lambda, \tag{2}$$

kjer sta h_+ in h_- parametra, ki predstavljata stopnjo rasti ter stopnjo razpada strukture [3]. Tok po tkivu se lahko modelira kot tok po poroznem mediju in zato je potrebna Darcyjeva enačba, ki podaja hitrost širjenja fluida:

$$\boldsymbol{q} = -\frac{k}{\mu} \nabla p, \tag{3}$$

kjer predstavlja k permeabilnost fluida. Bolj kot samo zdravilo, je v obravnavanem primeru pomembna razporeditev koncentracije učinkovine v fluidu po tkivu; za oblikovanje tega pojava je smiselno uporabiti konvektivno difuzijsko enačbo:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla C - \boldsymbol{q}\, C) + S, \tag{4}$$

kjer sta D in S koeficient difuzivnosti in ponor kemikalije. Difuzivnost se lahko izračuna s pomočjo prirejene Stokes-Einstein-Sutherlandove enačbe:

$$D = \frac{\varphi\, \delta}{\tau} \frac{k_\mathrm{B}\, T}{6\, \pi\, R} \frac{1}{\mu}, \tag{5}$$

kjer so φ, δ in τ poroznost, konstriktivnost in tortuoznost (parametri medija), k_B in T sta Boltzmannova konstanta in temperatura, medtem ko je R polmer molekule učinkovine. Polmer se, s pomočjo Avogadrove konstante N_A, lahko izračuna iz molske mase M in gostote ρ:

$$R = \sqrt[3]{\frac{3}{4} \frac{1}{\pi} \frac{M}{N_\mathrm{A}\, \rho}}. \tag{6}$$

Delo predpostavlja sferično simetrično širjenje fluida po anizotropnem poroznem mediju, kar poenostavi reševanje iz 3 na 1 dimenzijo. Izpeljave ohranjajo splošno obliko, potem pa so v poglavju 3 vstavljeni izbrani parametri newtonskega in tiksotropnega zdravila in prikazani rezultati.

Razliko dveh fluidov pravzaprav zastopa razlika njunih viskoznosti - vpliv notranjih napetosti je zanemarjen. Upošteva se, da je med injekcijo brizgalka vir striga in da je celotno zdravilo

podvrženo strigu za cel čas vbrizga. Obravnava problema se začne v trenutku, ko zadnji delec zapusti iglo brizgalke - takrat fluid že zavzema določen volumen znotraj tkiva, ki je odvisen od količine zdravila V_z in od poroznosti tkiva φ; ta je podan v enačbi (7):

$$V_0 = \frac{V_\mathrm{z}}{\varphi}. \tag{7}$$

S pomočjo formule za prostornino krogle se lahko izvede prehod na 1 dimenzijo oziroma izrazi polmer X_0, ki ga v poroznem sredstvu doseže zdravilo med samo injekcijo:

$$X_0 = \sqrt[3]{\frac{3}{4}\frac{1}{\pi}\frac{V_\mathrm{z}}{\varphi}}. \tag{8}$$

Zatem je predpostavljeno, da ni več prisotnih strižnih obremenitev. Enačba strukturnega parametra se zato poenostavi v:

$$\frac{\mathrm{d}\lambda}{\mathrm{d}t} = h_+ \,(1-\lambda). \tag{9}$$

Opredelitev λ se tako prevede na reševanje enostavne navadne diferencialne enačbe prvega reda. Smiselno je določiti, da je pri času $t = 0$ (ko zadnji delec zdravila zapusti iglo brizgalke) zaradi strižne obremenitve viskoznost tiksotropnega fluida enaka (konstantni) viskoznosti newtonskega fluida (μ_n). Izbira takega začetnega pogoja privede do enačbe strukturnega parametra tiksotropnega fluida v odvisnosti od časa:

$$\lambda(t) = 1 - \left(1 - \sqrt[n]{\frac{\mu_\mathrm{n}}{\mu_0}}\right) e^{-h_+ t}. \tag{10}$$

Končno se lahko definira še časovno odvisnost viskoznosti tiksotropnega fluida:

$$\mu(t) = \mu_0 \left(1 - \left(1 - \sqrt[n]{\frac{\mu_\mathrm{n}}{\mu_0}}\right) e^{-h_+ t}\right)^n. \tag{11}$$

Darcyjeva enačba se za 1 dimenzijski primer poenostavi v:

$$q = -\frac{k}{\mu}\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x}. \tag{12}$$

Predpostavljeno je, da je tlačni gradient funkcija konstantne začetne vrednosti p_0 in časovno odvisnega premera $X(t)$, ki ga je fluid dosegel. Začetni tlak je podan v enačbi (13), kjer sta F sila injektiranja (sila s katero zdravnik pritisne na brizgalko) in A notranji presek igle brizgalke:

$$p_0 = \frac{F}{A}. \tag{13}$$

Presek A je seveda odvisen od izbrane brizgalke; te imajo razne standarde klasificiranja. Tu bo uporabljen AWG standard (ang. *American wire gauge*) [4], kateri je nastal z namenom vrednotenja debelin žic in torej ne podaja notranjega premera. Ob predpostavki, da je debelina

stene približno enaka 20 % premera (kar velja za brizgalke od srednje do majhne velikosti), se lahko zapiše:

$$p_0 = \frac{F}{\left(92^{\frac{36-G}{39}} \cdot 0,3 \cdot 0,127 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m}\right)^2 \pi}, \tag{14}$$

kjer je naravno število G karakteristična vrednost igle, ki gre od 34 (najmanjša) do 10 (največja). Ker se med injekcijo poroznemu mediju stalno dovaja maso (fluid), za konstantno pritisno silo velja tlak p_0 vse do začetnega premera X_0. Nato je predpostavljen linearen padec tlaka od p_0 pri X_0 do 0 pri $X(t)$, pri čemer velja $X(t=0) = X_0$, kar pomeni, da velja:

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x} = \frac{\Delta p}{\Delta x} = \frac{p_2 - p_1}{x_2 - x_1} = \frac{0 - p_0}{X(t) - X_0}. \tag{15}$$

Če se ugotovitve iz enačbe (15) vstavi v enačbo (12), se ob upoštevanju časovne odvisnosti spremenljivk lahko zapiše:

$$q(t) = \frac{k}{\mu(t)} \frac{p_0}{X(t) - X_0}. \tag{16}$$

Darcyjev tok je pravzaprav hitrost fronte fluida, torej velja:

$$q(t) = \frac{\mathrm{d}X(t)}{\mathrm{d}t}. \tag{17}$$

Sedaj se lahko enačbi (16) in (17) združi in reši diferencialno enačbo, ki bo podala pozicijo in naknadno hitrost fronte v odvisnosti od časa:

$$X(t) = X_0 + \sqrt{2\,k\,p_0\,\psi(t)}, \tag{18}$$

$$q(t) = \frac{1}{\mu(t)} \sqrt{\frac{k\,p_0}{2\,\psi(t)}}. \tag{19}$$

Z namenom elegantnega reševanja je bil vpeljan koeficient $\psi(t)$:

$$\psi(t) = \int \frac{1}{\mu(t)}\,\mathrm{d}t. \tag{20}$$

Sedaj, ko je poznana časovna odvisnost hitrosti, se lahko, ob upoštevanju, da se koncentracija ne širi po prostoru tako kot se po premici, lahko za konvektivno-difuzijsko enačbo izvede prehod iz 3 na 1 dimenzijo:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left(D\,\frac{2}{x} - q\right) \frac{\partial C}{\partial x} + D\,\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + S_0\,C, \tag{21}$$

kjer je ponor S definiran v odvisnosti od koncentracije C.

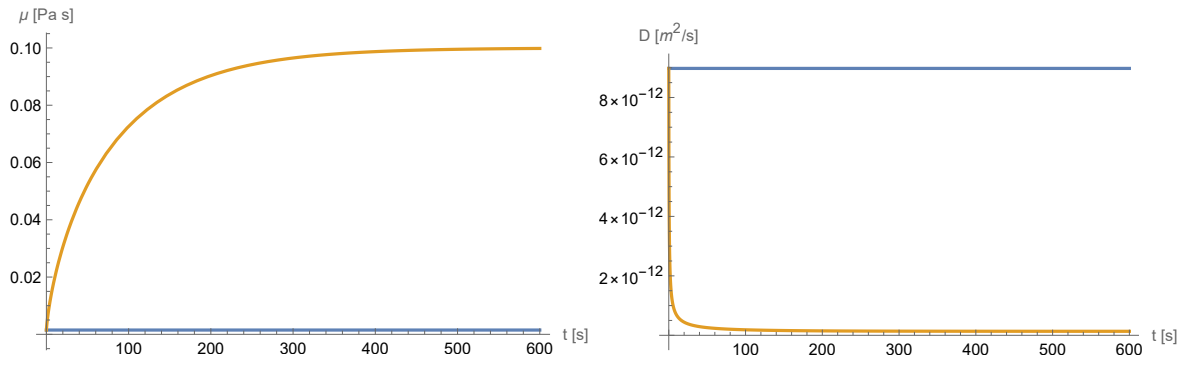
Po 10 minutah se večji del nelinearnih pojavov že ustali, zato je ta časovna vrednost postavljena kot zgornja meja obravnave. Obe zdravili vsebujeta metotreksat (učinkovina), eno samo zdravilo pa vsebuje hidroksipropil metilcelulozo (HPMC) z namenom induciranja tiksotropije. Podatki so podani v preglednici 1:

Tabela 1: Izbrane vrednosti parametrov [5, 6].

parameter	vrednost	enota
t	600	s
μ_n	$1,5 \cdot 10^{-3}$	Pa s
μ_0	$0,1$	Pa s
n	$0,7$	/
h_+	$0,01$	1/s
k	$1 \cdot 10^{-15}$	m^2
F	$0,1$	N
G	20	/
V_z	$1 \cdot 10^{-5}$	m^3
φ	$0,15$	/
δ	$0,4$	/
τ	$2,0$	/
T	$310,15$	K
ρ	1390	$\mathrm{kg/m}^3$
M	$0,45444$	kg/mol
k_B	$1,380649 \cdot 10^{-23}$	J/K
N_A	$6,02214076 \cdot 10^{23}$	1/mol
S_0	$-1 \cdot 10^{-5}$	1/s
C_0	$25,0$	$\mathrm{kg/m}^3$

3 Rezultati

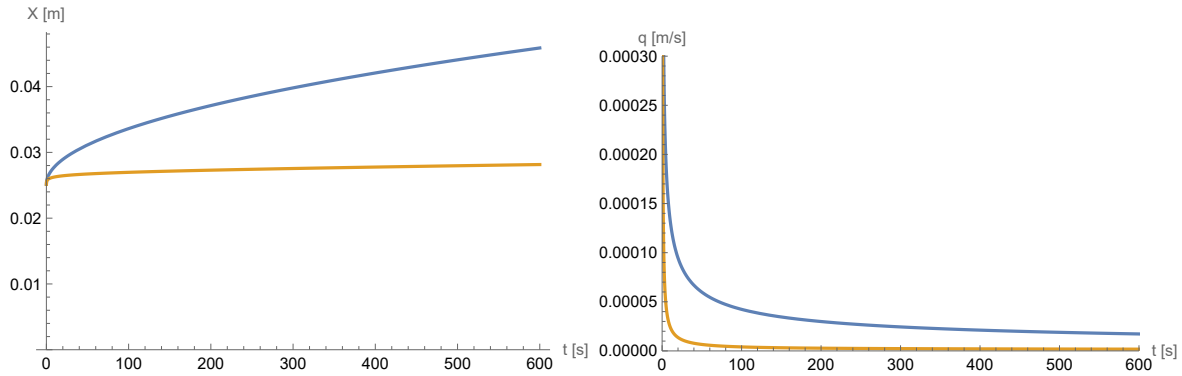
Rezultati za newtonski fluid so podani v modri barvi, za tiksotropen fluid pa v oranžni. Časovna poteka viskoznosti in difuzivnosti sta podana v sliki 1:



Slika 1: Časovni potek (a) viskoznosti in (b) difuzivnosti.

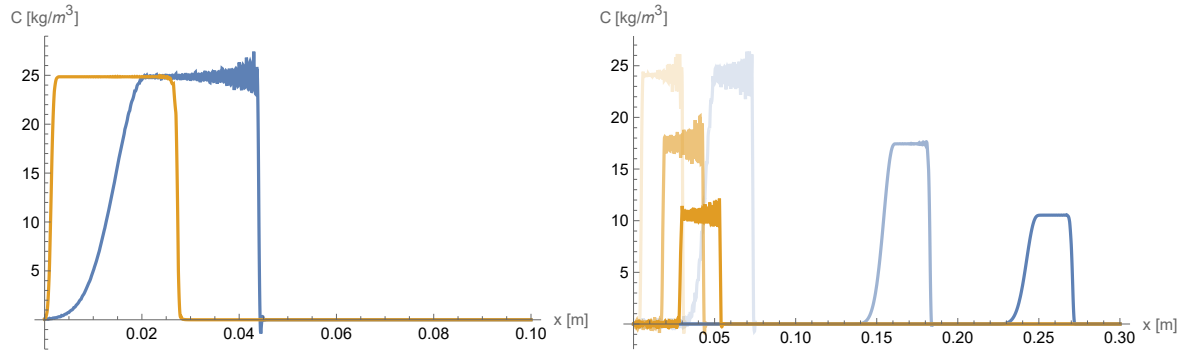
Opazi se lahko, da so v obeh primerih vrednosti konstantne pri newtonskem zdravilu in nelinearno časovno odvisne pri tiksotropnem zdravilu. Slika 2 prikazuje časovni potek položaja in

hitrosti fronte:



Slika 2: Časovni potek (a) položaja in (b) hitrosti fronte zdravila.

Z zgornje slike je jasno razvidno, da je širjenje zdravila v tiksotropni raztopini znatno počasnejše. Nazadnje, slika 3 prikazuje razporeditev koncentracije zdravil po izbranem času 10 minut in, z namenom boljšega razumevanja dogajanja, dodatno pri časih 1, 10 in 24 ur:



Slika 3: Razporeditev koncentracije zdravil po (a) izbranem času 10 minut in (b) 1 (najbolj bleda barva), 10 in 24 (najbolj močna barva) ur.

Iz rezultatov simulacije konvektivno-difuzijskega širjenja učinkovine prikazane na zgornji sliki, je jasno razvidno, da je v obravnavanem primeru vpliv konvekcije veliko večji kot vpliv difuzije; zaradi tega je numerično reševanje nestabilno in pride do opaznih fizikalno nesmiselnih oscilacij. Kljub temu pa sta narava in pomen rezultatov ohranjena.

4 Zaključki

Po pričakovanju se pri enakem času tiksotropno zdravilo res zadrži v manjšem volumnu tkiva. Po enem dnevu ista količina učinkovine deluje znotraj približno 5-krat manjšega polmera oziroma 125-krat manjše prostornine. Potencialna aplikacija je torej zdravljenje ne-metastaziranih rakavih obolenj zmerne razsežnosti, pri katerih lahko tovrstna kemoterapija uniči škodljive celice, ne da bi ista usoda v pretirani meri doletela tudi zdravo tkivo. Obravnavan primer je bil

seveda podvržen mnogim poenostavitvam, kljub temu pa izgleda uporaba kompleksnih fluidov z namenom ciljne dostave učinkovin obetavna.

Nadaljnje raziskave bi lahko bile usmerjene v manj poenostavljen primer in predvsem v praktično testiranje teoretično pokazanih rezultatov.

5 Literatura

[1] Nygren, P. (2001). What is cancer chemotherapy?. Acta Oncologica, 40(2-3), 166-174.

[2] Mewis, J., & Wagner, N. J. (2009). Thixotropy. Advances in colloid and interface science, 147, 214-227.

[3] Larson, R. G. (2015). Constitutive equations for thixotropic fluids. Journal of Rheology, 59(3), 595-611.

[4] ASTM International. (2014). ASTM B258-14: Standard specification for standard nominal diameters and cross-sectional areas of AWG sizes of solid round wires used as electrical conductors. West Conshohocken, PA: ASTM International.

[5] Fu, J., Thomas, H. R., & Li, C. (2021). Tortuosity of porous media: Image analysis and physical simulation. Earth-Science Reviews, 212, 103439.

[6] National Center for Biotechnology Information (2024). PubChem Compound Summary for CID 126941, Methotrexate. Retrieved August 21, 2024 from https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Methotrexate.

3-OSNI PARALELNI MANIPULATOR

David Lackovič

Povzetek

Raziskava obravnava kinematiko in delovanje »RRS« (revolute-revolute-spherical) paralelnega manipulatorja (PM) s tremi prostostnimi stopnjami. Sestavljen je iz nepomične spodnje in pomične zgornje plošče, povezani sta s tremi rokami. Vsaka roka ima dva dela z rotacijskimi in sferičnimi zglobi, pri čemer so aktivni le spodnji rotacijski zglobi, poganjajo pa jih elektromotorji. Paralelni sistemi so stabilnejši in hitrejši zaradi manjših kumulativnih napak in manj gibljive mase, vendar imajo omejen delovni prostor in kompleksno kinematiko. Cilj raziskave je razviti kinematični model v Pythonu ter izdelati fizični prototip. Kinematični model rešuje problem inverzne kinematike in izračuna kote v rotacijskih zglobih za določeno lego zgornje plošče. Prototip je bil izdelan s tehnologijo 3D tiska, za pogon so bili uporabljeni NEMA 17 koračni motorji z reduktorji, kar je izboljšalo natančnost zasukov in razpoložljiv moment. Krmilni sistem temelji na matični plošči 3D tiskalnika, ki omogoča enostavno pošiljanje G-kode preko serijske komunikacije. Testiranje je pokazalo pričakovano delovanje, zračnost se je pojavila le pri izhodni gredi reduktorja, kar bi lahko preprosto odpravili. Testiranje različnih konfiguracij prototipa je pokazalo, da manjši razmak med motorji izboljša stabilnost sistema. Iskanje ustreznih dimenzij za optimalno delovanje manipulatorja in analiza natančnosti ter dinamike sistema so predmet nadaljnje raziskave.

1 Uvod

Obravnavan paralelni manipulator (PM) ima tri prostostne stopnje. Sestavljen je iz nepomične spodnje in pomične zgornje plošče, ki sta medsebojno povezani s tremi rokami, razmaknjenimi za 120°. Vsaka roka je iz dveh delov, med katerima je rotacijski zglob. Roke so na spodnjo ploščo pritrjene z rotacijskim zglobom, na zgornjo ploščo pa s sferičnim zglobom. Od tod izhaja kratica »RRS«, saj si zglobi od spodaj navzgor sledijo »revolute-revolute-spherical«. Edini aktivni zglob na posamezni roki je rotacijski na spodnji plošči, običajno ga poganjamo z elektromotorji; ostala dva zgloba sta pasivna.

Paralelni sistemi so manj dovzetni za deformacije med obremenitvami zaradi sestave iz več vzporednih verig. Imajo manj kumulativne napake, ki je lahko prisotna pri serijskih verigah med posameznimi členi, zaradi manj gibljive mase pa so običajno tudi hitrejši in omogočajo višje pospeške. Slabosti paralelnih sistemov so omejen delovni prostor, bolj kompleksna kinematika ter zahtevna kalibracija.

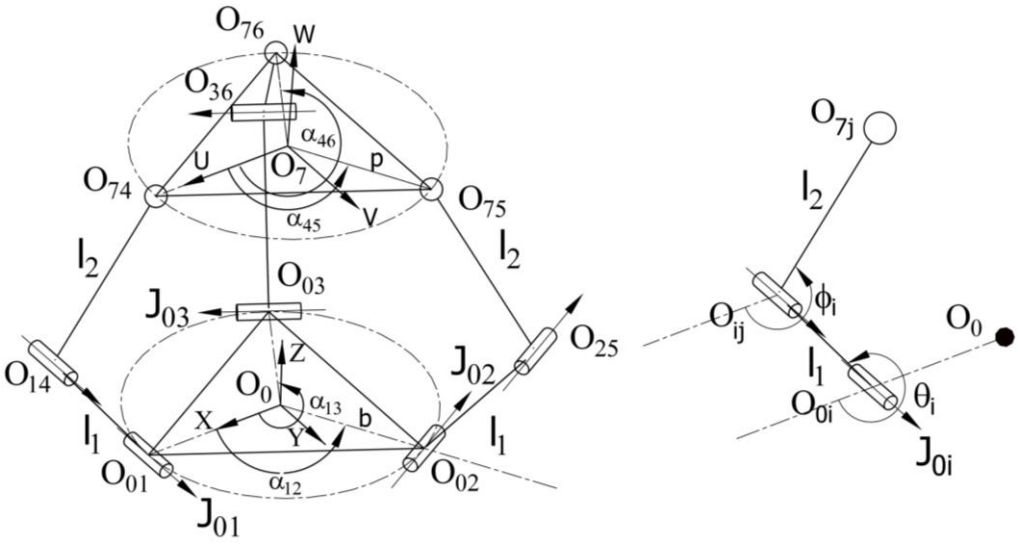
Inverzna kinematika tovrstnih manipulatorjev je bila že stvar obravnave v raziskovalnih člankih, predstavljeni so tudi numerični rezultati kinematičnih modelov [1][2]. Cilj te raziskave

je formulacija kinematičnega modela v programskem jeziku Python in izdelava prototipa PM, s katerim bi lahko preverili delovanje modela zunaj simulacijskega okolja.

2 Metode dela in potek raziskave

2.1 Kinematični model

Pri obravnavi kinematičnega modela je bil v ospredju problem inverzne kinematike, saj direktna kinematika v okviru raziskave ni bila potrebna. Cilj inverzne kinematike je za podano lego in orientacijo premične zgornje plošče določiti ustrezne kote $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ v aktivnih rotacijskih zglobih vsake roke (slika 1). Vhodni parametri, ki enolično definirajo lego in orientacijo premične plošče so pomik v smeri Z-osi (O_{7z}), zasuk okoli X-osi (ψ_x), ter zasuk okoli Y-osi (ψ_y). Kinematični model temelji na teoretični izpeljavi iz Tetik et al. (2016), kjer je kinematika izpeljana s pomočjo zančnih enačb (loop closure equations). Te enačbe povezujejo koordinate sferičnih zglobov (O_{74}, O_{75}, O_{76}) z vhodnimi parametri preko matrike rotacije.



Slika 1: Shema 3-osnega RRS paralelnega manipulatorja [1].

Kinematični model je zapisan v programskem jeziku Python z uporabo knjižnjice Numpy. Zapisan je v obliki funkcije, ki sprejme vhodne parametre $(b, p, l_1, l_2, O_{7z}, \psi_x, \psi_y)$. Model najprej izračuna rotacijo plošče okoli Z-osi po enačbi (1); trigonometrični funkciji sin() in cos() sta zaradi preglednosti okrajšani v obliko $s()$ in $c()$.

$$\psi_z = \tan^{-1}\left(-\frac{s(\psi_x)s(\psi_y)}{\mathrm{c}(\psi_x) + \mathrm{c}(\psi_y)}\right) \tag{1}$$

Nato po t.i. omejitvenih enačbah (ang. constraint equations), izpeljanih v Tsai (1999), določi X in Y komponenti vektorja $\overrightarrow{O_0O_7}$; Z komponenta (O_{7z}) je podana kod vhodni parameter. Izračuna tudi matriko rotacije $[R]$.

$$[R] = \begin{bmatrix} \mathrm{c}(\psi_y)\mathrm{c}(\psi_z) & -\mathrm{c}(\psi_y)\mathrm{s}(\psi_z) & \mathrm{s}(\psi_y) \\ s(\psi_x)s(\psi_y)\mathrm{c}(\psi_z) + c(\psi_x)s(\psi_z) & c(\psi_x)c(\psi_z) - s(\psi_x)s(\psi_y)s(\psi_z) & -\mathrm{s}(\psi_x)\mathrm{c}(\psi_y) \\ s(\psi_x)s(\psi_z) - c(\psi_x)s(\psi_y)c(\psi_z) & s(\psi_x)c(\psi_z) + c(\psi_x)s(\psi_y)s(\psi_z) & \mathrm{c}(\psi_y)\mathrm{c}(\psi_y) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\overrightarrow{O_0O_{7j}} = \overrightarrow{O_0O_7} + [R] \cdot \left[R_Z(\alpha_{4j})\right] \cdot \begin{pmatrix} p \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; j = 4{,}5{,}6 \quad (3)$$

Sedaj po enačbi (3) določi koordinate sferičnih zglobov oz. vektorje, ki kažejo do njih; $\left[R_Z(\alpha_{4j})\right]$ je osnovna matrika vrtenja okoli Z-osi za kot α_{4j}. Zanimajo nas le X (O_{7jx}) in Z (O_{7jz}) komponente, ki jih model vstavi v enačbo 4 za vsak posamezen zglob.

$$\theta_i = 2\,atan2\left(-B_i \pm \sqrt{{A_i}^2 + {B_i}^2 - {C_i}^2}, C_i - A_i\right), i = 1{,}2{,}3$$

$$A_i = 2l_1 cos(\alpha_{1i})\left(-O_{7jx} + bcos(\alpha_{1i})\right)$$

$$B_i = 2l_1 O_{7jz} cos^2(\alpha_{1i})$$

$$C_i = {O_{7jx}}^2 - 2bO_{7jx}cos(\alpha_{1i}) + cos^2(\alpha_{1i})\left(b^2 + l_1^2 - l_2^2 + {O_{7jz}}^2\right) \quad (4)$$

Izračun zaradi simbola $\pm$ vrne dva seta rešitev za kote $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$, vsaka kombinacija kotov pa definira ustrezno lego in orientacijo premične plošče. Možnih konfiguracij manipulatorja za iste vhodne parametre je torej 8. Funkcija kinematičnega modela vrne terko, v kateri je zapisanih vseh šest izračunanih kotov $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$. V funkcijo so vključene tudi spremenljivke (b, p, l_1, l_2), zato je model prilagodljiv glede na dimenzije PM. To omogoča hitre spremembe pri testiranju različnih konfiguracij manipulatorja za morebitno optimizacijo delovanja.

2.2 Prototip manipulatorja

Izdelava fizičnega prototipa PM je bila prilagojena glede na izdelavo s tehnologijo 3D tiska predvsem zaradi cene ter hitrosti izdelave. Mehanske lastnosti materiala zaenkrat niso bile pomembne, saj ni bilo načrtovano, da bo prototip premikal težje objekte. Vsekakor pa je 3D tisk predstavljal izziv z vidika toleranc, saj bi lahko vsaka zračnost med sestavnimi deli pomenila nestabilnost in napako pri pomikih rok. Pri povezovanju natisnjenih delov so bili zato uporabljeni ležaji. Za sredinski rotacijski zglob so to kroglični ležaji z oznako 608, za zgornji sferični zglob pa sferični drsni ležaji z M6 navojem (slika 2).



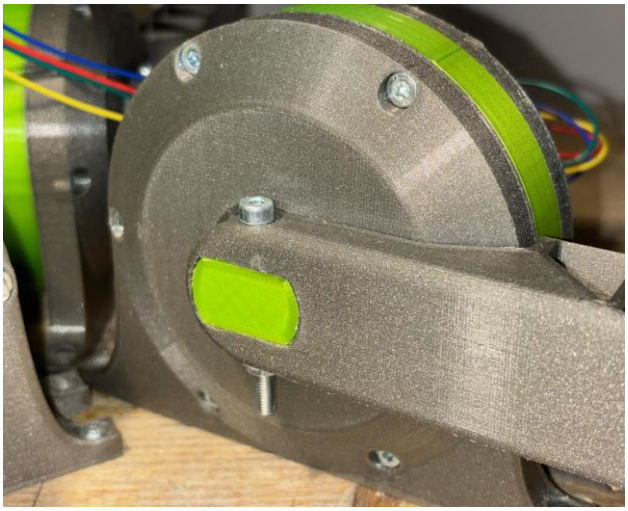
Slika 2: Kroglični ležaji 608, 6704 in 6705 ter sferični drsni ležaj z M6 navojem.



Slika 3: Notranje komponente reduktorja.

Pogon rok je bil izveden z NEMA 17 koračnimi motorji skupaj s planetarnim reduktorjem s prestavnim razmerjem 4:1. S tem se je povečal tako razpoložljiv moment kot tudi natančnost zasukov rok. Zobniki in ohišja menjalnikov so v celoti 3D natisnjeni z materialom PLA. Pri montaži gredi v ohišje menjalnika so bili uporabljeni kroglični ležaji, na vhodni strani z oznako 6704, na izhodni pa 6705 (slika 2). Pri kontaktu med notranjimi zobniki in izhodno gredjo ni bilo mogoče uporabiti ležajev zaradi premajhnih zobnikov. Namesto tega je bila izdelava načrtovana tako, da je v zobnike vtisnjena medeninasta puša z 8 mm luknjo, v izhodno gred pa jeklena palica premera 8 mm (slika 3). Luknja v puši je bila brušena tako, da je ujem med pušo in jekleno palico omogočal prosto vrtenje brez zračnosti. Kontakt medenina-jeklo ni izkazoval velikega trenja, zato dodatno mazanje ni bilo potrebno. Z mastjo so namazani vsi plastični zobniki za zmanjševanje trenja in obrabe.

Dolžine posameznih delov rok zaenkrat niso ključnega pomena za testiranje prototipa, zato so določene na 200 mm. Spodnji del roke je na izhodno gred menjalnika pritrjen z oblikovnim spojem ter M4 vijakom (slika 4), sferični ležaji pa na zgornji del roke z M6 vijaki ter distančniki (slika 5).



Slika 5: Oblikovni spoj na izhodni strani reduktorja.



Slika 4: M6 vijak z distančniki.

Spodnja plošča je iz lesa in služi kot podlaga za manipulator. Ohišja so nanjo pritrjena z lesnimi vijaki, kar omogoča hitro demontažo ter demontažo pri morebitnem spreminjanju dimenzij prototipa pri nadaljnjem testiranju.

Zgornjo pomično ploščo predstavlja enakokraki trikotnik, sestavljen iz M6 navojnih palic. V vsakem oglišču trikotnika sta navojni palici povezani s 3D natisnjenim nastavkom, ki se hkrati

privijači tudi v sferične ležaje. Narejen je bil še 3D model (slika 6), s katerim je bilo delovanje najprej preverjeno v modelirniku. Vsi potrebni deli so bili 3D natisnjeni z materialom PLA.



Slika 6: 3D model celotnega manipulatorja.

2.3 Krmilni sistem

Priprava krmilnega sistema je zajemala krmiljenje koračnih motorjev ter pošiljanje navodil za zasuke iz kinematičnega modela na motorje. Krmiljenje motorjev je bilo izvedeno z uporabo matične plošče 3D tiskalnika Ender 3 Pro, na kateri je že poskrbljeno za sočasno krmiljenje več motorjev, implementiran pa je tudi t.i. »microstepping«. Plošča podpira tudi USB serijsko komunikacijo, ki omogoča pošiljanje G-kode.

Za lažji nadzor zasuka motorjev je v programski opremi matične plošče z ukazom 'M92' nastavljenih 100 korakov zasuka na milimeter pomika. Poznane so bile tudi specifikacije motorja, ki z vsakim korakom opravi 1,8° zasuka, zato je bilo po enačbi 1 mogoče izračunati korelacijo med navideznimi pomiki v milimetrih in dejanskim kotom zasuka izhodne gredi na reduktorju. V enačbi je kot zasuka pomnožen s 4 zaradi prestavnega razmerja reduktorja, s 16 pa zaradi prej omenjenega »microstepping«-a, saj je vsak korak razdeljen še na 16 manjših korakov. Za zasuk izhodne strani reduktorja za npr. 10° mora plošča torej izvesti navidezni pomik ustrezne osi za 3,556 mm.

$$\Delta x[mm] = \Delta\theta[°] \cdot 4 \div 1{,}8 \left[\frac{°}{korak}\right] \cdot 16 \div 100 \left[\frac{korak}{mm}\right] \quad (2)$$

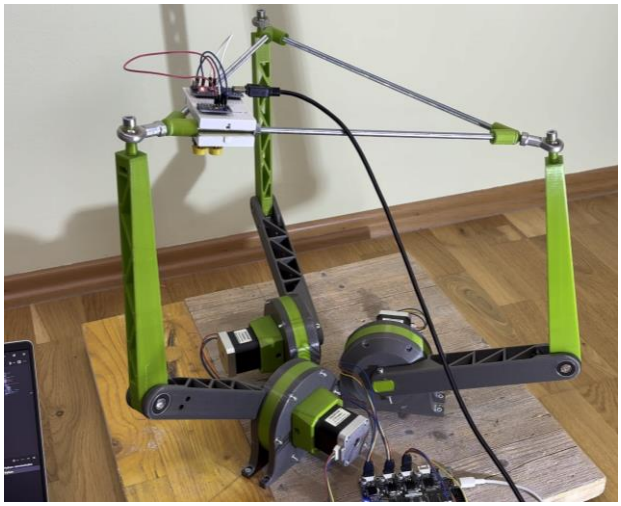
Za pošiljanje G-kode je uporabljen Python program, ki s pomočjo knjižnice Pyserial vzpostavi serijsko komunikacijo na izbranih komunikacijskih vratih računalnika. Ko je komunikacija vzpostavljena, lahko uporabnik v terminal napiše željeno lego in orientacijo plošče, ki pa jo program poda funkciji s kinematičnim modelom. Funkcija nato izračuna potrebne naklone rok za doseganje vpisane lege ter jih vrne v obliki terke. Od tod nato program izbere prve tri kote (prvo izmed osmih kombinacij kotov) in po zgoraj opisani enačbi določi navidezne pomike

posamičnih osi. Iz njih generira ustrezno G-kodo za linearno interpolacijo ter jo pošlje matični plošči. Opisan program je zgolj za namene testiranja, zato ukaze za lego in orientacijo vpisuje uporabnik sam. V kasnejših fazah raziskovanja lahko ukaze prejema tudi od zunanjih programov.

3 Rezultati

Prototip PM je bil testiran v konfiguraciji (glede na sliko 1) $l_1 = 200\,\text{mm}, l_2 = 234{,}82\,\text{mm}$, $p = 223{,}72\,\text{mm}$, za razmak motorjev na spodnji plošči b pa sta bili izbrani dve vrednosti, $b_1 = 200\,\text{mm}$ in $b_2 = 71{,}04\,\text{mm}$ (slika 7).

V obeh konfiguracijah je PM deloval kot pričakovano, vsi rotacijski in sferični zglobi so delovali pravilno ter so bili brez zračnosti. Nekaj zračnosti se je nepričakovano pojavilo v oblikovnem spoju na izhodni gredi reduktorja. Izkazalo se je, da je bil ujem preveč ohlapen in je s tem omogočal gibanje spodnjega dela roke okoli osi vijaka. Zračnost se je zmanjšala po dodatni zategnitvi vijaka, boljša rešitev za nadaljnje testiranje pa bi bila izvedba z dvema vijakoma namesto z enim. Vseeno pa je omenjena zračnost vplivala zgolj na povečane deformacije med zunanjimi statičnimi obremenitvami in ni imela večjega vpliva na obnašanje med neobremenjenim delovanjem manipulatorja.



Slika 7: Prototip paralelnega manipulatorja med delovanjem pri naklonu plošče 10° okoli X-osi.

Pri konfiguraciji z manjšo vrednostjo b je sistem izkazoval precej večjo stabilnost in manj nihanja pri premikih. Na to vpliva predvsem dolžina rok med delovanjem – pri konfiguraciji z $b_1 = 200\,\text{mm}$ so bile roke zaradi večjega spodnjega radija precej bolj iztegnjene kot pri $b_2 = 71{,}04\,\text{mm}$. To je pomaknilo lastno frekvenco manipulatorja v nizkofrekvenčno območje nenadnih premikov in s tem povečalo odziv sistema. Natančno določanje vrednosti b za optimalno delovanje sistema z najmanj nihanja bi zahtevalo dodatno analizo dinamike, kar pa presega obseg tega članka.

Na delovno območje manipulatorja močno vplivajo sferični ležaji, katerih nagib je zaradi kontakta z vijakom omejen na 20° v vsako stran. S tem dopuščajo največji naklon posamezne roke približno 60°, kar pa omeji največji naklon zgornje plošče na približno 30°.

4 Zaključki

V sklopu raziskave je bil uspešno postavljen kinematični model in izdelan prototip paralelnega manipulatorja s tremi prostostnimi stopnjami. Model je napisan v Pythonu in rešuje problem inverzne kinematike. Prototip manipulatorja je izdelan s tehnologijo 3D tiska. Za pogon so

uporabljeni koračni motorji, krmiljenje pa je izvedeno z matično ploščo 3D tiskalnika. Pri testiranju različnih konfiguracij se je izkazalo, da manjši razmak med motorji izboljša stabilnost sistema. Nadaljnje delo na tem področju vključuje analizo odstopanja dejanskih naklonov plošče od željenih, analizo dinamike manipulatorja ter določitev optimalne geometrije manipulatorja za najbolj stabilno delovanje.

5 Literatura

[1] H. Tetik, R. Kalla, G. Kiper, and S. Bandyopadhyay, "Position Kinematics of a 3-RRS Parallel Manipulator," in Courses and lectures, 2016

[2] T. Itul and D. Pisla, "On the Kinematics and Dynamics of 3-DOF Parallel Robots with Triangle Platform," 2009

[3] L.-W. Tsai, Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators. 1999

[4] Y. D. Patel and P. M. George, "Parallel Manipulators Applications—A Survey," Modern Mechanical Engineering, vol. 02, no. 03, pp. 57–64, Jan. 2012

[5] C. Yang, W. Ye, and Q. Li, "Review of the performance optimization of parallel manipulators," Mechanism and Machine Theory, vol. 170, p. 104725, Apr. 2022

Izboljšanje delovanja naprave za pridobivanja vode iz atmosfere s kompozitnimi higroskopskimi sredstvi na osnovi optične koncentracije sončne energije

Matej Lajevec[1], Sašo Medved[1], Ciril Arkar[1], Primož Poredoš[1]*

[1]Laboratorij za okoljske tehnologije v zgradbah, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

**primoz.poredos@fs.uni-lj.si*

1 Povzetek

Pomanjkanje pitne vode je eden največjih okoljevarstvenih izzivov, še posebej v revnih in sušnih regijah, kjer tekoči viri niso dostopni ali pa niso primerni za pitje. Sistemi za pridobivanje vode iz atmosfere, ang. atmospheric water harvesting (AWH) ponujajo obetavno rešitev za pridobivanje pitne vode iz zraka. Med njimi izstopajo sistemi SAWH (ang. sorbent-based atmospheric water harvesting), ki uporablja higroskopske lastnosti materialov za učinkovito proizvodnjo vode v različnih spektrih vlažnosti. Ta prispevek se osredotoča na razvoj vertikalne naprave SAWH, pri čemer vključuje zasnovo sončnega koncentratorja, ki omogoča enakomerno osvetlitev higroskopskega materiala iz vseh strani, in pripravo materiala samega. Cilj te raziskave je izboljšanje procesov desorpcije vlage v sistemu za pridobivanje vode iz zraka, s poudarkom na povečanju količine pridobljene vode. V prispevku predstavljamo analize eksperimentov, ki so pokazale napredek pri delovanju našega sistema SAWH. To delo tudi opisuje postopek zasnove sončnega koncentratorja ter na podlagi rezultatov prikazali njegovo vlogo v celotnem sistemu. Na podlagi meritev, ki so pokazale izboljšanje učinkovitosti naprave, smo v zaključku analizirali, kako so naše inovacije prispevale k povečanju učinkovitosti sistema za pridobivanje vode iz zraka. Raziskava prinaša pomembne vpoglede v optimizacijo tovrstnih AWH sistemov, kar ima lahko pomembne učinke za reševanje problema pomanjkanja čiste pitne vode v sušnih območjih povsod po svetu.

2 Uvod:

V današnjem svetu se soočamo z globalnimi grožnjami, ki povzročajo energetsko neravnovesje, še posebej v revnih in sušnih regijah. Eden največjih naraščajočih problemov je pomanjkanje pitne vode, ki prizadene 4 milijarde ljudi [1]. Tradicionalni načini pridobivanja vode, kot so vodnjaki in razsoljevanje [2], so pogosto neučinkoviti v sušnih območjih. Globalno segrevanje širi puščave, zato potrebujemo inovativne metode proizvodnje vode. Ozračje vsebuje šestkratno količino vode rek na Zemlji [3], kar predstavlja obetavno priložnost za proizvodnjo vode v sušnih predelih [4,5].

Za to so potrebne napredne tehnologije AWH (Atmospheric Water Harvesting), ki so še vedno v fazi razvoja. Te vključujejo higroskopske materiale, kot so kovinsko/organska ogrodja [6], hidrogeli [7] in nanoporozni kompoziti [8] s sorbenti in soljo. Trenutne pomanjkljivosti vključujejo omejeno znanje o materialih in potrebo po energijsko in masno učinkovitih sistemih [9].

Naša raziskava se osredotoča na izboljšanje enega izmed obstoječih AWH sistemov, s ciljem povečanja iznosa vode iz higroskopskega sredstva vode ob hkratnem ohranjanju učinkovitosti in kompaktnosti. Analizirali bomo delovanje naprave in rezultate ter predlagali možnosti za nadaljnje raziskave in izboljšave.

3 Metode dela in potek raziskave

3.1 Metode dela

V tem poglavju bomo podrobneje opisali metodologijo raziskovanja. Pri raziskavi smo uporabili več različnih postopkov oz. metod za analizo in optimizacijo naprave:

-Eksperimentalne postopke.

-Dizajn, zasnova

-Meritve in analize

3.2 Znanstveni izziv

Sodobne AWH tehnologije se soočajo s težavami, ki preprečujejo njihovo širšo uporabo. Kljub napredku v dizajnih in modelih, ti še vedno ne uspejo učinkovito in minimalistično zagotoviti dovolj vode za odraslega (3,7l za moškega, 2,7l za žensko) ali otroka (1,1l) [5].

Sedanji izzivi dizajnov so trenutno osredotočeni na ločena procesa adsorpcije in desorpcije, saj morata biti izvedena ločeno podnevi in ponoči [10]. Naslednji izziv je povezan tudi s počasno desorpcijo planarnih kompozitnih sorbcijskih sredstev v primeru segrevanja z ene strani [7], kar povzroči upočasnitev procesa pridobivanja vode.

Pri naši napravi je trenutno kompozitno sorpcijsko sredstvo planarne oblike, kar pomeni, da sonce obseva le sprednjo stran trenutnega dizajna. To povzroča segrevanje materiala in prostora v notranjosti le z ene strani, zaradi česar se material ne segreje dovolj. Posledično to vpliva na počasno sproščanje vode in količino sproščene vode v določenem času, kar vodi do manjše in počasnejše kondenzacije.

3.3 Rešitev

Kot odgovor na te težave smo razvili sledeče rešitve:

- Zasnovali smo sistem AWH z ravnimi zrcali in jih nastavili tako, da ogrodje/okvir skoraj nič ne vplivata na sončno obsevanost nano kompozitnega poroznega sredstva z zadnje strani.

- Za večjo proizvodnjo vode smo pripravili optimizirano sorbcijsko sredstvo.

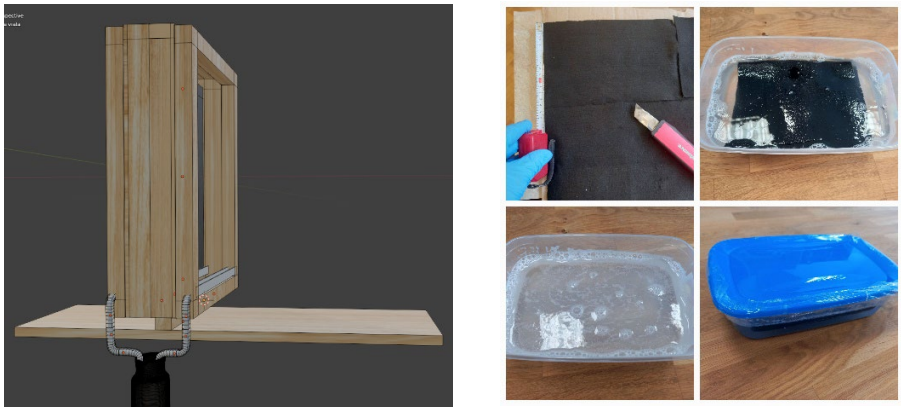
3.4 Naprava SAWH

Pred predstavitvijo naše naprave bomo na kratko opisali tipične AWH sisteme: lovljenje megle [11], SAWH [12] in RAWH [13]. Lovljenje megle uporablja hidrofobne in hidrofilne materiale, vendar ni primeren za sušna območja. SAWH uporablja nano-kompozitno sredstvo za kondenzacijo vode ob sončni svetlobi, medtem ko RAWH deluje na pasivnem sevalnem hlajenju za kondenzacijo vodne pare. Izmed vseh sistemov SAWH deluje v širokem spektru vlažnosti brez dodatnih pomožnih sistemov.

Zaradi hitrejše implementacije in manjše odvisnosti od novih materialov, smo se odločili narediti korak v smeri SAWH sistema. Ta sistem temelji na nano-kompozitnem higroskopskem poroznem sredstvu, ki ima povečano absorpcijo sončnega sevanja in omogoča učinkovito pridobivanje vode s sončnim obsevanjem.

3.4.1 Zgradba naprave

Naprava je zgrajena iz smrekovega lesa (slika 1, levo), ki ima obenem tudi funkcijo okvirja. V notranjosti na kljuki visi kompozitno sredstvo zgrajeno iz filca (ACFF) v katerem je sol LiCl. LiCl sol smo izbrali, saj doseže večji vnos g/g vode kot navadna NaCl. Na vsaki strani pa je osrednji del obdan z vrati (na tečajih), ki so sestavljena iz okvirja in prekrita s plastično folijo. Za zbiranje vode sta vgrajena tudi dva žleba, ki sta povezana z cevkami in steklenico.



Slika 1: Stranski pogled naprave (levo) in kolaž slik, ki prikazuje pripravo nanokompozitnega higroskopskega sorpcijskega sredstva (desno).

3.4.2 Delovanje naprave

Proces pridobivanja vode iz atmosfere je zgrajen iz 4 korakov:

Prvi korak je adsorbcija vodne pare iz zraka pri nizki temperaturi in višji relativni vlažnosti (tipično ponoči). V tem koraku je potrebno napravo zvečer odpreti z obeh strani. Drugi korak je desorpcija. Preden se ta začne, moramo zjutraj napravo tesno zapreti in jo postaviti na odprto mesto, kjer je izpostavljena sončni svetlobi. Sončna svetloba povzroči izhlapevanje vode iz materiala. Hkrati poteka tudi kondenzacija: vodna para v zaprtem prostoru se kondenzira na površini prozorne plastične folije z notranje strani, kar povzroči nastanek vidnih kapljic. Te kapljice zaradi gravitacije spolzijo v žleb, kjer se zberejo in tako se zaključi zadnji del procesa – zbiranje vode.

3.5 Potek raziskave

Za odpravo težav trenutne naprave in izvedbo analiz za znanstveno diskusijo smo sledili naslednjim korakom:

1. Izdelava kompozitnega higroskopskega sredstva.
2. Preizkus naprave pri osvetlitvi ene strani ACFF+LiCl higroskopskega sredstva.
3. Zasnova naprave z dvema ravnima ogledaloma za optimalno koncentracijo svetlobe na zadnji strani temnega higroskopskega sredstva.
4. Preizkus učinkovitosti naprave brez in s preprostim koncentratorjem.

3.5.1 Priprava kompozitnega higroskopskega sredstva (ACFF)

Pridobili smo črn filc (ACFF) debeline 2 mm in ga narezali na dva kosa dolžine 23 cm in širine 15 cm. S temi merami smo izkoristili osrednji prostor naprave.

Nato smo v plastični posodi s pokrovom pripravili 20% solno raztopino. V 500g vode smo pri tem zmešali 125 g soli. Pri tem je prišlo do adsorpcije vode in sočasnega segrevanja raztopine. ACFF smo potopili v raztopino in posodo pokrili s pokrovom ter jo oblepili. Po 24 urah smo ACFF obrnili. Tako smo zagotovili, da se je litijev klorid ujel v pore/reže na obeh straneh enakomerno. Na koncu smo sredstvo dali segreti v pečico za 24 ur. Potek prikaza priprave nanokompozitnega sredstva prikazuje slika 1, desno.



Slika 2: Izvajanje meritev (levo), preizkus naprave (v sredini), preizkus naprave s koncentratorjem (desno).

3.5.2 Preizkus naprave pri osvetlitvi ene strani higroskopskega sredstva

Eksperimentalno vrednotenje z opisano napravo prikazuje slika 2. V odprto napravo smo vstavili ACFF+LiCl higroskopsko sredstvo in ga čez noč navlažili zaradi procesa adsorpcije. Dopoldne smo v napravo namestili temperaturne (natančnost ±0.5 °C) in kombinirane temperaturne in higroskopske senzorje in jo zaprli. Postavili smo jo na sonce na sočni dan pri povprečni temperature 30 °C. Zaradi premikanja sonca smo napravo premikali tako, da je bila optimalno osvetljena. Ko sonca ni bilo več smo jo odprli in pridobljeno vodo stehtali na precizni tehtnici podjetja Radwag (natančnost ±0,01 g).

3.5.3 Zasnova naprave z dvema ravnima ogledaloma za optimalno koncentracijo svetlobe na temnem sredstvu

Pri konstruiranju solarnega koncentratorja smo uporabil spletni optični program: Ray Optics Simulation. Program deluje na principu 2D okolja in vsebuje vrsto različnih orodij. Lahko prikazuje različne vrste virov svetlobe, optičnih elementov (različna ogledala, stekla, blokade svetlobe...), moč svetlobe itd.

S spoznavanjem programa smo ugotovili, da lahko koncentrator oblikujemo kot parabolo, krožne loke in ravna ogledala. Za začetek smo se odločil izvesti poskuse z ravnimi ogledali, saj za naslednje leto že načrtujemo nadaljnjo nadgradnjo preprostega dizajna.

Za preizkus koncepta s preprostim dizajnom smo kupili dve ogledali in ju nato pristavili zraven naprave, s čimer smo zagotovili močno osvetljenost zadnje stranice (slika 2 desno, spodaj). Napravo smo nato ponovno pripravili za preizkus v zunanjem okolju. Ob koncu meritve smo izmerili količino pridobljene vode.

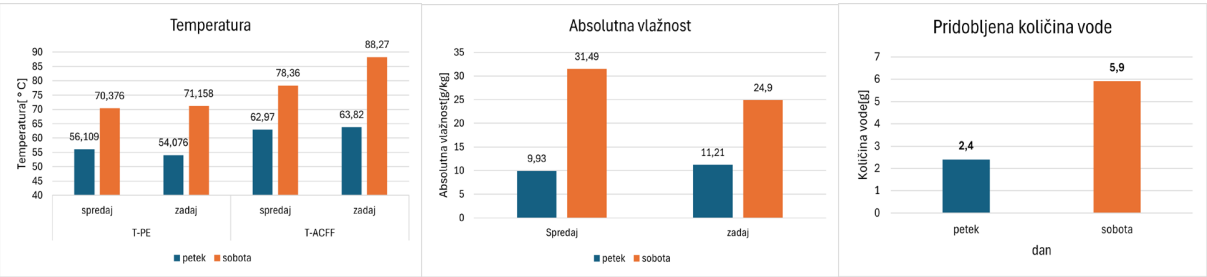
3.5.4 Preizkus učinkovitosti naprave brez in s preprostim koncentratorjem na podlagi meritev

Pred začetkom meritev za napravo brez koncentratorja in napravo s koncentratorjem smo v napravo in njeno okolico namestili različne senzorje. Na notranjo površino plastične folije na obeh straneh naprave smo postavili termopare tipa K, s čimer smo lahko spremljali temperaturo pri kateri vodna para kondenzira. Nato smo izvedli dve izvrtini v napravo, v katere smo vstavili dva senzorja za vlago in temperaturo na obeh straneh higroskopskega sredstva, saj se je vlažnost razlikovala zaradi različnih moči sončnega sevanja. V bližini naprave je bil nameščen dodaten senzor za temperaturo in vlago v senci kot referenčno točko za merjenje okoliških pogojev. S pomočjo merilnika intenzitete sončnega sevanja (piranometer) smo tudi pridobili podatke o sončnem sevanju neposredno ob aparaturi. S tem smo zajeli celoten spekter meritev za natančno analizo delovanja naprave.

3 Rezultati

Po opravljenih meritvah smo podatke zbrali in jih grafično prikazali, kar predstavljamo v tem poglavju.

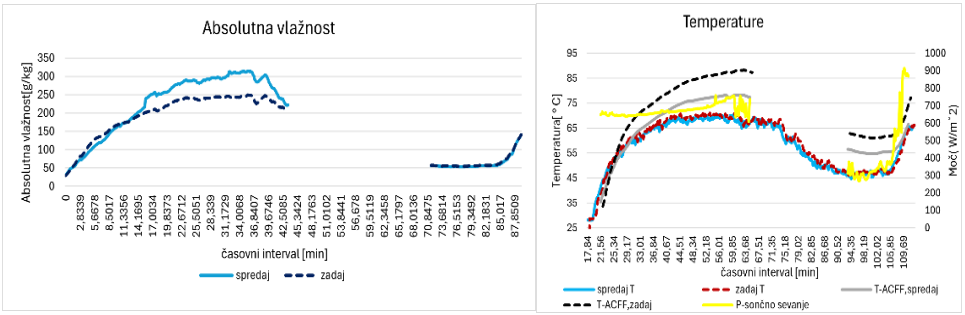
Meritve smo izvedli v dveh dneh, pri čemer smo v obeh dnevih zagotavljali približno enake pogoje (temperatura in vlažnost okolice ter intenziteta sončnega sevanja brez oblakov). V petek, 16. 8. 2024 smo izvedli meritve z osvetlitvijo sprednje strani naprave, medtem ko smo v soboto, 17. 8. 2024 izvedli meritev z osvetlitvijo sprednje in zadnje strani (s koncentratorjem) higroskopskega sredstva. Vsaka serija meritev je trajala eno uro in pol, vendar zaradi tehničnih težav nismo uspeli zabeležiti vseh podatkov brez prekinitev (vidno v grafih na sliki 5). Ključni rezultati meritev so prikazani v sliki 3.



Slika 3: Grafi največjih temperatur (levo), graf največjih absolutnih vlažnosti (sredina), graf količine pridobljene vode (desno).

Slika 3, levo, prikazuje višje temperature v soboto, ko je bil uporabljen sistem SAWH skupaj s koncentratorjem iz dveh ogledal. Koncentrator je učinkovito usmeril svetlobo na zadnjo stran higroskopskega sredstva, kar je povzročilo višje temperature na tem območju, medtem ko so bile temperature na sprednji strani nižje, ko koncentrator ni bil v uporabi.

Slika 3, sredina, prikazuje, kako višje temperature povečajo desorpcijo vlage, kar posledično povečuje absolutno vlažnost. Koncentrator je torej povečal absolutno vlažnost v celoti, spredaj in zadaj. Slika 3, desno, prikazuje, da je uporaba sončnega koncentratorja povečala količino pridobljene vode za 2,46-krat.



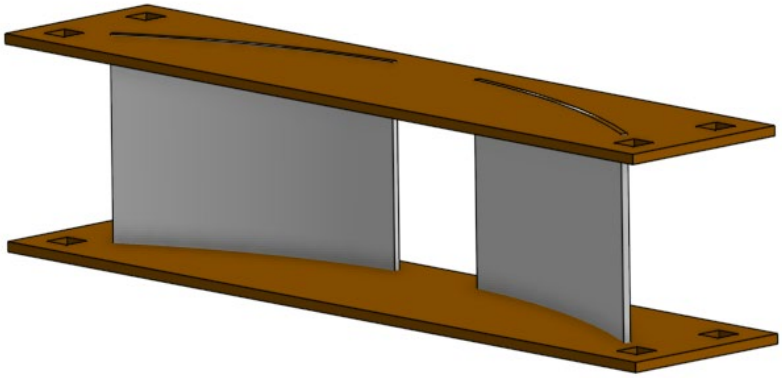
Slika 4: Graf absolutne vlažnost (levo), graf temperatur (desno)

Grafa na sliki 4 prikazujeta spremembo absolutne vlažnosti in temperature v soboto v določenem časovnem intervalu. Zaradi tehničnih težav so tukaj vidna območja brez meritev.

Graf vlažnosti (slika 4, levo) prikazuje postopno povečanje vlažnosti, kar je usklajeno z naraščanjem temperature higroskopskega sredstva in posledično bolj intenzivnemu sproščanju vlage. Naraščanje temperatur je za soboto prikazano na sliki 4, desno.

Slika 4, desno tudi prikazuje večje temperature blizu higroskopskega sredstva v primerjavi s temperaturami na polietilenski foliji, zaradi česar se je proces kondenzacije sploh vršil.

Z raziskovanjem smo identificirali ključne parametre, ki vplivajo na učinkovitost delovanja naprave. Ugotovili smo, da je temperatura higroskopskega sredstva prenizka za učinkovito sproščanje vlage v primeru direktnega sončnega obsevanja. V skladu s tem trenutno razvijamo novo zasnovo paraboličnega koncentratorja (slika 5), ki bo omogočila optimalno koncentracijo sončnih žarkov tudi na zadnji strani higroskopskega sredstva. Načrtujemo, da bomo izboljšano napravo predstavili naslednje leto na drugi konferenci.



Slika 5: 3D model paraboličnega sončnega koncentratorja v razvoju

4 Zaključek

Pri tem raziskovalnem projektu smo se osredotočili na razvoj SAWH naprave za pridobivanje vode iz atmosfere z uporabo kompozitnih higroskopskih sredstev (ACFF+LiCL). Ugotovili smo, da so težave nastajale zaradi vertikalno postavljenega, ravninskega ACFF+LiCl, kar je vplivalo na učinkovitost delovanja sistema v smislu proizvodnje sveže vode. V želji po izboljšanju delovanja smo zasnovali in preizkusili sistem z dvema ravnima ogledaloma, kar je omogočilo boljšo osvetlitev higroskopskega materiala z vseh strani.

Rezultati eksperimentov kažejo, da smo v 1,5 uri, ko pogoji niso bili popolnoma sončni, uspeli povečati količino pridobljene vode skoraj za faktor 3, kar potrjuje učinkovitost naše zasnove.

Raziskava prispeva k napredku na področju pridobivanja vode iz zraka, saj ponuja konkretne rešitve za povečanje energijske in masne učinkovitosti sistema SAWH. Naša naprava je dokazala, da je mogoče optimizirati proces desorpcije vlage z izboljšano osvetlitvijo, kar omogoča večjo proizvodnjo vode.

Razvijanje takih naprav je bistvenega pomena za reševanje globalnih izzivov pomanjkanja pitne vode, še posebej v sušnih območjih. Z nadaljnjim raziskovanjem na tem področju si prizadevamo za razvoj prodornih in prebojnih rešitev, ki bodo izboljšale delovanje, učinkovitost in prilagodljivost tovrstnih naprav za pridobivanje vode iz atmosfere kjerkoli in kadarkoli.

5 Literatura

[1] Mekonnen MM, Hoekstra AY. Four billion people facing severe water scarcity. Sci Adv 2016;2:e1500323. https://doi.org/10.1126/sciadv.1500323.

[2] Dong Y, Poredoš P, Ma Q, Wang R. High-yielding and stable desalination via photothermal membrane distillation with free-flow evaporation channel. Desalination 2022;543:116103. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116103.

[3] Ejeian M, Wang RZ. Adsorption-based atmospheric water harvesting. Joule 2021;5:1678–703. https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.04.005.

[4] Poredoš P, Wang R. Sustainable cooling with water generation. Science 2023;380:458–9. https://doi.org/10.1126/science.add1795.

[5] Poredoš P, Shan H, Wang C, Deng F, Wang R. Sustainable water generation: grand challenges in continuous atmospheric water harvesting. Energy Environ Sci 2022;15:3223–35. https://doi.org/10.1039/D2EE01234K.

[6] Shao Z, Tang Y-C, Lv H, Wang Z-S, Poredoš P, Feng Y, et al. High-performance solar-driven MOF AWH device with ultra-dense integrated modular design and reflux synthesis of Ni2Cl2(BTDD). Device 2023;1:100058. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.device.2023.100058.

[7] Shan H, Poredoš P, Ye Z, Qu H, Zhang Y, Zhou M, et al. All-day Multicyclic Atmospheric Water Harvesting Enabled by Polyelectrolyte Hydrogel with Hybrid Desorption Mode. Adv Mater 2023;n/a:2302038. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adma.202302038.

[8] Shan H, Li C, Chen Z, Ying W, Poredoš P, Ye Z, et al. Exceptional water production yield enabled by batch-processed portable water harvester in semi-arid climate. Nat Commun 2022;13:5406. https://doi.org/10.1038/s41467-022-33062-w.

[9] Li R, Shi Y, Wu M, Hong S, Wang P. Improving atmospheric water production yield: Enabling multiple water harvesting cycles with nano sorbent. Nano Energy 2020;67:104255. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104255.

[10] Deng F, Xiang C, Wang C, Wang R. Sorption-tree with scalable hygroscopic adsorbent-leaves for water harvesting. J Mater Chem A 2022;10:6576–86. https://doi.org/10.1039/D2TA00484D.

[11] Yu Z, Zhu T, Zhang J, Ge M, Fu S, Lai Y. Fog Harvesting Devices Inspired from Single to Multiple Creatures: Current Progress and Future Perspective. Adv Funct Mater 2022;Online Ver:2200359. https://doi.org/10.1002/adfm.202200359.

[12] Xu J, Li T, Yan T, Wu S, Wu M, Chao J, et al. Ultrahigh solar-driven atmospheric water production enabled by scalable rapid-cycling water harvester with vertically aligned nanocomposite sorbent. Energy Environ Sci 2021;14:5979. https://doi.org/10.1039/d1ee01723c.

[13] Haechler I, Park H, Schnoering G, Gulich T, Rohner M, Tripathy A, et al. Exploiting radiative cooling for uninterrupted 24-hour water harvesting from the atmosphere. Sci Adv 2021;7:eabf3978.

Evaluacija modela OpenL3-SVM za klasifikacijo glasovnih motenj

David Lajevec, Maja Vidmar

Povzetek

Glasovne motnje so pogost pojav in vplivajo na posameznikovo življenje in njegovo delovno zmožnost. Za diagnostiko glasovnih motenj je potreben otorinolaringološki pregled, ki zajema metode, ki so pogosto invazivne, drage, časovno potratne in boleče za paciente. V ta namen se razvijajo sodobne računalniške metode, ki načeloma temeljijo na algoritmih strojnega učenja. Ena izmed boljših metod na tem področju je model OpenL3-SVM. V izvornem članku, kjer je bil predstavljen ta model, smo odkrili napake tako imenovanega podatkovnega puščenja pri pripravi učnega nabora. V članku smo napako odpravili in ocenili dejansko uspešnost predstavljene metode na problemu večrazredne in binarne klasifikacije. Rezultati so pokazali bistveno nižje vrednosti specifičnosti, občutljivosti, natančnosti in F1 metrike, kar nakazuje da model OpenL3-SVM ni zmožen ustrezno reševati problema večrazredne klasifikacije glasovnih motenj.

1 Uvod

Govor je v ožjem pomenu besede oblikovanje in kombiniranje glasov v besede, ki so potrebne za komunikacijo. Pri govoru sodelujejo različne strukture, pod katere spadajo grlo, dihala, centralni živčni sistem, odzvočna cev, artikulacijski organi in sluh. Ko pride do motnje na katerikoli izmed teh struktur, ta vpliva na govor. Govorne motnje delimo na motnje govorjenih glasov, motnje fluentnosti in glasovne motnje, ki se delijo na organske in funkcionalne motnje. Pri organskih glasovnih motnjah lahko pri pregledu odkrijemo strukturno okvaro, funkcionalne motnje pa povzroča prekomerna ali napačna raba na videz anatomsko in funkcionalno normalnega aparata. Glasovne motnje nastanejo kot posledica različnih okoliščin med fonacij. Med te okoliščine spadajo: nepopoln stik med glasilkama pri nihanju, nepravilno nihanje glasilk vključno z motenim sluzničnim valom ali nepravilnosti v odzvočni cevi nad in pod glasilkama. Glasovno motnjo predstavlja vsaka neugodna sprememba v glasu, ki jo zaznamo s sluhom, njena pogostost pa je ocenjena na 3-9 % celotne populacije [2]
Za ugotavljanje vzrokov za glasovne motnje je potreben otorinolaringološki pregled, ki ga izvede foniater s specializirano opremo. Med preiskave, ki jih izvede foniater, med drugim spadajo laringoskopija, stroboskopija in endoskopija. Te preiskave so pogosto invazivne, drage, časovno

potratne in tudi boleče za paciente. Zato obstaja potreba po učinkovitih in ekonomičnih diagnostičnih metodah. Računalniško podprte tehnologije so primerne za gradnjo neinvazivnih, natančnih in hitrih sistemov. Za lažjo in hitrejšo diagnostiko glasovnih motenj so bili razviti in uporabljeni akustični analizni sistemi. Kljub temu ti sistemi ne morajo samodejno oceniti parametrov, kar pomeni, da je za diagnostiko še vedno potreben izkušen strokovnjak. Z razvojem računalniške tehnologije v zadnjih letih, mnogi raziskovalci za prepoznavanje glasovnih motenj poskušajo uporabiti strojno učenje [10].

1.1 Podatkovne baze glasovnih motenj

Na področju prepoznavanja in klasifikacije glasovnih motenj se uporablja več podatkovnih baz, kot so SVD (Saarbruecken Voice Database) [13], HUPA (Hospital University of Pennsylvania Voice Database) [1], VOICED [12] in druge. V nadaljevanju sta predstavljeni podatkovni bazi VOICED in SVD, ki smo jih v naši raziskavi uporabili tudi sami.

VOICED podatkovna baza je bila objavljena leta 2018. Vključuje 208 glasovnih vzorcev, od tega 150 patoloških in 58 zdravih glasovnih vzorcev. Udeleženci so brez prekintive v glasu vokalizirali samoglasnik /a/, ki je bil dolg 5 sekund. Podatkovna baza vključuje tudi podatke o starosti, spolu, glasovni motnji, življenjskemu stilu, poklicu in rezultate dveh vprašalnikov: Voice Handicap Index (VHI) in Reflux Symptom Index (RSI). Vprašalnika sta samoocenjevalna. VHI se uporablja za oceno, kako glasovne motnje vplivajo na kakovost življenja posameznika. RSI pa se uporablja za oceno simptomov, ki se pojavijo v povezavi z laringofaringealni refluksom. Glasovne motnje so klasificirali v tri skupine: hiperkinetična disfonija, hipokinetična disfonija in posteriorni laringitis.

SVD ali Saarbruecken Voice Database podatkovna baza je bila objavljena leta 2007. Vključuje 2041 posnetkov govornih vzorcev, med katerimi je 687 zdravih in 1354 patoloških vzorcev. V bazi je 64 različnih vrst glasovnih motenj, pod katere spadajo različne pareze, vnetja, tumorji, psihogene motnje, nevrološke bolezni, strukturne spremembe itd. Posnetki glasovnih vzorcev vključujejo vokalizacijo samoglasnikov [i, a, u], ki so jih govorci izgovorajali z običajno, visoko in nizko višino tona. Samoglasnike so nato še artikulirali z naraščajočo in padajočo višino tona. Nazadnje je vsak govorec izgovoril nemški stavek: "Guten Morgen, wie geht es Ihnen?". Poleg posnetkov so v podatkovni bazi vključene še informacije o spolu, starosti in klinični diagnozi posameznika.

1.2 Modeli strojnega učenja za klasifikacijo glasovnih motenj

Modeli strojnega učenja za klasifikacijo glasovnih motenj vključujejo različne pristope in algoritme. Zaradi velike dimenzionalnosti podatkov (zvočni posnetki) in majhnih podatkovnih naborov se pogosto najprej izvede ekstrakcija značilk. V raziskavah prevladujeta dva pristopa: uporaba akustičnih značilk (osnovni ton, harmonično razmerje šuma (HNR), jitter, shimmer...) in konvolucijskih nevronskih mrež za obdelavo podatkov. Uspešnost obeh pristopov so predstavili v večih člankih. Chen et al. [3] so v svoji raziskavi uporabili 12 Mel frekvenčnih cepstralnih koeficientov skupaj z gosto povezano nevronsko mrežo in tako dosegli 98.6% natančnost. Še boljše rezulate sta pokazala Mittal in Sharma [8], ki sta z uporabo BiLSTM nevronske mreže in kombinacije ekstrahiranih značilk dosegla kar 99.14% natančnost. Bolj podroben nabor do zdaj opravljenih raziskav in njihovih rezultatov je mogoče najti v članku avtorjev Rehman et al. [11].

1.3 Model OpenL3-SVM

Eden od takih modelov je tudi model OpenL3-SVM [9], s katerim so avtorji predstavili izjemne rezultate na področju večrazredne klasifikacije na podatkovnem naboru VOICED [12].

Algoritem za klasifikacijo OpenL3-SVM je sestavljen iz treh delov:

1. **Predhodno naučen model L3 (Look-Listen-Learn)** [4]
   Model L3 je bil razvit za skupno učenje iz avdio in vizualnih podatkov, vendar je v različici OpenL3 osredotočen izključno na avdio signale. Gre za globoko konvolucijsko nevronsko mrežo, ki je prednaučena na velikem naboru podatkov AudioSet [6] in je sposobna samodejno izločiti visoko raven značilk iz zvočnih signalov.
2. **Redukcija dimenzionalnosti značilk**
   Na vektorju značilk pridobljenem na koncu prejšnjega koraka izvedemo redukcijo dimenzionalnosti s pomočjo ene od znanih metod. V članku sta najboljše rezultate prinesli metodi LLTSA [14] in PCA [5].
3. **Metoda podpornih vektorjev (SVM)** Končno klasifikacijo izvedemo z metodo podpornih vektorjev na reduciranih vektorjih značilk.

Model je dosegel kar 99,5% natančnost, 99,6% občutljivost, 98,9% specifičnost in vrednost F1 99,6%. To presega vse rezultate obstoječih metod na tem področju. Vendar pa smo pri lastni implementaciji metod opisanih v članku ugotovili večjo napako v postopku priprave podatkov za učenje in vrednotenje modela. Metodologija, ki so jo uporabili, namreč vpelje t.i. podatkovno puščanje (ang. data leakage), zaradi česar so rezultati modela izjemno precenjeni. Cilj našega članka je pravilna implementacija in evaluacija predstavljene metode.

2 Metode dela in rezultati

2.1 Predprocesiranje podatkov

Obe podatkovni bazi, s katerimi smo delali, smo na začetku ločili na stratificirane podatkovne nabore za učenje, validacijo in testiranje. Posnetke smo najprej segmentirali na odseke dolžine 1.024 s, kjer je vsak segment vseboval 8192 podatkovnih točk. Sosednji segmenti so se prekrivali v 4092 točkah. Take segmente smo nato pretvorili v Mel spektrograme, ki so bili uporabljeni kot vhod v model. Mel spektrogram je logaritemski frekvenčni spekter na Mel lestvici, ki posnema zaznavanje zvoka s strani človeškega ušesa in oslabi zaznavanje signalov z visoko frekvenco. Človeško uho je namreč manj občutljivo na visoke frekvence, saj so visoke frekvence manj pomembne za razumevanje govora. Da bi dobili Mel spektrogram, je najprej potrebno prevzorčiti posnetke na 48 kHz, izvesti uokviranje (ang. framing) in uporabiti Hammingovo okno. Dolžina okvirja je bila 2048 točk, s prekrivanjem 1801 točk med okvirji. Signali iz časovne domene se pretvorijo v frekvenčno domeno z uporabo kratkočasovne Fourierjeve transformacije (STFT). Mel spektrogram je bil pridobljen z uporabo funkcionalnosti knjižnice Librosa [7] v programskem jeziku Python.

2.1.1 Napaka predprocesiranja v izvirnem članku

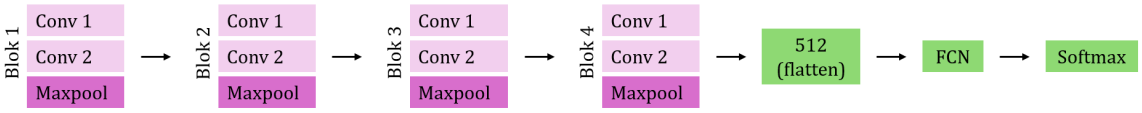
V izvirnem članku [9] je bila ločitev na podatkovne nabore za učenje, validacijo in testiranje narejena šele po segmentaciji posnetkov na krajše segmente. Na tak način je bilo vpeljano podatkovno puščanje, saj so bili lahko segmenti, ki so bili vsi del posnetka enega pacienta, tako v učnem kot v testnem naboru.

2.2 Učenje modela

V sklopu učenja smo izvedli več eksperimentov na dveh podatkovnih setih: VOICED, ki je namenjen večrazredni klasifikaciji, in SVD, ki je namenjen binarni klasifikaciji (patološko/ni patološko). V prvem sklopu eksperimentov smo napovedi izvajali s konvolucijsko nevronsko mrežo modela L3, ki smo jo fino učili, pri čemer smo zamrznili različno število uteži v konvolucijskih plasteh. Groba arhitektura modela je prikazana na sliki 1. Učili smo pet modelov z uporabo petih različnih strategij:

- Strategija 1: učenje uteži vseh blokov
- Strategija 2: učenje uteži blokov 2-4
- Strategija 3: učenje uteži blokov 3-4
- Strategija 4: učenje uteži bloka 4
- Strategija 5: učenje uteži gosto povezane plasti (FCN)

Pri problemu večrazredne klasifikacije smo model učili z učno vrednostjo 9.5e-5, velikostjo serije (ang. batch size) 32 za 10 epoh s funkcijo zgodnje zaustavitve, ko dosežemo stopnjo pretiranega prilagajanja. Uporabili smo funkcijo napake kategorične križne entropije in optimizator Adam. Pri problemu binarne klasifikacije smo model učili z učno vrednostjo 1.2e-5, velikostjo serije (ang. batch size) 32 za 15 epoh s funkcijo zgodnje zaustavitve. Dodatno smo vključili funkcijo naključnega izklapljanja nevronov na gosto povezani plasti z vrednostjo 0.5 (ang. dropout), ki smo jo določili na podlagi preizkušanja. Uporabili smo funkcijo napake kategorične križne entropije in optimizator Adam. Optimalni parameteri učne vrednosti in velikost serije so bili določeni z iskanjem po mreži. Število epoh je manjše, saj je model že zelo zgodaj v procesu učenja začel s pretiranim prilagajanjem.



Slika 1: Groba arhitektura modela L3.

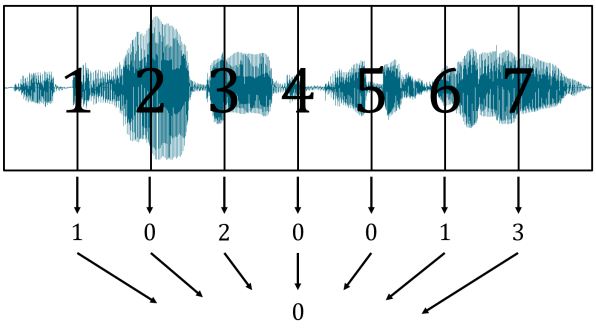
V drugem sklopu eksperimentov smo uporabili model iz prvega sklopa, učen po strategiji 4, skladno z izvirnim člankom [9]. Na sploščenem vektorju dolžine 512 smo nato izvedli redukcijo dimenzionalnosti na velikost dimenzije 100, nato pa smo za klasifikacijo uporabili metodo podpornih vektorjev. Metoda podpornih vektorjev je uporabljala jedro z radialno osnovo.

2.3 Ocenjevanje uspešnosti modela

V naši popravljeni metodologiji smo za učenje in validacijo uporabili segmente iz učnega in validacijskega nabora pacientov. Segmente smo v tem delu obravnavali kot samostojne podatkovne točke in tako privzeli, da so med seboj neodvisni. Pri evaluaciji modela na testnem naboru pa smo upoštevali vse segmente, ki so pripadali enemu pacientu in z metodo večinskega glasovanja izvedli napoved za posameznega pacienta.

2.3.1 Večinsko glasovanje

Večinsko glasovanje smo izvedli tako, da smo z naučenim modelom izvedli napovedi na vseh segementih enega posnetka in posnetku dodeli razred, v katerega je bilo napovedanih največ segmentov. V primeru ko je rezultat izenačen, zmagovalca izberemo naključno. Delovanje je prikazano na sliki 2.



Slika 2: Večinsko glasovanje razreda celotnega posnetka iz napovedi posameznih segmentov.

3 Rezultati

3.1 Evaluacija modela na VOICED podatkovnem setu

V spodnjih tabelah 1 in 2 so prikazani rezulati eksperimentov na podatkovnem setu VOICED za problem večrazredne klasifikacije.

Model	**SEN**	**SPEC**	**ACC**	**F1**
Softmax - strategija 1	0.33	0.56	0.33	0.33
Softmax - strategija 2	0.40	0.44	0.40	0.37
Softmax - strategija 3	0.31	0.60	0.31	0.31
Softmax - strategija 4	0.36	0.50	0.36	0.34
Softmax - strategija 5	0.31	0.00	0.31	0.22

Tabela 1: Rezultati fino učenega modela L3 pri različnih strategijah zamrzovanja na podatkovnem setu VOICED in večrazredni klasifikaciji

Model	**SEN**	**SPEC**	**ACC**	**F1**
SVM	0.24	0.50	0.24	0.24
PCA - SVM	0.33	0.67	0.33	0.33
LTSA - SVM	0.24	0.57	0.24	0.24
LLE - SVM	0.26	0.67	0.26	0.26

Tabela 2: Rezultati različnih metod redukcije dimenzionalnosti na modelu, ki je bil fino učen po strategiji 4

3.2 Evaluacija modela na SVD podatkovnem setu

V spodnjih tabelah 3 in 4 so prikazani rezulati eksperimentov na podatkovnem setu SVD za problem binarne klasifikacije.

Model	**SEN**	**SPEC**	**ACC**	**F1**
Softmax - strategija 1	0.67	0.71	0.67	0.67
Softmax - strategija 2	0.71	0.81	0.71	0.71
Softmax - strategija 3	0.72	0.79	0.72	0.72
Softmax - strategija 4	0.69	0.78	0.69	0.69
Softmax - strategija 5	0.61	1.00	0.61	0.46

Tabela 3: Rezultati fino učenega modela L3 pri različnih strategijah zamrzovanja na podatkovnem setu SVD in večrazredni klasifikaciji

Model	**SEN**	**SPEC**	**ACC**	**F1**
SVM	0.68	0.78	0.68	0.688
PCA - SVM	0.69	0.78	0.69	0.69
LTSA - SVM	0.70	0.78	0.70	0.69
LLE - SVM	0.68	0.75	0.68	0.68

Tabela 4: Rezultati različnih metod redukcije dimenzionalnosti na modelu, ki je bil fino učen po strategiji 4

4 Zaključki

Na podlagi izvedene raziskave smo ugotovili, da metoda OpenL3-SVM, kot je bila predstavljena v izvirnem članku [9], ne dosega enakih rezultatov, ko je pravilno implementirana in evalvirana brez napak podatkovnega puščanja. Naša analiza je razkrila, da je bila metodologija v izvirnem članku pomanjkljiva, saj je omogočila prenos podatkov iz učnega v testni nabor, kar je privedlo do precenjenih rezultatov modela. V naši popravljeni implementaciji so rezultati pokazali bistveno nižje vrednosti specifičnosti, občutljivosti, natančnosti in F1 metrike. To nakazuje, da model OpenL3-SVM v svoji izvirni obliki ni zmožen ustrezno reševati problema večrazredne klasifikacije glasovnih motenj. Naši eksperimenti so jasno pokazali, da model L3, ki je bil zasnovan za ekstrakcijo značilk iz avdio in vizualnih podatkov, ni primeren za ekstrakcijo pomembnejših značilk iz govora, ki bi jih lahko učinkovito uporabili za klasifikacijo glasovnih motenj. Predučenje uteži modela L3, ki so bile prvotno prilagojene na širok spekter

zvočnih in vizualnih podatkov, se izkažejo za neustrezne v kontekstu specializiranega področja prepoznavanja glasovnih motenj. Glede na slabe rezultate, ki smo jih dosegli z uporabo modela OpenL3-SVM na področju glasovnih motenj, ugotavljamo, da je uporaba tega modela za ta specifičen problem neprimerna. V prihodnje bi bilo smiselno raziskati druge pristope k ekstrakciji značilk, ki so specifičnejši za glasovne podatke, ter razviti modele, ki bodo bolj prilagojeni za potrebe klasifikacije glasovnih motenj.

5 Literatura

[1] J. D. Arias-Londoño, J. I. Godino-Llorente, Maria Markaki, and Yannis Stylianou. On combining information from modulation spectra and mel-frequency cepstral coefficients for automatic detection of pathological voices. *Logopedics Phoniatrics Vocology*, 36(2):60–69, 2011.

[2] Irena Hočevar Boltežar. *Patologija glasu ter izbrana poglavja iz patologije govora – učbenik*. Pedagoška fakulteta Univerze v Ljubljani, Ljubljana, 2 edition, 2019. Katedra za otorinolaringologijo Medicinske fakultete Univerze v Ljubljani, Klinika za otorinolaringologijo in cervikofacialno kirurgijo Univerzitetnega kliničnega centra v Ljubljani.

[3] Lili Chen and Junjiang Chen. Deep neural network for automatic classification of pathological voice signals. *Journal of Voice*, 36(2):288.e15–288.e24, March 2022.

[4] Aurora Linh Cramer, Ho-Hsiang Wu, Justin Salamon, and Juan Pablo Bello. Look, listen, and learn more: Design choices for deep audio embeddings. In *ICASSP 2019 - 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. IEEE, May 2019.

[5] Karl Pearson F.R.S. Liii. on lines and planes of closest fit to systems of points in space. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 2(11):559–572, 1901.

[6] Jort F. Gemmeke, Daniel P. W. Ellis, Dylan Freedman, Aren Jansen, Wade Lawrence, R. Channing Moore, Manoj Plakal, and Marvin Ritter. Audio set: An ontology and human-labeled dataset for audio events. In *2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pages 776–780, 2017.

[7] Brian McFee, Colin Raffel, Dawen Liang, Daniel Ellis, Matt McVicar, Eric Battenberg, and Oriol Nieto. librosa: Audio and music signal analysis in python. In *Proceedings of the 14th Python in Science Conference*, SciPy. SciPy, 2015.

[8] Vikas Mittal and R. K. Sharma. Deep learning approach for voice pathology detection and classification. *International Journal of Healthcare Information Systems and Informatics*, 16(4):1–30, September 2021.

[9] Xiangyu Peng, Huoyao Xu, Jie Liu, Junlang Wang, and Chaoming He. Voice disorder classification using convolutional neural network based on deep transfer learning. *Scientific Reports*, 13(1), May 2023.

[10] Abdullah Abdul Sattar Shaikh, M.S. Bhargavi, and Ganesh R. Naik. Unraveling the complexities of pathological voice through saliency analysis. *Computers in Biology and Medicine*, 166:107566, 11 2023.

[11] Mujeeb Ur Rehman, Arslan Shafique, Qurat-Ul-Ain Azhar, Sajjad Shaukat Jamal, Youcef Gheraibia, and Aminu Bello Usman. Voice disorder detection using machine learning algorithms: An application in speech and language pathology. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 133:108047, July 2024.

[12] Laura Verde and Giovanna Sannino. Voiced database, 2022.

[13] Bogdan Woldert-Jokisz. Saarbruecken voice database, 2007.

[14] Tianhao Zhang, Jie Yang, Deli Zhao, and Xinliang Ge. Linear local tangent space alignment and application to face recognition. *Neurocomputing*, 70(7–9):1547–1553, March 2007.

MOŽNOSTI ANALIZE ZAVOJEV PRI ALPSKEM SMUČANJU S CENOVNO UGODNIMI AHRS IMU SENZORJI

Tijana Leban

Povzetek

Poučevanje alpskega smučanja in ocenjevanje izvedbe tehnike se večinoma izvaja vizualno. Z razvojem različnih senzorjev so se odprle možnosti za dodatno merjenje dinamičnih parametrov smučanja, ki so lahko učitelju v pomoč pri ocenjevanju tehnike smučanja. Opravljene so bile številne raziskave smučanja z različnimi vrstami senzorjev in njihovo postavitvijo na smučarsko opremo in samega smučarja. Zaradi visoke cene merilnih naprav in kompleksnosti merilnih sistemov, je ta oprema nedostopna za večino smučarjev. V tem prispevku predstavimo sistem merjenja dinamičnih parametrov smučanja, ki je sestavljen iz štirih cenovno ugodnih senzorjev. Ti merijo pospešek, kotno hitrost in magnetno polje. Sistem ne posega v smučarsko opremo in ne ovira smučanja pri gibanju. Interpretacijo podatkov z namenom ocenjevanja tehnike smučarja prikažemo na meritvah dveh smučarjev z različno stopnjo znanja. Ugotovimo, da lahko s takim sistemom zaznamo tudi napake, ki jih s prostim očesom pri dobrem smučarju težje opazimo.

1 Uvod

Alpsko smučanje je dinamičen šport, ki zahteva uporabo pravilne tehnike [1–3]. Poučevanje poteka tako, da učitelj ali trener smučanja opazuje smučarja in mu svetuje popravke v tehniki. Dodatno se lahko uporablja video snemanje in naknadna analiza posnetka. Težavo predstavlja zahteva po različnih zornih kotih opazovanja za oceno različnih elementov tehnike, manjše napake pa je tudi težje opaziti.

Na voljo pa imamo tudi različne senzorje. Zanimivi so MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) senzorji, pretežno IMU (Inertial Measurement Unit) in AHRS (Attitude and Heading Reference System) senzorji, ki vsebujejo 3-osne (x, y, z) senzorje za merjenje pospeškov, žiroskope za merjenje kotne hitrosti in nekateri tudi mangetometre za merjenje zemeljskega magnetnega polja [4,5]. V odvisnosti od števila senzorjev ločimo 6-osne, ki merijo pospešek in kotno hitrost, in 9-osne IMU seznorje, ki merijo še magnetno polje. Razlika med IMU in AHRS senzorji, ki jih imenujejo tudi AHRS IMU senzorji, je, da AHRS senzorji merjene podatke že procesirajo v napravi, IMU senzorji pa vračajo neobdelane podatke [6]. Natančnost AHRS senzorjev je manjša in šum pospeškometrov ter žiroskopov je relativno velik. Pri meritvah smučanja se v

nekaterih primerih ob IMU senzorjih uporabljajo še senzorji pritiska za merjenje sil, in GPS senzorji, ki pa morajo biti natančni.
Na področju merjenja dinamičnih lastnosti športov, tudi alpskega smučanja, so bile izvedene številne raziskave, ki so bile usmerjene v merjenje in ocenjevanje različnih parametrov smučanja z različno natančnostjo, odvisno od zahtevnosti merilnega sistema [7–14]. V nekaterih raziskavah so uporabili IMU senzorje v kombinaciji s senzorji pritiska [7, 9], ali pa z GPS signalom [8–10]. V raziskavi [11] pa so uporabili še barometer za meritev naklona smučišča. Število senzorjev se v raziskavah razlikuje, prav tako njihova postavitev in natančnost.
Nadalje [12] obravnava in predlaga merilni sistem na osnovi 5 IMU miniaturih senzorjev za merjenje in analizo kinematike v alpskem smučanju med treningom, ki naj bo v pomoč učiteljem in trenerjem smučanja. Predlagana je uporaba 5 IMU senzorjev pritrjenih na zadnji strani smučarskih čevljev, na smučarskih palicah in na trupu v višini pasu. Dodatno je predlagana uporaba barometra za oceno naklona smučišča.
Raziskavo [13] za oceno drže alpskih smučarjev z uporabo tehnik strojnega učenja so opravili slovenski raziskovalci. Uporabili so posebno merilno obleko s kar 17 IMU 9-osnimi senzorji in zelo natančnim GNSS (Global Navigation Satellite System). Raziskovalci Univerze v Ljubljani, Fakultete za elektrotehniko, pa so v sodelovanju s podjetjem Elan d.o.o. razvili prototip pametne smučke [14], za kar so uporabili senzorje pritiska pod smučarskimi vezmi in IMU senzor, kar omogoča merjenje razlik v obremenitvi obeh smuči in obremenitev posamezne smuči po dolžini. Meritve smučanja se ne izvajajo le v raziskovalne namene, ampak se na tržišču pojavljajo tudi prvi komercialni produkti [15, 16].
V tej raziskavi želimo ugotoviti, ali je mogoče za merjenje smučanja uporabiti cenovno ugodne AHRS IMU senzorje, ki so enostavni za uporabo in ne posegajo v smučarsko opremo. Dodatno smo ocenili uporabnost takega sistema.
V članku je najprej predstavljen merilni sistem, potek meritev in obdelave izmerjenih podatkov. Nato so predstavljeni rezultati obdelanih meritev, ki so komentirani s stališča uporabnosti za učitelje in trenerje smučanja.

2 Metode dela in potek raziskave

2.1 Merilni sistem

Uporabili smo 9-osne senzorje WitMotion WT901BLECL [17] (cena enega senzorja je okrog 45 EUR). Gre za AHRS IMU senzorje (specifikacije v [18]). Omejeni smo bili na uporabo štirih senzorjev, saj mobilna aplikacija ne omogoča večjega števila povezav. Nastavili smo največjo frekvenco zbiranja podatkov, uporabili smo jih skladno z navodili [17].
Senzorje smo postavili na obe nogi, tik nad smučarskim čevljem, na sredino pasu in prsnega koša. Pritrjeni so bili s trakom pod smučarskimi oblačili, da so bili zaščiteni pred vlago in mehanskimi poškodbami.

Postavitev senzorjev nam je določila statičen opazovalni sistem XYZ, ki ustreza začetni poziciji smučarja, in lastni sistem smučarja xyz, v katerem smučar miruje. Z-os kaže navpično navzgor, Y-os je obrnjena v smeri vpadnice, X-os pa je pravokotna na preostali osi, tako da skupaj tvorijo pozitivno orientacijo. V sistemu smučarja kaže y-os naprej v smeri gibanja, x-os levo, z-os pa navzgor.

2.2 Izvajanje meritev

Meritve smo izvedli 18. 3. in 10. 4. 2023 na smučišču Krvavec z opisanim merilnim sistemom. Merili smo 2 smučarja, 19-letno bivšo tekmovalko v kategoriji U16 z mladinskimi tekmovalnimi smučmi (L = 181 cm, R = 25.0 m) in 60-letnega rekreativnega smučarja z rekreativnimi smučmi (L = 170 cm, R = 17.2 m).

2.3 Obdelava podatkov

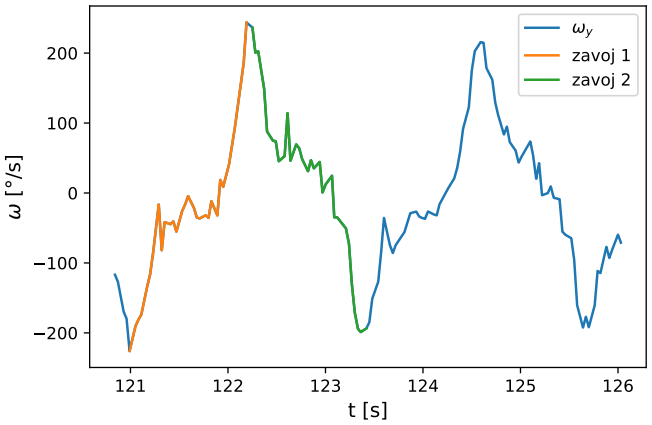
Senzorji podajajo že združene meritve pospeška in kotne hitrosti in izračunane Eulerjeve kote. Eulerjevi koti označujejo zasuk telesa okoli treh osi in enolično opišejo orientacijo telesa v prostoru glede na začetno pozicijo telesa [19]. Senzor uporablja rotacije Z-Y-X, kar pomeni da najprej zavrtimo telo okoli Z-osi, nato okoli Y-osi in nazadnje še okoli X-osi. Eulerjevi koti so podani za sistem XYZ, pospešek, kotna hitrost in magnetno polje pa so izmerjeni v sistemu xyz.

Podatki magnetometra so sicer vključeni v Kalmanov filter, ki ga uporablja senzor, nimamo pa dostopa do njih, če uporabljamo več kot en senzor naenkrat. Čeprav je bila frekvenca zajemanja podatkov večja, imamo na voljo meritve s frekvenco 25 Hz. Ker so bili podatki že optimalno združeni v senzorju, smo se osredotočili na prikaz in interpretacijo obstoječih podatkov.

Za delo s podatki smo uporabili programski jezik python, znotraj katerega smo uporabili knjižnici numpy in matplotlib. Najprej smo prikazali vse podatke na grafih in ocenili, iz katerih lahko pridobimo čim bolj točne informacije o posameznih zavojih. Zaradi velike zašumljenosti podatkov o pospešku, smo se odločili za uporabo podatkov o Eulerjevih kotih in kotni hitrosti. V nadaljevanju uporabljamo oznake γ, β in α za Eulerjeve kote okoli Z, Y, in X osi. Kot γ predstavlja zavoj smučanja (odmik od vpadnice), kot β predstavlja nagib levo/desno (ko je smučar pri miru, je $\beta = 0\,^\circ$), α pa predstavlja nagib naprej/nazaj.

Za določanje začetka zavojev smo uporabili nekaj predpostavk o smučanju. Na začetku zavoja ima smučar smuči in noge v vzporednem položaju. Nato smučar začne zavoj z zasukom ramen in nagibom kolen naprej in v radialni smeri. V fazi vodenja zavoja se težišče smučanja niža in nagib kolen veča, saj se sile, ki delujejo nanj, večajo. Smučar je ob koncu zavoja v najnižjem položaju, kot nastavitve robnikov pa je v tej fazi največji. Nato se smučar dvigne nazaj v osnovni položaj in začne nov zavoj [1–3].

Ker smučar pri prehodu med zavoji zmanjša nagib kolen in ga nato spet poveča, smo kot merilo



Slika 1: Kotna hitrost okoli y-osi za senzor na levi nogi tekom štirih zapojev, posebej sta označena sta dva zaporedna zavoja.

za začetek zavoja uporabili trenutek največje kotne hitrosti okoli y-osi ω_y(slika 1), takrat tudi zahtevamo, da je kot $\beta = 0\,^\circ$. Tako se znebimo morebitnega odmika od prave vrednosti velikosti kota, ki nastane v postopku računanja. Nadalje zahtevamo, da je tudi kot α v tem trenutku enak za obe nogi, vendar ne vemo absolutne vrednosti, zato tudi ta kot postavimo na $0\,^\circ$. Kot γ pa je enak $0\,^\circ$ na sredini zavoja, ko je smučar obrnjen proti vpadnici, to tudi določimo iz ω_y. Ta postopek izvedemo za senzorje pritrjene na nogah, za zasuk telesa pa ne predpostavljamo začetne postavitve, saj je lahko smučar obrnjen stran od smeri gibanja in želimo oceniti ta zasuk. Ali smučar zavija v levo ali desno določimo iz predznaka kota β, pri pozitivnih kotih gre za zavoj v levo, pri negativnih pa zavoj v desno. Ocenimo lahko še obliko zavoja, za kar uporabimo kot γ. Predpostavimo, da je hitrost smučarja tekom zavoja konstantna, ker nas zanima le oblika zavoja, ni pomembno da točno ocenimo hitrost. Izračunamo X in Y koordinati smučarja, veljata izraza:

$$X(t) = \int_0^t \sin\gamma(t')\,dt' \qquad Y(t) = \int_0^t \cos\gamma(t')\,dt' / \cos\varphi, \tag{1}$$

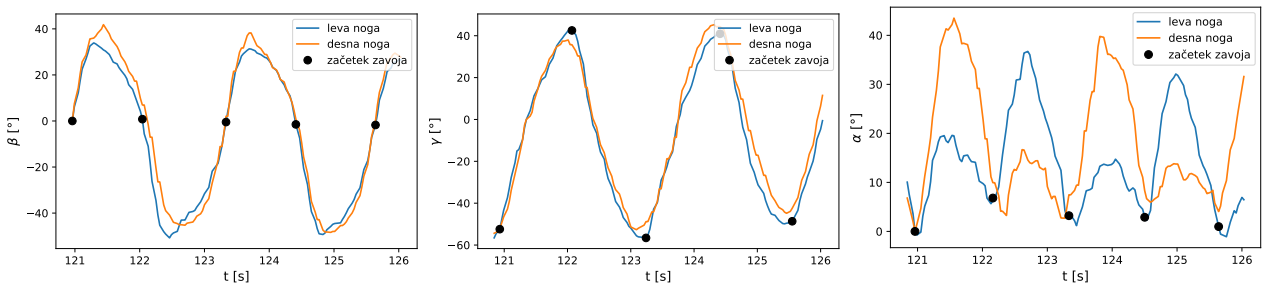
kjer je φ naklon smučišča. Če vzamemo $\varphi = 0\,^\circ$, dobimo obliko zavoja, projicirano na ravnino, za naš primer je povprečen naklon proge enak 15°.

3 Rezultati

Za rekreativnega smučarja in bivšo tekmovalko smo natančno analizirali nekaj zavojev. Informacije o želeni tehniki so iz [1–3].

Slika 2 prikazuje spreminjanje kotov β, γ in α v odvisnosti od časa za bivšo tekmovalko, za senzorja postavljena na levi in desni nogi. Opazimo, da pride do majhne razlike v kotih stranskega nagiba kolen v fazi vodenja zavoja. Premajhno zvračanje notranjega kolena je pogosta napaka tudi pri izkušenih smučarjih. Razlika nagibov znaša do $15\,^\circ$, kar lahko zaznamo tudi

s prostim očesom. Opazimo tudi, da je nagib notranje noge naprej precej manjši kot zunanje (kot α), iz česar sklepamo, da je smučarka v zavoju potisne notranjo smučko naprej. Majhen potisk naprej sicer ni napaka, a se želimo izogniti prevelikim razlikam, saj lahko to privede do neželenega zasuka zgornjega dela telesa. Za kot γ tudi opazimo majhno razliko ob prehodu med zavoji, kar bi lahko pomenilo, da smučarka ob prehodu med zavoji rahlo razpre smuči. Ta razmik bi opazovalec težko ocenil, saj bi potrebovali pogled s ptičje perspektive.

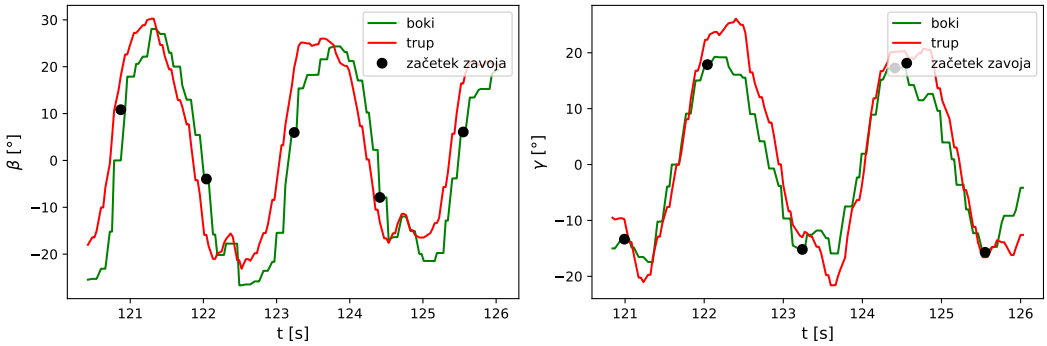


Slika 2: Spreminjanje kotov β (stranski nagib kolen), γ (potek zavoja) in α (nagib naprej/nazaj) v odvisnotsti od časa, za senzorja na levi in desni nogi pri bivši tekmovalki.

Na sliki 3 pa opazujemo kota β in γ za senzorja, ki sta postavljena v pasu za boke in na zgornjem delu trupa. Vidimo, da pri kotu β pride do stranskega nagiba telesa pred nagibom bokov, še pred začetkom zavoja, kar pomeni, da smučarka za začetek zavoja uporabi nagib telesa vstran. Ta prekomerni nagib v drugi polovici zavoja popravi. Če primerjamo največji stranski nagib telesa in nagib kolen na sliki 2, vidimo da je nagib telesa manjši, kar kaže na pravilno tehniko. Nagib telesa želimo čim bolj zmanjšati.

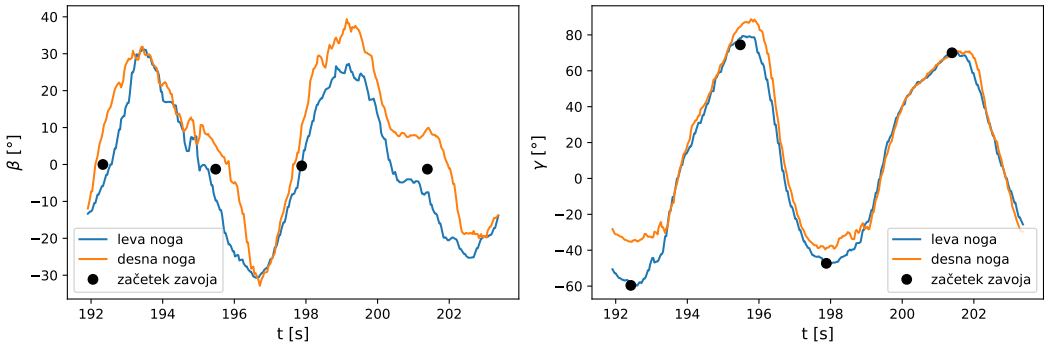
Na sliki 3 vidimo tudi, da je v začetku in na koncu zavoja zasuk trupa od vpadnice (kot γ) večji kot zasuk bokov, kar pomeni, da smučarka zavoj prekomerno vodi z zasukom trupa. Ker pa je razlika le 5 °, tega prekomernega zasuka opazovalec ne opazi zlahka. Prav tako ne bi opazili stranskega nagiba trupa v zavoj.

Spreminjanje kotov senzorjev na nogah pri rekreativnem smučarju prikazuje slika 4. Najprej



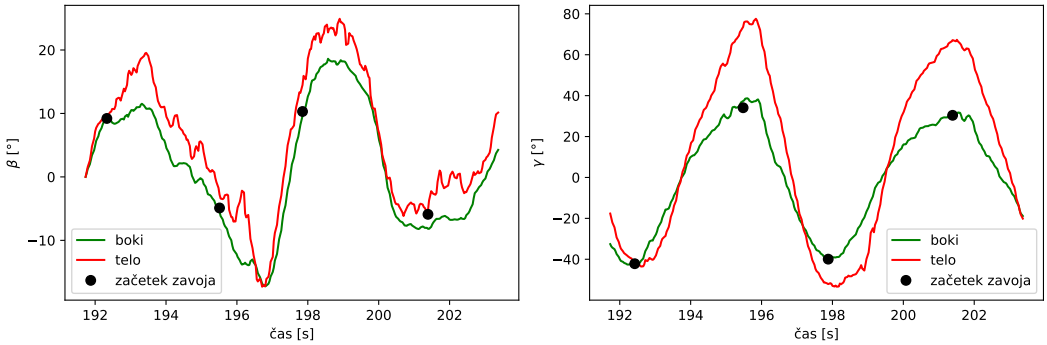
Slika 3: Spreminjanje kotov β in γ za senzorja v pasu in na trupu - bivša tekmovalka.

opazimo, da je največji stranski nagib za 10 ° manjši kot pri bivši tekmovalki, vidimo pa tudi,



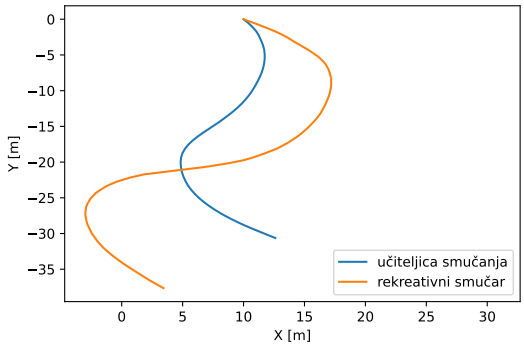
Slika 4: Spreminjanje kotov β in γ za senzorja na levi in desni nogi - rekreativni smučar.

da je nagib obeh nog redkokdaj enak. Pri času $t = 201\,s$ je smučar več časa ostal v prehodu med dvema zavojema, pri čemer sta bili obe nogi nagnjeni ena proti drugi (položaj klina), čemur se želimo izogniti. Pri opazovanju kota γ pa vidimo, da pri prehodu med zavoji pride do nevzporednega položaja smuči. V nasprotju s prejšnjim primerom, pa ima tu zgornja smučka manjši odklon od vpadnice, iz česar sklepamo, da smučarju zdrsne zadnji del spodnje smučke ali pa prej zavrti zgornjo smučko za začetek zavoja. Posledično med zavojema pride v položaj klina, kar se sklada s prejšnjo ugotovitvijo. Za kateri primer gre, samo iz teh podatkov ne moremo določiti.



Slika 5: Spreminjanje kotov β in γ za senzorja v pasu in na trupu - rekreativi smučar.

Na sliki 5 pa sta prikazana še kota β in γ za senzorja v pasu in na trupu. Pri kotu β opazimo večji stranski nagib trupa, vendar le v zavojih v levo. Ker je razlika v nagibu enaka 10 °, lahko opazovalec pri smučarju to napako opazi. Prav tako opazimo prevelik zasuk trupa, pri čemer je razlika zopet večja pri zavoju v levo. Ker je velikost razlike zasuka tudi več kot 30 °, jo lahko opazi vsak opazovalec. Večja prisotnost v nekaterih zavojih nakazuje na to, da smučar v eno smer bolje izpelje zavoj kot v drugo. V praksi želimo tako razliko čim bolj zmanjšati, da so zavoji simetrični. Oblika dveh zavojev za oba smučarja je prikazana na sliki 6. Za izračun smo privzeli hitrost $v = 60\,km/h$ za bivšo tekmovalko in $v = 36\,km/h$ za rekreativnega smučarja. Vidimo, da bivša tekmovalka kljub večjemu radiju smuči in večji hitrosti dela krajše zavoje.



Slika 6: Oblika dveh zavojev za oba smučarja.

4 Zaključki

Ugotovili smo, da lahko uporabimo 4 poceni AHRS IMU senzorje za ocenjevanje pravilne tehnike smučanja. Zaznamo lahko veliko najpogostejših napak. Pri izkušenih smučarjih pa lahko zaznamo tudi majhne napake, ki jih sicer ne bi nujno videli pri opazovanju prostega smučanja. Zaključimo, da je tak sistem merjenja lahko koristen predvsem za dobre smučarje, za rekreativne smučarje, ki delajo večje napake, pa ni bistvenih prednosti uporabe senzorjev, saj lahko učitelj smučanja take napake brez težav opazi.

5 Literatura

[1] B. Lešnik in M. Žvan, Naše smučine - Teorija in metodika alpskega smučanja, 2. dopolnjena izdaja, SZS - ZUTS Slovenije, Ljubljana, 2013.

[2] R. LeMaster, Ulitmate Skiing, Human Kinetics, USA, 2010.

[3] USSA Giant Slalom Techniques and Tactics, DVD sports performance series, U.S. Ski and Snowboard Association, 2011.

[4] A Guide To using IMU (Accelerometer and Gyroscope Devices) in Embedded Applications, December 29, 2009,(http://www.starlino.com/imu_guide.html, obiskano: 7. 8. 2024).

[5] Attitude and Heading Reference System (AHRS), VectorNav, (https://www.vectornav.com/resources/inertial-navigation-primer/theory-of-operation/theory-ahrs, obiskano: 6. 8. 2024).

[6] AHRS VS IMU, SenNav, (https://sennavs.com/ahrs-vs-imu/, obiskano: 10. 3. 2023).

[7] S. Matsumura, K. Ohta and T. Kimura, Comfortable Measurement of Ski-turn Skill using Inertial and Plantar-pressure Sensors, Proceedings of the 6th International Congress on Sport Sciences Research and Technology Support (icSPORTS 2018), pp. 145-148, (DOI: 10.5220/0006959301450148).

[8] C. Snyder, A. Martínez, R. Jahnel, J. Roe and T. Stöggl, Connected Skiing: Motion Quality Quantification in Alpine Skiing, Sensors 2021, 21, 3779. (https://doi.org/10.3390/s21113779).

[9] K. Hirosea, H. Dokia and A. Kondoa, Dynamic analysis and motion measurement of ski turns using inertial and force sensors, 6^{th} Asia-Pacific Conference on Sports Technology, Procedia Engineering, vol. 60, pp. 355 – 360, 2013, (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813011338).

[10] A. Kondoa, H. Dokia and K. Hirosea, Motion analysis and joint angle measurement of skier gliding on the actual snow field using inertial sensors, 6^{th} Asia-Pacific Conference on Sports Technology, Procedia Engineering, vol. 60, pp. 307 – 312, 2013, (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813011326).

[11] C. Russoa, F. Moceraa and A. Somà, MEMS sensors for sport engineer applications, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1038 (2021) 012056, (DOI:10.1088/1757-899X/1038/1/012056).

[12] C. Russo, E. Puppo, S. Roati and A. Somà, Proposal of an Alpine Skiing Kinematic Analysis with the Aid of Miniaturized Monitoring Sensors, a Pilot Study, Sensors 2022, 22, 4286, (https://doi.org/10.3390/s22114286).

[13] B. Nemec, T. Petrič, J. Babič and M. Supej, Estimation of Alpine Skier Posture Using Machine Learning Techniques, Sensors, vol. 14, pp. 18898-18914, 2014, (DOI:10.3390/s141018898).

[14] A. Umek in A. Kos, Pametna športna oprema: smuči z vgrajenimi senzorji in asistenčnim sistemom za posredovanje povratne informacije v realnem času, Elektrotehniški vestnik, letnik 89, št. 1-2, str. 1-6, 2022.

[15] CARV - Your Invisible Instructor, (https://getcarv.com/device, obiskano: 19. 10. 2023).

[16] Become a better skier - Snowcookie wearable tech review, (https://dlmag.com/become-a-better-skier-with-snowcookie-wearables/, obiskano: 31. 1. 2024).

[17] USER MANUAL WT901BLECL BLE5.0 Bluetooth 5.0 Inclinometer Sensor, (https://drive.google.com/file/d/1S-HpD_LTmNxMHNyH8Gp3BSOXI2T6611l/view?usp=drive_link, obiskano: 17. 8. 2024).

[18] Bluetooth AHRS IMU sensor — WT901BLECL, Datasheet, https://drive.google.com/file/d/1fE093eURzgFIPuU9MF4pnJidW3bbwwNV/view?usp=drive_link, obiskano: 17. 8. 2024).

[19] Euler angles, (https://en.wikipedia.org/wiki/Euler_angles, obiskano: 20. 8. 2024)

IZRIS TRAJEKTORIJE ROBOTA PODJETJA YASKAWA Z UPORABO INERCIJSKIH MIKRO-ELEKTRO-MEHANSKIH POSPEŠKOMEROV

Lovro Lipovec

Mentor: prof. dr. Gregor ČEPON, univ. dipl. inž.

Povzetek

V tem delu raziskujemo uporabo MEMS pospeškomerov za sledenje trajektoriji robota, pri čemer smo se soočili z izzivi, kot so šum in nenatančnost senzorjev. Senzorji, kot je ADXL203, so zaradi majhnosti, nizke cene in nizke porabe energije široko uporabljeni, vendar se je pri meritvah hitrosti in pospeška izkazalo, da surovi podatki zaradi branja hrupa niso dovolj natančni. Za izboljšanje natančnosti smo uporabili Kalmanov filter, ki temelji na Bayesovi verjetnosti in omogoča združevanje prejšnjih meritev in pričakovanih vrednosti, ter nizkoprepustni filter za odstranjevanje visokofrekvenčnega šuma. Kljub izboljšavam se je pokazalo, da ADXL203, ki je 2-osni pospeškomer, ni primeren za visoko natančne meritve, zato smo preizkuse ponovili z Dytran 7533A4 3-osnim pospeškomerom in enakimi numeričnimi metodami filtriranja. Dytran 7533A4, ki je robusten in primeren za industrijske aplikacije, ima širok frekvenčni odziv in boljšo odpornost na okoljske vplive. Rezultati so bili bistveno natančnejši, vendar še vedno ne dovolj za popolnoma precizno sledenje robotu. Za izboljšanje merilnega sistema smo se odločili za uporabo 3-osnega pospeškomera ADXL358 in razvili lasten PCB za boljše filtriranje in obdelavo signalov. Kljub temu smo ugotovili, da bi bilo za natančne rezultate potrebno združevanje senzorjev, kot so žiroskopi in magnetometri, kar omogoča natančnejše spremljanje orientacije, hitrosti in gibanja objekta. Senzorska fuzija bi bila tako najboljša metoda za pridobivanje zanesljivih in natančnih informacij, kar je ključno za natančno sledenje trajektoriji robota.

1 Uvod

Senzorji so hrupni, svet pa poln podatkov in fenomenov, ki jih želimo meriti in spremljati, vendar kmalu ugotovimo, da od senzorjev ne moremo pričakovati, da so sami po sebi odraz realnega stanja nekega sistema. GPS na uri mi poroča o nadmorski višini, vendar vsakič, ko grem na isto točko, poroča nekoliko drugačno nadmorsko višino. Kuhinjska tehtnica mi pokaže različne vrednosti, če dvakrat stehtam isti predmet. Hitro pridemo do ugotovitve, da lahko mi, kot poznavalci dinamskega sistema, doprinesemo k natančnosti hrupnega senzorja in surove podatke preoblikujemo nam v prid. MEMS pospeškomeri so postali ključna komponenta v sodobni robotiki. Zaradi svoje majhnosti, nizke cene in visoke natančnosti so široko uporabljeni za merjenje pospeškov in obravnavanja gibanja ter posledične navigacije in stabilizacije robota, prav tako kot številni drugi senzorji pa so zelo hrupni, zato se poleg njih uporabljajo številne metode filtriranja. Verjetno najpomembnejši sklep, ki se pojavlja skozi celotno delo je ta, da

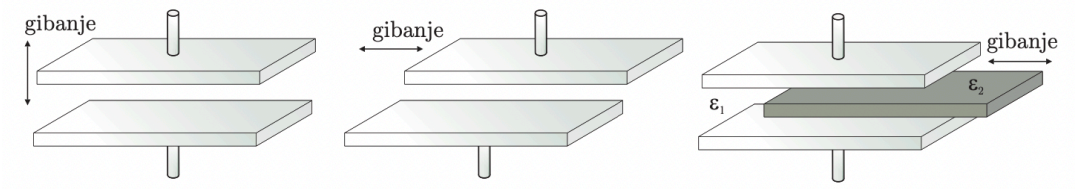
podatkov nikoli ne zavržemo, ne glede na njihovo napako, saj nam vsak podatek lahko na nek način pomaga.

2 Metode dela in potek raziskave

2.1 MEMS pospeškomeri

2.1.1 Delovanje MEMS pospeškomerov

Kondenzator v pospeškomeru spreminja kapacitivnost zaradi pomika kondenzatorskih plošč ali pa zaradi pomika dielektrične snovi. Sprememba kapacitivnosti se tako pretvori v električni signal, ki je sorazmeren z dejanskim pospeškom. (Slika 1)



Slika 1: Spreminjanje kapacitivnosti kondenzatorja, [5]

Za preprost paralelni kondenzator se kapacitivnost izračuna po enačbi:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A_c}{d_c} \quad (1)$$

ε_0 *je dielektrična konstanta praznega prostora,* ε_r *relativna dielektrična konstanta snovi,* d_c *je razdalja med kondenzatorskima ploščama,* A_c *pa njuna površina.*

2.1.2 ADXL203EB

Svoje raziskave sem začel z ADXL203 2-osnim pospeškomerom, pri čemer sem 0-g vrednosti osi določil tako, da sem pospešek obrnil na način, da je celoten gravitacijski pospešek kazal skozi obravnavano os in ga kalibriral, dokler nisem prišel do vrednosti 1g za obravnavano os in 0g za ostali osi. Ob prvih preizkusih z ADXL203 pospeškomerom sem prišel do ugotovitve, da so surovi podatki, ki sem jih s pomočjo Arduina bral iz senzorja, sami po sebi popolonoma neuporabni za natančno obravnavo robota. Glede na to, da sem po številnih meritvah dobil različne rezultate, sem sklepal, da se mora realna vrednost nahajati nekje med največjo in najmanjšo vrednostjo. Ta koncept je v matematiki formaliziran kot pričakovana vrednost. Hotel pa sem upoštevati tudi dejstvo, da mora moje znanje o dinamskem sistemu, ki ga obravnavam, nekako imeti vpliv na končne vrednosti, ki jih bom interpretiral kot pravilne. Realna vrednost naj se zato nahaja med izmerjeno in pričakovano vrednostjo. Če sem imel na začetku dve meritvi, zdaj pa eno meritev in eno pričakovano vrednost, je ostal moj sklep enak in skozi celotno reziskavo sem se držal dejstva, da nikoli ne zavržem podatkov, ne glede na njihovo napako. Kalmanov filter sem implementiral na podlagi Bayesove verjetnosti in intuicije o tem, kako bi povezal moje podatke, ki imajo različno stopnjo verjetnosti. Novo pričakovano vrednost stanja sem tako dobil z združevanjem prejšnje meritve in prejšnje pričakovane vrednosti. Maloverjetno je, da se rešitev nahaja na čisti sredini med meritvijo in pričakovano vrednostjo,

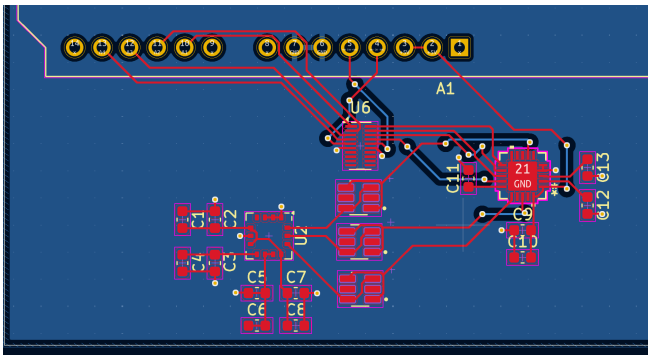
zato sem moral vsakemu podatku dati primerno utež. Kalmanov filter na ta način v fazi napovedovanja predvideva prihodnje stanje sistema, medtem ko v fazi posodabljanja popravi napovedi z novimi meritvami. Surove podatke, ki sem jih bral iz Arduina, s katerim sem pospeškomer napajal, sem na ta način numerično obravnaval v okolju Python. Pospeške sem dvakrat numerično integriral z numerično metodo Runge Kutta 4. reda in jih filtriral s Kalmanovim in nizkoprepustnim filtrom. Pri meritvah je bila uporabljena merilna kartica National Instruments 9215.

2.1.3 Dytran 7533A4

Zaradi številnih omejitev 2-osnega pospeškomera kot so nenatančnost in merjenje samo v dveh dimenzijah, sem se odločil, da poskus ponovim še s 3-osnim pospeškomerom Dytran 7533A4. Prav tako kot ADXL203 je Dytran 7533A4 kapacitivnostni MEMS pospeškomer, ki je bolj robusten in primeren za visoko natančnost meritev. Ima širok frekvenčni odziv in je tako primeren za merjenje visokofrekvenčnih vibracij. Primernejši je za industrijske aplikacije, kjer so potrebne natančne meritve vibracij in dinamičnih sil. Ima boljšo odpornost na okoljske vplive. Pri meritvah je bila uporabljena merilna kartica National Instruments 9215, razlika pa je bila v uporabljenemu pospeškomeru in napajanju pospeškomera. V primeru ADXL203EB je bilo napajanje pospeškomera izvedeno z Arduinom, v primeru Dytran pospeškomera pa z namenskim vezjem in 9V baterijo. Za filtriranje in druge numerične operacije v okolju Python sem uporabil enake metode, kot za ADXL203, vendar prišel do veliko natančnejših rezultatov.

2.2 Senzorska fuzija

Zaradi nenatančnosti dvoosnega pospeškomera in želji, da vseeno uporabim ADXL pospeškomer zaradi nizkih stroškov, majhnosti in nizke porabe energije, sem se odločil, da bom merilni sistem izboljšal in vzel ADXL358 za svoj 3-osni pospeškomer. Hotel pa sem optimizirati tudi velikost in robustnost samega merilnika, zato sem zasnoval svoj PCB (Slika 2), ki je vseboval ADXL358 pospeškomer, AD7682BCP za analogno-digitalni pretvornik, TXB0108DQSR za osemkanalni dvosmerni pretvornik logičnih nivojev ter druge elemente kot so ojačevalniki in kondenzatorji. Moj namen je bil uporabiti več takih PCB-jev in z metodo združevanja senzorjev dobiti natančne meritve s čim manjšim šumom.

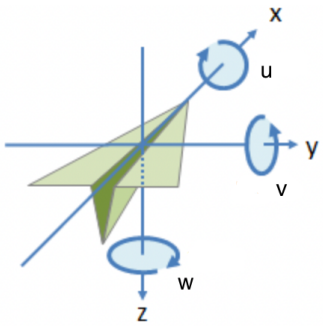


Slika 2: Footprint PCB designa za ADXL358

Po oddanem povpraševanju za PCB in različnih ponudbah, sem se odločil, da združevanje številnih takih PCB-jev nima smisla, saj bi za natančne rezultate z danim pospeškomerom nujno potreboval še žiroskop. Prav to združevanje 3-osnega pospeškomera s 3-osnim žiroskopom je v praktičnih aplikacijah večinoma najboljši način pridobivanja natančnih podatkov. Senzorska fuzija je tehnika kombiniranja podatkov iz več senzorjev za pridobitev natančnejših in zanesljivejših informacij. Pri 3-osnem pospeškomeru in 3-osnem žiroskopu senzorska fuzija omogoča natančnejšo oceno orientacije, hitrosti in gibanja objekta. Pospeškomer tako meri pospešek v treh ortogonalnih oseh, kar omogoči tudi izračun nagiba in zasuka, ki sta dva izmed treh Eulerjevih kotov (Slika 3) glede na gravitacijo po sledečih formulah:

$$u = \tan^{-1}\left(\frac{a_y}{a_z}\right) \quad (2)$$

$$v = \sin^{-1}\left(\frac{a_x}{g}\right) \quad (3)$$

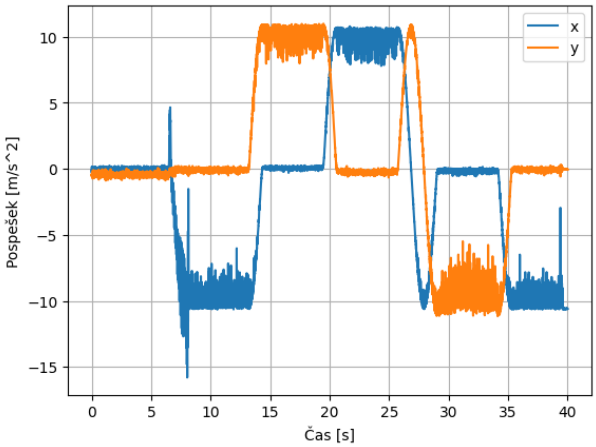


Slika 3: Eulerjevi koti, [4]

Žiroskop meri kotno hitrost okoli vsake od treh ortogonalnih osi in nam omogoča spremljanje sprememb orientacije skozi čas. Če potrebujemo natančno vedeti še tretji Eulerjev kot oziroma w, se velikokrat uporabi še magnetometer, ki zagotavlja absolutno referenco še za ta zasuk.

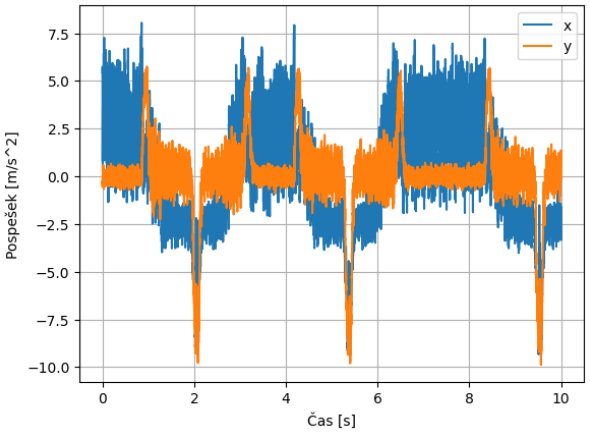
3 Rezultati

3.1 ADXL203

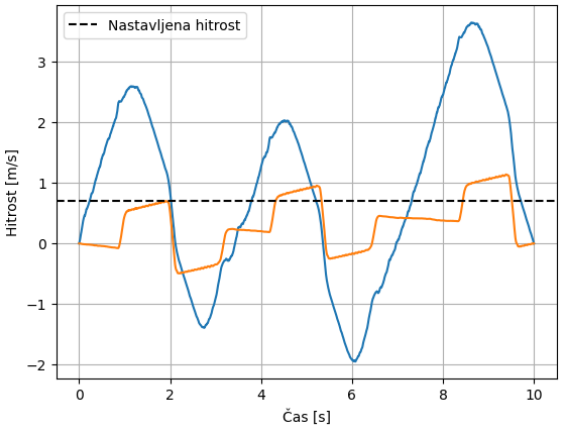


Slika 4: Kalibracija ADXL203 pospeškomera

Kalibracijo (Slika 4) sem izvedel tako, da sem pospeškomer za obravnavano os obrnil tako, da je skozi njo potekala celotna gravitacija in kalibriral, dokler nisem prišel do 1g za obravnavano os in 0g za drugo os. Kljub filtriranju je razvidna nenatančnost pospeškomera in velik šum signala.



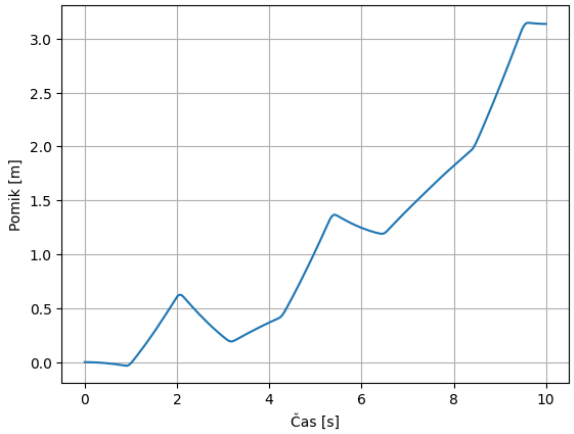
Slika 5: Pospeški ADXL203



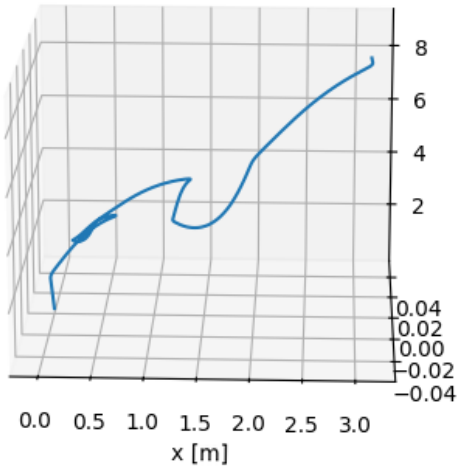
Slika 6: Hitrosti ADXL203

Ker je hitrost (Slika 6) integral pospeška (Slika 5), lezenje v meritvah pospeška povzroči kumulativno napako pri izračunu hitrosti kljub uporabi nizkopasovnega filtra. Majhno stalno odstopanje v pospešku tako vodi do nenehne spremembe hitrosti skozi čas, tudi če dejansko gibanje ne obstaja, zato je napaka vedno večja, vseeno pa se robot trudi ohranjati nastavljeno hitrost. Primerna bi bila vzpostavitev PID algoritma za korekcijo kumulativne napake. Integralna komponenta PID algoritma bi zmanjšala vpliv kumulativnih napak zaradi lezenja.

Derivativna komponenta bi pomagala stabilizirati sistem in preprečiti nihanje. Proporcionalna komponenta bi omogočila takojšnje prilagoditve, kar bi izboljšalo odzivnost sistema.



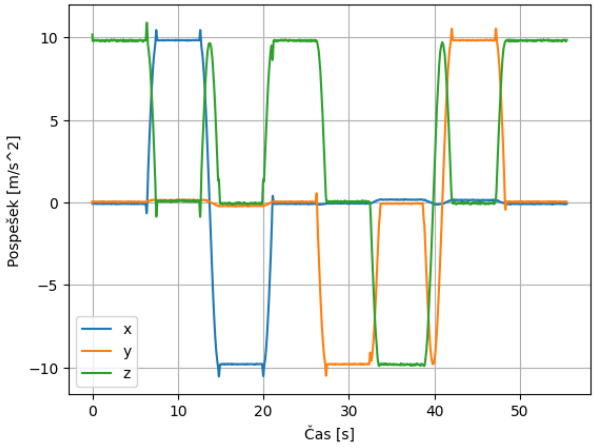
Slika 7: Pomik ADXL203



Slika 8: Opravljena trajektorija ADXL203

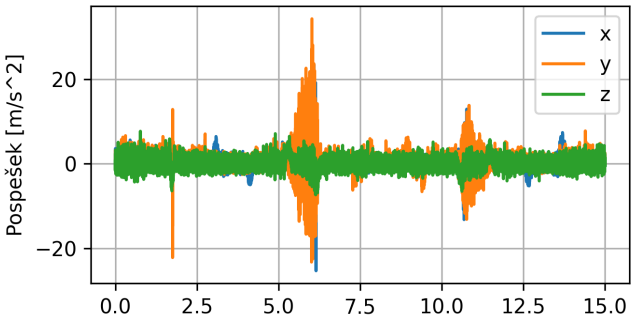
Ker je premik (Slika 7) integral hitrosti, napake v hitrosti povzročijo še večje napake v izračunu premika. Na dolgi rok majhno odstopanje v hitrosti povzroči znatne kumulativne napake v izračunani trajektoriji (Slika 8), ki se v tem primeru precej razlikuje od dejanske trajektorije, ki jo je opravil robot.

3.2 Dytran 7533A4

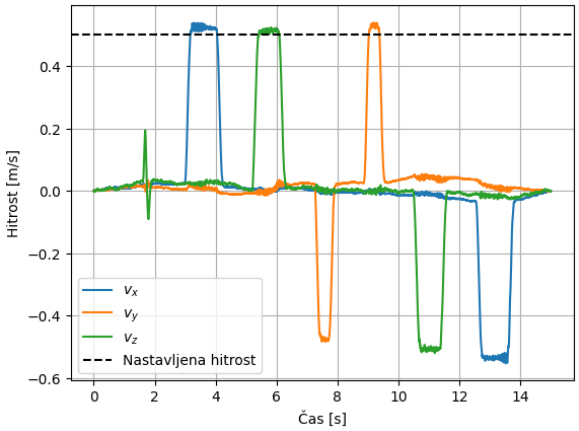


Slika 9: Kalibracija Dytran 7533A4

Kalibracijo (Slika 9) sem izvedel tako, da sem pospeškomer za obravnavano os obrnil tako, da je skozi njo potekala celotna gravitacija in kalibriral, dokler nisem prišel do 1g za obravnavano os in 0g za preostali osi. Rezultati so odlični, saj je po filtriranju prisoten minimalen šum.

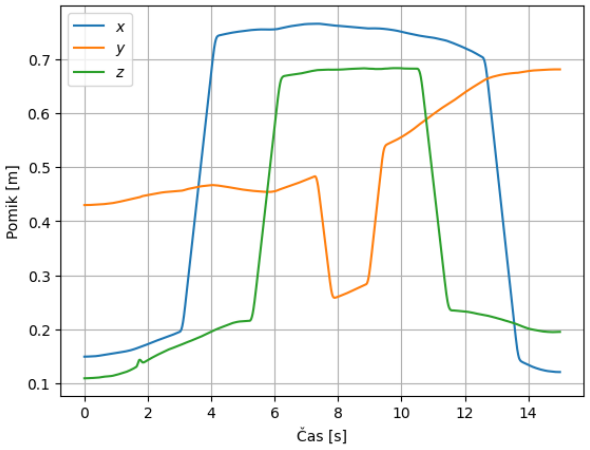


Slika 10: Pospešek Dytran 7533A4

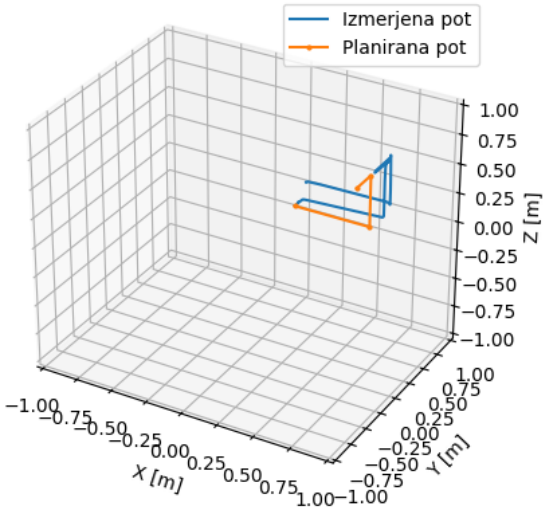


Slika 11: Hitrosti Dytran 7533A4

Ker je hitrost (Slika 11) integral pospeška (Slika 10), lezenje v meritvah pospeška ponovno povzroči majhno kumulativno napako pri izračunu hitrosti kljub uporabi nizkopasovnega filtra. Majhno stalno odstopanje v pospešku tako vodi do nenehne spremembe hitrosti skozi čas, tudi če dejansko gibanje ne obstaja. Rezultati se močno razlikujejo od ADXL203 pospeškomera zaradi nižje občutljivosti, vendar mnogo boljše natančnosti. Hitrost tako odstopi od 0 šele ob zadostni dinamski spremembi, vendar doseže točno nastavljeno hitrost robota.



Slika 12: Pomik Dytran 7533A4



Slika 13: Opravljena trajektorija Dytran 7533A4

Rezultati sledenja pomika robota (Slika 12), pridobljeni z uporabo pospeškomera, so pokazali visoko stopnjo natančnosti, kar je v veliki meri zadovoljivo za splošno spremljanje gibanja. Vendar pa je pri podrobni analizi postalo očitno, da trenutna raven natančnosti še vedno ni zadostna za diskretno beleženje dejanske trajektorije (Slika 13) z želeno ločljivostjo.

4 Zaključki

Senzorji so sami po sebi precej nenatančni in zato potrebujejo številne metode filtriranja za pridobitev dobrih rezultatov. Za najbolj uporabne sta se tako izkazala Kalmanov in nizkoprepustni filter. Meritve so dosledno reproducirale splošne značilnosti gibanja robota, vendar so odstopanja v določenih kritičnih točkah in med hitrimi spremembami smeri povzročila akumulacijo napak. Čeprav so pridobljeni podatki uporabni za grobo sledenje, niso dovolj natančni za aplikacije, ki zahtevajo visoko preciznost in diskretno beleženje poti robota. Za natančnejše rezultate bi morali izboljšati numerične metode integracije in uporabiti dodatne filtre ter senzorje. Komplementarno bi morali uporabiti fuzijo senzorjev z žiroskopom in magnetomerom za boljše korekcije in zmanjšanje napak, ki izhajajo iz posameznih senzorjev. Potrebovali bi izboljšane kalibracijske metode za odpravo offset napak in zmanjšanje vpliva lezenja. Ti pristopi skupaj ponujajo obetavne rešitve za izboljšanje natančnosti sledenja trajektoriji robota, kar bi omogočilo uporabo sistema v aplikacijah, ki zahtevajo visoko preciznost. Nadaljnje raziskave in razvoj v tej smeri so ključni za dosego teh ciljev.

5 Literatura

[1] Rlabbe, “Kalman-and-Bayesian-Filters-in-Python/04-One-Dimensional-Kalman-Filters.ipynb at master · rlabbe/Kalman-and-Bayesian-Filters-in-Python,” GitHub, 2024. https://github.com/rlabbe/Kalman-and-Bayesian-Filters-in-Python/blob/master/04-One-Dimensional-Kalman-Filters.ipynb (accessed Aug. 11, 2024).

[2] MEMS Accelerometers. MDPI, 2019. doi: https://doi.org/10.3390/books978-3-03897-415-4

[3] M. Benmessaoud and M. M. Nasreddine, “Optimization of MEMS capacitive accelerometer,” Microsystem Technologies, vol. 19, no. 5, pp. 713–720, Mar. 2013, doi: https://doi.org/10.1007/s00542-013-1741-z.

[4] “3D Rotations-Part 1,” danceswithcode.net. https://danceswithcode.net/engineeringnotes/rotations_in_3d/rotations_in_3d_part1.html

[5] J. Zumer, Karakterizacija kinematičnih parametrov sistema togih teles z uporabo inercijskih mikro-elektro-mehanskih sistemov, Ph.D. dissertation, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, Slovenija, 2012.

TUAREŠKI NOMADSKI NAČIN ŽIVLJENJA V PRAVNEM SISTEMU DRŽAV SEVERNE AFRIKE

Tereza Lombar in Mira Delavec Touhami

Povzetek

Preučevanje Tuaregov kot naroda, njihove identitete in razumevanje njihovega nomadskega načina življenja temelji na predpostavki, da so Tuaregi na osnovi zgodovinskih, jezikovnih in kulturnih dejstev narod, ki so jim bile odvzete številne pravice z vsiljenim nastankom novih držav sredi 20. stoletja v Severni Afriki. Vsiljen jim je bil tudi t. i. zahodni model demokratičnih držav, ki pa je drugačen od njihovega tisočletnega pravnega sistema. Posledično se zadnja leta konflikti na njihovem območju tako močno stopnjujejo in se vanj vpleta širša mednarodna skupnost, od posega NATO vojakov, skupine Wagner itd. Tuareška država Azawad, ki mednarodno ni priznana, je nastala leta 2012 na ozemlju Tuaregov. Pravico do samoodločbe MNLA (ang. The National Movement for the Liberation of Azawad) utemeljuje, da je država Mali nad njimi od leta 1960 izvajala grobe kršitve človekovih pravic, zaradi česar so bili primorani zapuščati svoje domove in se seliti tudi v sosednje države. Področje Tuaregov je s pravnega vidika zelo slabo preučeno v Evropi, saj na to temo ni bilo objavljenih raziskav in analiz v Evropi in posledično tudi v Sloveniji.

Ob naši analizi ustav držav, v katerih živijo Tuaregi, je bilo ugotovljeno, da je mednarodna praksa, zlasti tista, ki je bila pod vplivom neuvrščenih držav, šla po poti, da se dekolonizacija izvede kot uveljavljanje pravice do samoodločbe na temelju tistih entitet, ki so jih ustvarile kolonialne metropole. Uveljavljena praksa je prizadela tudi Tuarege nomade, saj so bile upoštevane meje nekdanjih kolonialnih enot. Afriške države so pričele uveljavljati pravico do samoodločbe pod vplivom dogajanj v Evropi, ko se je sprejelo stališče, da uresničevanje pravice do samoodločbe naroda ni samo dekolonizacija. Tuaregi so se tako našli na razpotju, medtem ko naše raziskovalno delo želi podati konkretne rešitve za nastalo problematiko in tako pomagati pri vzpostavitvi trajnega miru na tem območju.

1 Uvod

V puščavskem delu severne Afrike, na ozemlju, ki obsega toliko ozemlja, kot če bi skupaj dali skoraj 440 Slovenij, kjer ne moremo videti obzorja, živijo puščavski prebivalci z imenom Tuaregi. Sami sebe v svojem jeziku (tamašku) imenujejo Imuhar, kar pomeni svobodni plemeniti ljudje in pravijo, da so jim ime Tuaregi nadeli Arabci, ko so jih nasilno islamizirali okrog 8. stoletja. Ne želijo nikoli slišati, da so berberi, kar v njihovem jeziku pomeni nekoga, ki je nasilen in divji. Sebe opisujejo kot edine prave poznavalce Sahare in skrivnostne jezdece v puščavi ter modre može (zaradi oblek v indigo modri barvi). Skozi zgodovino so se Tuaregi opisovali vedno kot svobodni, plemeniti in neodvisni ljudje. [1] Danes živijo na jugu Alžirije, Libije, na severu Malija, Nigra in Burkine Faso. Na severu Malija naj bi jih živelo 1. 450.000, v Nigru 1.790.000, na jugu Alžirije 825.000, na jugu

Libije 620.000 in v Burkini Faso 330.000. Tako naj bi jih skupaj na ozemlju teh držav živelo približno 5.015.000. [2] S Tuaregi smo se prvič srečali leta 2004 na eni izmed osebnih humanitarnih odprav v Saharo in od takrat so postali področje našega znanstvenega raziskovanja, tako v zgodovinskem, socialno-antropološkem, pravnem, literarnem in jezikoslovnem pogledu. Z njimi smo povezani tudi v osebnem življenju.

Tuaregi so stoletja živeli revno nomadsko življenje, medtem ko je danes ohranjen manjši del plemenskih skupin, ki živijo življenje v puščavi – ali v tenere, kot jo imenujejo. Beseda tenere pomeni dežela tam zunaj, lahko tudi izgubljeni raj. Posebnost Tuaregov je, da so stoletja živeli skupaj s puščavo – so nomadi, ki so se zbujali s soncem in odhajali spat z luno. Zbirali so se okrog ognja, ki jih je grel v mrzlih zimskih večerih. Ob njem so si izmenjali vsakdanje informacije in z njegovo pomočjo so spekli kozo ter skuhali tuareški čaj. V svojem srcu so do današnjih dni ti nomadi ostali zelo preprosti, saj še vedno živijo v skladu z zakoni narave, ne načrtujejo svoje prihodnosti, temveč živijo za sedanjost in molijo za zdravje svojih otrok in starejših ljudi. [3]

Oznaka Tuareg naj bi domnevno izhajal iz 8. stoletja našega štetja. Beseda Tuareg naj bi izvirala iz arabskega korena terek, kar v prevodu pomeni zapuščen, pozabljen, zato so na osnovi tega Arabci Tuarege označili za »pozabljene od Boga«, saj so njihovo vero islam prevzeli šele ob islamizaciji njihovega ozemlja in še to ne v celoti. [4] Ta izraz je v svojih zapisih prvič omenjal arabski zgodovinar Ibn Khaldun (1332–1406). [5]

Problemi, s katerimi se srečujejo Tuaregi nomadi, izvirajo iz časa kolonizacije, v začetku 20. stoletja. Stopnjevati pa so se začeli konec druge svetovne vojne, ko so bili razdeljeni med različne novo nastale države, in sicer med Mali, Libijo, Alžirijo, Niger in Burkino Faso, kar je njihovo situacijo še poslabšalo. Čeprav so bili stoletja edini pravi prebivalci saharskega prostora, ki so ga tako pravno kot gospodarsko obvladovali in bili v tem oziru povsem samostojni ali vsaj avtonomni, so po letu 1950 to pravico izgubili. Ob tem so postali oziroma niso postali državljani novonastalih držav. Velika večina med njimi nima namreč nobenih osebnih dokumentov, niti niso zavedeni kot državljani držav. [6] Rezultat njihovega slabega urejenega statusa so med njimi in političnimi voditelji držav, v katerih živijo, v zadnjih tridesetih in štiridesetih letih čedalje pogostejši spori, konflikti, ki so nekje prerasli v državljanske vojne, do tega, da se jih ne sprejema kot svojih državljanov, do zanikanja njihovega obstoja itd. Slednje lahko razberemo iz številnih poročil Združenih narodov, natančneje Agencije Združenih narodov za begunce (UNHCR).[7] Čedalje pogosteje so slišane zahteve po mednarodnem priznanju tuareške države Azawad, ki do sedaj ni bila priznana s strani mednarodne skupnosti. Za Tuarege je neodvisna država Azawad edina sprejemljiva državotvorna oblika, ki jo je 6. aprila 2012 enostransko razglasilo Narodno gibanje za osvoboditev Azawada (MNLA: fr. Mouvement National pour la Liberation de l´Azawad) skupaj z ostalimi tuareškimi odporniškimi gibanji. Azawad obsega območje, ki zavzema del Sahare in Sahela, med mesti Timbuktu, Kidal, Gao in Mopti – je območje, ki na severu meji na Alžirijo, na vzhodu na Niger, na zahodu na Mavretanijo. Ozemlje zaseda drugače mednarodno priznano državo Mali. Glavno mesto Azawada je mesto Gao, ki je tudi največjo mesto na tem območju. Ker je problem Tuaregov večplasten in trenutno povzroča številna trenja, upore in vojaške spopade na območje Sahare in Sahela, je raziskovalno delo (kljub znanju tamaška in arabščine) na to temo zelo zahtevno

in poleg tega strokovne oziroma znanstvene literature v Evropi na to temo praktično ni, razen antropoloških študij. [8] Prispevek bo skušal problem Tuaregov nomadov postaviti v povsem nov pogled v evropskem prostoru, saj je bila tema do sedaj v mednarodni skupnosti predstavljena predvsem z enega vidika, tj. antropološkega in s pomanjkljivim poznavanjem dejanskih političnih razmer na terenu. Ravno na primeru Tuaregov nomadov je razvidno, da se tudi po koncu imperializma Evropa v 21. stoletju ni umaknila iz Severne Afrike v celoti, ampak je še vedno, če ne neposredno, pa vsaj posredno prisotna v njej in s tem tudi na območju, kjer živijo Tuaregi nomadi.

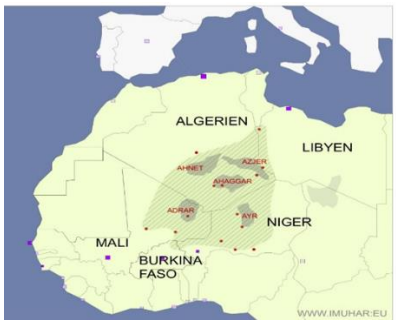
2 METODE DELA IN POTEK RAZISKAVE

2.1. Namen raziskave

Glavno znanstveno vprašanje je, na kakšen način in v kakšni meri se tuareško nomadsko življenje upošteva v pravnem sistemu novo nastalih držav v šestdesetih letih prejšnjega stoletja. Ob tem se zastavlja vprašanje, kako so v ustavah držav, v katerih živijo Tuaregi, zapisane njihove pravice, če sploh so, in kako se to vpliva na politično (ne)stabilnost celotne regije in posredno na dogajanje v Evropi dandanes.

2.2. Tuaregi nomadi in njihov položaj v ustavah držav, v katere so vključeni

Tuaregi živijo v osrednjih saharskih gorovjih Tassili-n-Ajjer, Hoggar ali Ahaggar, Air in Adrar-n-Inforas (Slika 1).[9] Največ nomadskih skupnosti danes srečamo na severu Nigra, jugu Alžirije in Libije ter severu Malija.



Slika 1: Ozemlje, ki ga naseljujejo Tuaregi (vir: osebni arhiv).

Tuaregi nomadi so od nekdaj živeli v tradicionalnih tuareških sorodstvenih skupinah – klanih, kjer so bile v ospredju endogamne poroke, v katerih so prednostne poročne partnerje moških predstavljale sestrične po materini liniji (hči materinega brata). Tudi najpomembnejši gospodarski resorji in politične pozicije so se prenašale matrilinearno, znotraj materine sorodstvene linije. Več klanov skupaj je tvorilo svojo teritorialno celoto, ki so jo imenovali tavsit, ki ji je načeloval poglavar, a njegova moč je bila omejena. Različni tavsiti so se združevali v zgoraj navedeno federacijo (tuareško imenan). Na takšen način so (bili) vsi prebivalci posameznih regij, ne glede na različno klansko pripadnost ali socialni položaj, povezani v federacijo, ki ji je načeloval poglavar plemiškega rodu in so ga

imenovali amenukal (kralj). Izbrali so ga predstavniki plemiške kasta in podložniki. Njegov položaj ni bil deden in ne doživljenjski.[10] S kolonizacijo je bila Tuaregom odvzeta politična moč, kar je privedlo tudi do številnih sprememb v njihovem življenju. Francozi so postali pravno in formalno gospodarji njihovega ozemlja. To kolonialno posest so Francozi pridobili na berlinski konferenci evropskih narodov (1884–1885). Slednja je bila uradno sklicana sicer v želji po odpravi suženjstva, v resnici pa je šlo na njej za razdelitev Afrike, poimenovali pa so jo kot »pohod civilizacije«. [11] Med njo so tako spadali tudi Tuaregi, saj so veljali za neukrotljive puščavske nomade. Libijsko-alžirsko-malijsko-nigrsko obmejno območje je naravni prostor Tuaregov nomadov, tudi prostor njihove mobilnosti in bivanja. Odkar so bili z novimi mejami držav razdeljeni in njihova svobodna možnost prehajanja meja ni bila več mogoča, saj je še bolj okrepila njihova nacionalna ideja in pripadnost. Selitve so nujne zaradi njihovega načina življenja, ki jim hkrati omogoča tudi mobilnost.

Na osnovi analiz terenskega dela, v katerem smo združili pogovore s Tuaregi nomadi, smo izluščili sledeča pravila ašaka oziroma tuareškega kodeksa, ki predstavlja njihov notranji pravi red oziroma t. i. tuareško ustavo:

1. Spoštovanje dogovorov in obljub
2. Spoštovanje zakona narave
3. Spoštovanje amenukala – voditelja
4. Spoštovanje žensk
5. Spoštovanje tradicije nomadskega načina življenja
6. Zaščita in spoštovanje tujcev
7. Spoštovanje staršev
8. Spoštovanje časti in dostojanstva človeka
9. Zaščita vasi / bivališča
10. Spoštovanje kamele
11. Spoštovanje duha prednikov
12. Spoštovanje skrivnosti

Tuaregi nomadi so bili stoletja ves čas na poti, saj so nadzorovali saharske karavanske poti. Trgovina z Libijo je tako potekala vse do konca 19. stoletja skozi mesta Tripoli, Ghat, Gadames, naprej skozi Djanet v Alžiriji in Agadez v Nigru. Po pripovedovanju enega najstarejših voditeljev karavan iz Kel Wedigi so karavane v tem obdobju štele od štiristo do osemsto kamel, ki so jih zbrali znotraj sorodstva. Te karavane so med septembrom in marcem tovorile blago med Kanom v Nigeriji in Sebho v Libiji za stalne trgovce iz Libije. Tuareška kolonialna mobilnost je bila tako ciklična in vezana izključno na moške. [12] Del njihovega življenja so tudi čedalje bolj izrazite naravne katastrofe. Zaradi suše na severu Nigra so izgubili od 75 do 95 odstotkov čred. Kot posledica je nastopila lakota, kateri pa mednarodne humanitarne akcije ne posvečajo večje pozornosti. Tuarege so postali v vseh novo nastalih državah stigmatizirane manjšine. Nekdanji nigrski predsednik Diorij je v državi prepovedal uporabo celo uporabo besede nomad. [13] Zadeva pa se je stopnjevala do te mere, da se je vlada v Nigru leta 1974 določila, da se tuareškim otrokom, ki so bili rojeni v begunstvu, zanika državljanstvo, ker niso bili rojeni na njenem ozemlju. Zlasti

Niger in Mali sta bila v odnosu do Tuaregov neizprosna: »saj so režimi obeh držav že leta izvajali genocid proti prebivalcem Tuaregom in za katerega se zdi, da si ves svet zatiska oči. Tragedija Tuaregov ni bila prednostna naloga svetovnih vlad zgolj zato, ker gre za počasen razvoj dogodkov. Tuaregi so ves čas predmet sistematičnih represij in pobojev.« [14]

3. Rezultati

Za razumevanje položaja, v katerem so se znašli Tuaregi in posredno celotna Severna Afrika, je izjemno pomembno poznavanje ustav držav, v katerih živijo. Pri tem nam je bilo v pomoč primerjalno ustavno pravo, s pomočjo katerega smo skušali ugotoviti povezave in razlike med ustavnimi sistemi držav Severne Afrike. Naš namen je, da bi na osnovi te analize prišli do ugotovitev in predlogov, ki bi lahko izboljšali položaj Tuaregov v sami regiji in tudi v okviru nacionalnih držav. Tako kot za ostale ustave, velja tudi za ustave držav Severne Afrike (Alžirije, Libije, Nigra, Malija in Burkine Faso) [15], da se spreminjajo. Za večino lahko tudi trdimo, da so nastale pod vplivom drugih držav. Zlasti to velja za ustave Maroka, Malija, Nigra in Alžirije, kjer je prisoten posredno ali neposredno vpliv Francije, ki je predstavnica klasičnega konstitucionalizma. Ker gre za države, ki so nastale po drugi svetovni vojni in niso imele neposrednih izkušenj z oblikovanjem ustav, je zanje značilno, da so privzeli določena načela iz mednarodnih dokumentov, s čimer so se tudi bolj približali ostalim svetovnim državam. [16] Osredotočili smo se na t. i. pisane ustave. Ustave so namreč kodeksi norm, katerih namen je urejati razporeditev oblasti, funkcij in dolžnosti med različnimi organi oblasti ter definirati razmerja med njimi in javnostjo. Glede na navedeno v ustavah so države dolžne zagotoviti, da se z domorodnimi prebivalci ustrezno posvetujejo o zadevah, ki vplivajo ali bi lahko vplivale na njihovo kulturno in družbeno življenje, v skladu z njihovimi vrednotami, tradicijami, običaji in oblikami organizacije. Država mora zagotoviti učinkovita pravna sredstva za osebe, ki trdijo, da so žrtve kršitev človekovih pravic. Ta pravna sredstva morajo biti utemeljena v skladu s pravili pravnega postopka. Poleg tega je v zvezi z domorodnimi prebivalci, kamor sodijo Tuaregi nomadi, bistveno, da države odobrijo učinkovito zaščito, ki upošteva posebne značilnosti domorodnih ljudstev, njihove gospodarske in socialne značilnosti, njihovo posebno ranljivost in njihovo običajno pravo, vrednote, prakse in običaje. Ugotovili smo, da je za države Severne Afrike ključno, da ne prikazujejo politične realnosti države same in tudi njenih državljanov. Problem je tudi, da se od leta 2011, ko se je začela t. i. arabska pomlad, razmere v teh državah spreminjajo izredno hitro, kar pomeni, da ustave same ne zagotavljajo in tudi ne prikazujejo več aktualnega političnega stanja.

Del našega preučevanja ustav je bil umerjen na Tuarege, in sicer nas je zanimalo:

- ali so Tuaregi v ustavah navedeni kot manjšina;
- je njihov jezik tamahak priznan kot uradni ali kot jezik manjšine;
- imajo pravico, da uživajo lastno kulturo;
- imajo kot avtohtoni prebivalci socialne pravice;
- imajo pravico do samoodločbe;

- imajo pravico do svojega ozemlja.

Skozi preučevanje ustav navedenih držav smo ugotovili, da jim je skupno sledeče:

- Tuaregov ne priznavajo kot naroda in njihove pravice do samoodločbe.
- Ne priznavajo jih kot avtohtone prebivalce.
- Dejansko stanje poročil OZN kažejo na hude kršitve človekovih pravic vlad držav nad Tuaregi, kar sproža konflikte v regiji in je pripeljejo tudi do oboroženih uporov Tuaregov v Maliju in Nigru.
- Tamahak je kot jezik naveden zgolj v alžirski ustavi, medtem ko ga ostale države ne navajajo.
- Če so pravice Tuaregov kot državljanov teh držav posredno vključene v ustave, še ne pomeni, da se v praksi izvajajo (v celoti ali samo delno), saj so zaradi načina življenja Tuaregov te »dobrine« (npr. zdravstvo, šolanje, socialna varnost itd.) njim veliko težje ali pa skoraj nedostopne. Vsekakor pa jim niso dostopne v enaki obliki kot ostalim državljanom.

4. Zaključek

Ob preučevanju ustavnega sistema arabskih držav v Severni Afriki, v katerih živijo Tuaregi nomadi, se je izkazalo, da je ustava zgolj model na papirju, ki v realnem svetu ne deluje ali pa v zelo okrnjeni obliki. V zadnjih štiridesetih letih so tako številni voditelji z okrepitvijo vloge islamskega prava odvzeli posredno vlogo demokratičnosti, ustavo so negirali in s tem zatirali voljo drugih narodov, med njimi tudi Tuaregov nomadov, ki so zahtevali svojo avtonomijo. Kot omenjeno, nobena od ustav držav Severne Afrike ne opisuje posebej pravic avtohtonih ljudstev, kamor sodijo tudi Tuaregi nomadi. Če bi jih, bi bila to že prva rešitev nastalega problema. Strinjamo s Kamelom Rezagom Baro, predstavnikom African Commission on Human and Peoples` Rights, da je želja po prevladi nacionalne avtoritete znotraj države uničila tradicionalno, kar je povzročilo posredno odpor in spopade ter razkroj tudi znotraj lokalnih skupnosti.[17] Zelo pomembno je namreč, da bi moral državni aparat upoštevati potrebe tradicionalnih oziroma lokalnih kultur in ljudi, ki tvorijo celoto določene države. Tuaregi so bili v Maliju namreč že leta 1994 sicer priznani kot manjšina in tudi hkrati kot avtohtoni prebivalci, kar je poudaril tudi Khattali Mhamed Ag Mohamed Ahmed na konferenci v Kidalu 2001, vendar je bila vsaka njihova zahteva po notranji avtonomiji v vseh teh letih s strani vlad v Maliju zavrnjena. Proces demokratizacije pomeni v teh državah večjo moč in uveljavitev islamskega prava in jih ne moremo primerjati s procesom razvoja demokracije po vzoru evropskega modela. Kar vpliva na razvoj dogodkov je tudi vloga islamske države, ki po mnenju številnih, še zdaleč ni zaključen. Ravno zaradi nestabilnosti v regiji, slednja pridobiva svojo moč in vpliv v Libiji, na severu Malija in Nigra. Pri tem se opirajo na delo Abuja Bakra Najia z naslovom Upravljanje barbarstva (v arabščini: Idarat al-tawahhush). Gre za Egipčana in vojaškega stratega pri Al-Qaidi, ki je razvil deset tez, v katerih je opisal, kako naj bi deloval terorizem in z njim povezan kaos, kako izkoristiti šibkosti nasprotnikov in na osnovi tega zgraditi islamsko državo. Zaključi s tezo, da je najslabša raven barbarstva boljša od brezbožnega režima. [18]

Evropa je šla preko sekularizacije in jo je izpeljala, medtem ko Severna Afrika in ostali arabski svet sekularizacije ni izpeljal. Ravno sekularizacija pa je imela pomembno vlogo pri vzpostavitvi identitete narodov in s tem tudi nacionalizma. To se domnevno v Severni Afriki ne bo zgodilo v takšni obliki, saj je islam del tradicije, del običajev, del prava in del vsakdana, pomemben del kolektivne zavesti. Nastajajo nove ustave oziroma njihove prenove in islam je pomemben del teh pogovorov. Rešitev problemov z uresničevanjem izvajanja ustave bi bila samo v primeru, da bi imele vse skupnosti enake pravice. Dokler se to ne bo uredilo, ne bo moglo priti do mirne rešitve spora, ki je prisoten že dolgo časa v tem prostoru. V mednarodnem prostoru Tuaregi nomadi žal nimajo sogovornikov, ki bi znali prisluhniti njihovim predlogom. Na številnih mednarodnih konferencah so bile v ospredje namreč vedno postavljene zahteve držav, v katerih živimo Tuaregi, in ne predlogi narodov, ki sobivajo skupaj znotraj teh držav in tukaj se kaže ena izmed rešitev problema. Posledično tudi ustave držav Severne Afrike, v katerih živijo Tuaregi, ne upoštevajo slednjih v ustavnih besedilih, kar je vzpodbudilo v realnosti veliko nezadovoljstvo Tuaregov, ki je prerasla v upore in se je v zadnjih letih še stopnjevalo. Nastanek države Azawad je migracijske tokove znotraj Severne Afrike samo še povečal.

Rešitev nastalih problemov je naprej vidna v tem, da se Tuaregom prizna pravice kot narodu in se le-te v celoti zapišejo v ustave držav, pri čemer se mora zapisano tudi realizirati. Pri tem je ključni člen, ki bi ga bilo treba upoštevati, da se na ozemljih, kjer živijo vpelje učni jezik tamašak. Tuareška zahteva po notranji samoodločbi je naslednja smiselna rešitev problema, saj izhaja predvsem iz tega, da želijo ohraniti svoj naravni habitat, se vrniti nazaj na svoja ozemlja, od koder so bili v zadnjih petdesetih letih pregnani, in želijo, da ponovno lahko nadzirajo lastno usodo kot narod. Razglasitev države Azawad tako predstavniki tuareške države Azawad razlagajo kot zadnji izhod, ki so ga uporabili, saj so kljub želji, da ne bi prišlo do oboroženih uporov v regiji, bili v to prisiljeni zaradi dolgoletnega nasilja malijske vojske in oblasti nad Tuaregi. Za celotno regijo, stabilnost Evrope in svetovni mir bi bila zelo pomembna stabilnost, katere del predstavlja tudi rešitev tuareškega vprašanja, ki traja že predolgo in postavlja čedalje bolj zapleteno.

5 Literatura

[1], [2], [3] M. Delavec Touhami M. Taraut en tenere: Hči puščave. Mače pri Preddvoru, KD Josipine Turnograjske, 2014, str. 8.

[4] A. Duveyrier. Les touareg du Nord: exploration du Sahara (Sciences Sociales). Hachette Livre BNF; 1864, str. 317.

[5], [6] D. Casajus, D. (1987). Crafts and ceremonies: the Inadan in Tuareg society. V: Aparna Rao (ur.). The Other Normads. Peripatetic Minorities in Cross-cultural Perspective, Köln, Wien: Boehalu Verlag, 2000, str. 19.

[7] B. Ntwari. Tuareg refugees in Niger herd their livestock to safety, UNHCR, 7. 3. 2013, URL: https://www.unhcr.org/news/latest/2013/5/518907756/tuareg-refugees-niger-herd-livestock-safety.html, 25. 5. 2024.

[8], [9] A. Dragani, A. The past of dreams: gender, memory and Tuareg oneiric inspiration, Africa, Vol. 88, št. 1, Februar 2018, pp. 122–137.

[10] E. Bernius, E. (1981). Touaregs nigériens: Unité culturelle et diversité régionale d'un peuple pasteur. Paris: Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre Mer, 1981, pp 83.

[11] P. Manning. Francophone Sub-Saharan Africa 1880-1995. Cambridge [etc.]: Cambridge University Press, 1998, pp. 28.

[12], [13] B. Brumen, B. (2004). Migracije nigrskih Tuaregov v Libijo. Časopis za kritiko znanosti, let. 32, Vol. 217/218, 2004, str. 237–253.

[14 J. Keenan. The Tuareg. People of Ahaggar. London: Allen Lane, 193, pp. 360.

[15] Ustave držav:
Algeria`s Constitution of 1989, with Amendments through 2016, URL: https://www.constituteproject.org/constitution/Algeria_2016?lang=en, 10. 6. 2024.
Burkina Faso Constitution, 1991, rev. 2015, URL:
https://www.constituteproject.org/constitution/Burkina_Faso_2015?lang=en, 18. 6. 2024.
Libya Constitution, 2011, wirh Amendments through 2012,
URL: https://www.constituteproject.org/constitution/Libya_2012?lang=en, 11. 6. 2024.
Mali Constitution, 1992,
URL: https://www.constituteproject.org/constitution/Mali_1992?lang=en, 11. 6. 2024.
Niger Constitution, 2010, with Amendments through 2017,
URL: https://www.constituteproject.org/constitution/Niger_2017?lang=en, 11. 6. 2024

[16] Mavčič. Primerjalno-ustavno pravo – pravo človekovih pravic. Ljubljana: Pasadena, 2002, str. 6–9.

[17] United Nations, Commission on Human Rights, E/CN.4/Sub.2/AC.5/2001/3, str. 7.

[18] R. Hermann R. Im Gepräch: Der islamische Theologe Ahmad Nofal über Demokratie und Wahnsinn in der arabischen Welt, Frankfurter Allgemeine Zeitung, 3. 1. 2017, URL: https://www.genios.de/presse-archiv/artikel/FAZ/20170103/im-gespraech-der-islamische-theolog/FR1201701035031947.html, 14. 6. 2024.

RAZISKAVA PRIMERNOSTI ULTRAZVOČNEGA RESONANČNEGA PIEZOELEKTRIČNEGA AKTUATORJA ZA IMPULZNO VZBUJANJE V STRUKTURNI DINAMIKI

Matej Markuža, Miha Pogačar, Gregor Čepon

Povzetek

Za vzbujanje struktur pri eksperimentalni modalni analizi običajno uporabljamo ročno vodena modalna kladiva, s katerimi izvajamo nadzorovano vzbujanje v obliki impulza sile. Zaradi ročnega vodenja pri izvedbi prihaja do omejene ponovljivosti lokacije, smeri in amplitude vnesenega impulza sile. Kot alternativo se zato v praksi vse pogosteje pojavljajo avtomatizirana modalna kladiva. V tej raziskavi smo testirali primernost ultrazvočnega resonančnega piezoelektričnega aktuatorja za izvedbo avtomatiziranega impulznega vzbujanja. Primerjali smo ga z obstoječo rešitvijo avtomatskega modalnega kladiva AM impact, razvitega na Tehniški univerzi v Münchnu. Primerjavo smo izvedli na osnovi merjenega poteka sile v odvisnosti od časa za primer udarca v togo telo. Na osnovi izmerjenih časovnih vrst smo določili amplitudo in dolžino pulza, na osnovi Fourierove transformacije pa ocenili še frekvenčni razpon vzbujanja. Rezultati kažejo, da sta impulza obeh izvedb avtomatiziranega impulznega vzbujanja primerljiva. S posnetkom s hitro kamero smo potrdili, da je ob prožitvi aktuatorjev prišlo do enkratnega trka z merjencem. Pokazali smo, da je z dobro optimiziranimi parametri predlagani aktuator primerna alternativa za izvedbo impulznega vzbujanja v strukturni dinamiki.

1 Uvod

V industriji je opazna težnja po zmanjšanju hrupa in vibracij izdelkov, ki so neposredno povezani z dinamičnimi lastnostmi izdelka. Te lastnosti pogosto vrednotimo eksperimentalno s postopkom modalne analize, ki vključuje nadzorovano vzbujanje sistema in merjenje njegovega odziva. Za nadzorovano vzbujanje pogosto uporabljamo modalno kladivo, ki ima na konici nameščeno zaznavalo sile. Pri ročnem vodenju kladiva je prisotnih veliko negotovosti. Posamezni udarci se razlikujejo glede na lokacijo in amplitudo sile. Poleg tega se lahko znatno spreminja tudi orientacija kladiva in s tem smer aplicirane sile. Velik problem je tudi pojav večkratnih udarcev. Vse te pomanjkljivosti so motivacija za uporabo avtomatskih kladiv za vzbujanje [1].

1.1 Obstoječa tehnologija

Na trgu je na voljo več rešitev in konceptov avtomatiziranih modalnih kladiv. Delijo se na dve temeljni skupini: naprave z linearnim gibanjem in naprave z rotacijskim gibanjem [2].

Naprave z linearnim gibanjem uporabljajo solenoide za generacijo impulza. Ti delujejo na principu elektromagnetnih sil in magnetne indukcije. Kratek impulz toka premakne jedro naprej, za pomik nazaj pa je zadolžena vzmet. Primera takih kladiv sta vImpact-2001 podjetja Maul-Theet [3] in AM Impact, ki so ga razvili na Tehniški univerzi v Münchnu [1] (slika 1).



(a) *(b)*

Slika 1: Avtomatski modalni kladivi z linearnim gibanjem: (a) vImpact-2001 [3] in (b) AM Impact [1].

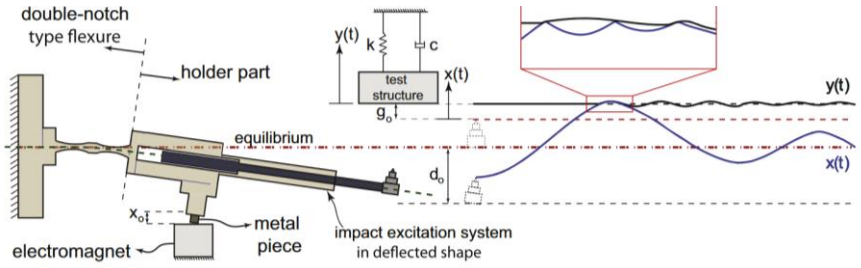
Naprave z rotacijskim gibanjem z elastično deformacijo ustvarijo impulz momenta in ga preko ročice pretvorijo v impulz sile. To dosežejo tako, da ročaj kladiva zaustavijo tik pred trkom, konec ročaja pa se zaradi vztrajnosti elastično deformira in trči ob material. S tem se izognejo večkratnemu udarcu, saj se po trku kladivo zaradi elastičnih sil odmakne od merjenca [1]. Primeri takih kladiv so vImpact-61 podjetja Maul-Theet [3] in SAM (ang. Scalable Automatic Modal Hammer) podjetja PolyTec [4] (slika 2).



(a) (b)

Slika 2: Avtomatski modalni kladivi z rotacijskim gibanjem: (a) vImpact-61 [3] in (b) SAM [4].

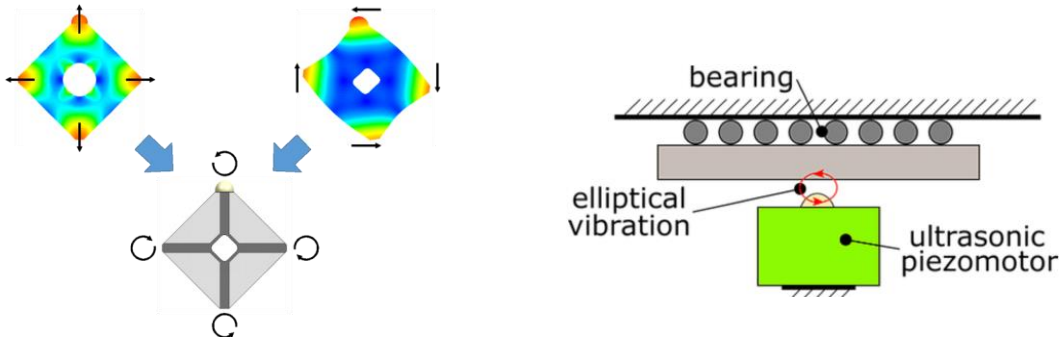
Poseben primer je še kladivo, opisano v [5], kjer elektromagnet odmakne kladivo iz ravnovesne lege in ga nato sprosti, to pa zaniha in udari v material (slika 3).



Slika 3: Poseben primer avtomatskega modalnega kladiva z rotacijskim gibanjem [5].

1.2 Xeryon ultrazvočni resonančni piezoelektrični aktuator

Ultrazvočni piezoelektrični aktuator s stoječim valovanjem deluje na osnovi dveh resonančnih načinov pri isti lastni frekvenci in ene kontaktne površine z drsnikom. Prvi resonančni način povzroča enakomerno radialno deformacijo piezo kristala, pri kateri kontaktna površina vibrira pravokotno na drsnik. Drugi resonančni način povzroča ravninsko ukrivljanje, pri katerem kontaktna površina vibrira vzporedno z drsnikom. S kombinacijo obeh resonančnih načinov se kontaktna točka kristala giblje po eliptični tirnici (slika 4). Pomik je pri tem gibanju zelo majhen – velikostnega reda 1 µm – vendar je frekvenca nihanja 166 kHz, kar omogoča hitrosti do 1000 mm/s. [6]

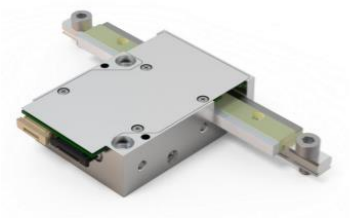


(a) (b)

Slika 4: Delovanje ultrasoničnega resonančnega piezo aktuatorja: (a) rezonančna načina, (b) premikanje drsnika

Taki aktuatorji so posledično zelo natančni in hitri, zato bi lahko bili primerni za izvedbo impulznega vzbujanja. Z natančnim nadzorom hitrosti in pomika bi lahko dosegli visoko natančnost amplitude vzbujanja. Možno pa je tudi, da za to aplikacijo ne bodo primerni, saj zaradi prednapetja kontaktne površine drsnik ni prosto gibajoč in ni še znano, ali lahko zagotovimo, da bo doveden impulz sile primerno hiter.

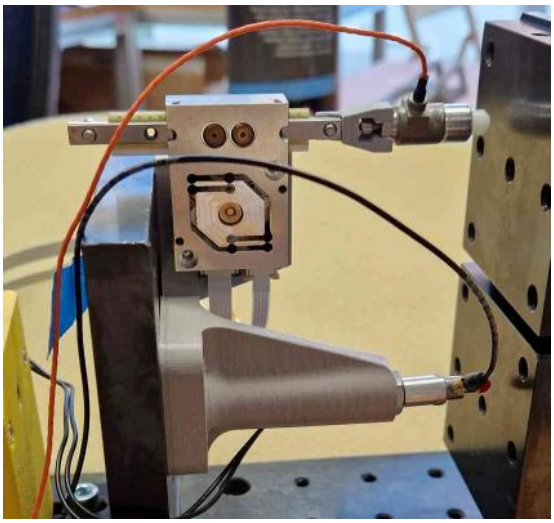
V naslednjih poglavjih bo predstavljen potek raziskave primernosti linearnega aktuatorja XLA-10-70-1250 proizvajalca Xeryon za avtomatizirano impulzno vzbujanje (slika 5). Njegova največja statična in delovna sila je 10 N, resolucija premika 1,25 µm in maksimalna hitrost 1000 mm/s. Drsnik ima 30 mm pomika. Aktuator za delovanje potrebuje krmilno vezje proizvajalca. To se lahko krmili iz računalnika, analognih vhodov ali serijskega vhoda. Na voljo so tudi knjižnice za Python, LabView, MATLAB in C++ [6].



Slika 5: XLA-10-70-1250 [6]

2 Metode dela in potek raziskave

Oceno primernosti smo izvedli preko neposredne primerjave z razpoložljivim modalnim kladivom AM Impact, saj sta obe napravi primerljive velikosti in imata enako ciljno uporabo. Oba aktuatorja smo togo vpeli in ju opremili s zaznavaloma sile z integriranim električnim vezjem (ang. IEPE) na konici (slika 6). Nato smo izvedli več trkov v togo telo z različnimi parametri, merili odziv sile in skušali najti optimalne nastavitve obeh aktuatorjev. Na koncu smo še gibanje in trk posneli s hitro kamero ter opazovali, ali pride do kakšnih nezaželenih pojavov.



Slika 6: Vpetje aktuatorjev

2.1 Krmiljenje aktuatorja

XLA-10 aktuator smo krmilili v programskem okolju Python preko odprtokodne knjižnice, ki jo zagotavlja proizvajalec. Prvi del kode je poskrbel za vzpostavitev komunikacije s krmilnikom in zaznavo oddaljenosti od telesa.

```
# ------------- SETUP -------------
from Xeryon import *
controller = Xeryon("COM3", 115200)                    # vzpostavitev povezave
axisX = controller.addAxis(Stage.XLA_1250_10N, "X-os") # definiranje aktuatorja
controller.start()                                     # inicializacija

axisX.findIndex()               # iskanje izhodišča
axisX.setUnits( Units.mm )      # definiranje enote

offset = 3
axisX.setSpeed(20)              # Aktuator se s konstantno hitrostjo 20mm/s
axisX.startScan(1, 0.5)         # pomakne proti telesu, kjer se zabije
limit = axisX.getEPOS()         # in zabeleži oddaljenost od telesa
print("Object is "+str(limit)+ "mm away from index")
axisX.setDPOS(limit - offset)   # Odmik stran od telesa za definirano razdaljo
```

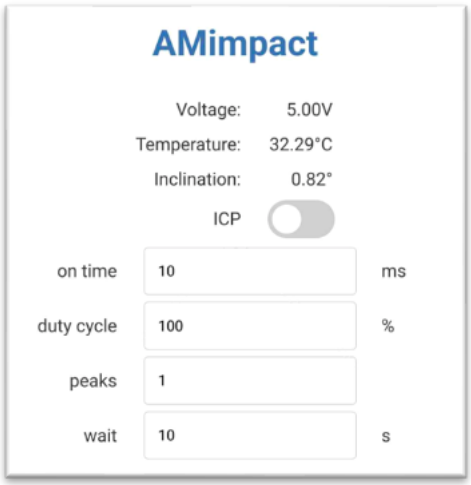
Iz izbranega odmika in predhodno izmerjene maksimalne hitrosti smo nato predvideli čas gibanja do trka ter s konstantnim premikom premaknili aktuator do tarče in nazaj. Poskusili smo tudi delovanje brez povratnega giba tako, da smo aktuator samo ustavili in pustili, da se odbije.

```
# ------------- IMPACT OBJECT -------------
# t = 0.0118        # spremenljivka za ročen vnos časa premikanja
stopM = False       # spremenljivka za vstavitev aktuatorja brez odmika nazaj
measuredSpeed = 260 # izmerjena hitrost v mm/s

if "t" not in locals():
    t = offset/theoreticalSpeed # če čas premikanja ni podan, ga izračunamo

axisX.startLogging() # začnemo shranjevati podatke o premiku in hitrosti
axisX.move(1)        # začnemo premik
time.sleep(t)        # in počakamo za določen čas
if stopM:            # če je definirano, zaustavimo premik brez odmika nazaj
    controller.stopMovements()
else:
    axisX.move(-1)   # če ni, izvedemo odmik nazaj za enako količino časa
    time.sleep(t)
logs = axisX.endLogging(convertTimeAndEpos=True)  # ustavimo shranjevanje
    axisX.setDPOS(limit - offset)                 # resetiramo pozicijo
```

Avtomatsko kladivo AM Impact smo krmilili s spletnim uporabniškim vmesnikom, prikazanim na sliki 7. Nadzira se lahko dolžina in intenziteta pulza toka, ki premakne jedro solenoida. Določi se lahko tudi več ponovitev impulza in časovni razmak med ponovitvami.



Slika 7: Posnetek zaslona grafičnega vmesnika za krmiliti AM Impact

2.2 Zajem podatkov

Zajem podatkov smo opravili z merilno kartico NI-9234 [7] in odprtokodno Python knjižnico LDAQ [8]. Vzorčili smo s frekvenco 51,2 kHz. Na XLA-10 aktuatorju smo uporabili zaznavalo Dytran 1022V, na AM Impact-u pa zaznavalo modalnega kladiva PCB 086E80. Specifikacije uporabljenih zaznaval so primerljive. Za pravočasno proženje zajema je poskrbela knjižnica LDAQ.

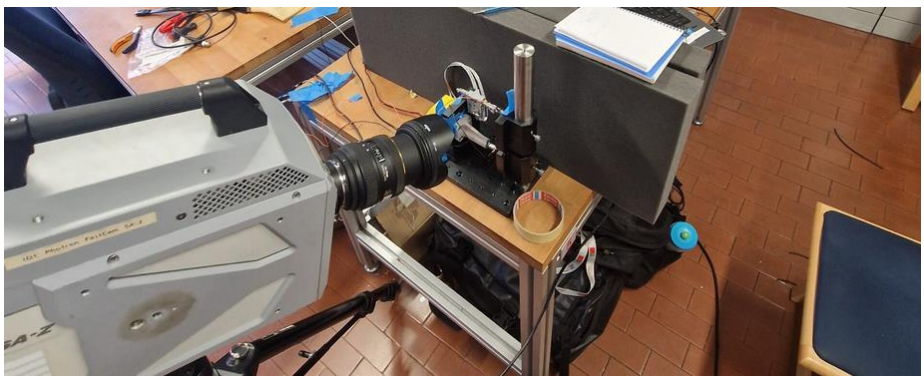
```
acq_ni = LDAQ.national_instruments.NIAcquisition(task_name="ImpactInput",
acquisition_name = "NI")                    # inicializacija objekta za zajem
ldaq = LDAQ.Core(acquisitions=[acq_ni])     # inicializacija Core objekta
ldaq.set_trigger(           # nastavljanje proženja
    source="NI",            # vir proženja
    channel="Ch1",          # kanal proženja
    level=1.5,              # nivo, pri katerem se je začel zajem
    duration=0.1,           # dolžina zajema
    presamples=300,         # količina še shranjenih vzorcev pred proženjem
    trigger_type='abs'
)
ldaq.run()          # začni z zajemom
```

Po proženju smo časovne vrste shranjevali v ločena polja za lažje procesiranje.

```
forceSolenoid = ldaq.get_measurement_dict()["NI"]["data"][:, 0]
forceXeryon = ldaq.get_measurement_dict()["NI"]["data"][:, 1]
```

2.3 Zajem s hitro kamero

Za boljše razumevanje vedenja aktuatorja in pomena pridobljenih rezultatov smo izvedli še zajem s hitro kamero Photron SA-Z (slika 8). V pridobljenih posnetkih smo opazovali, če pride do večkratnega odboja ali kakšne druge motnje.



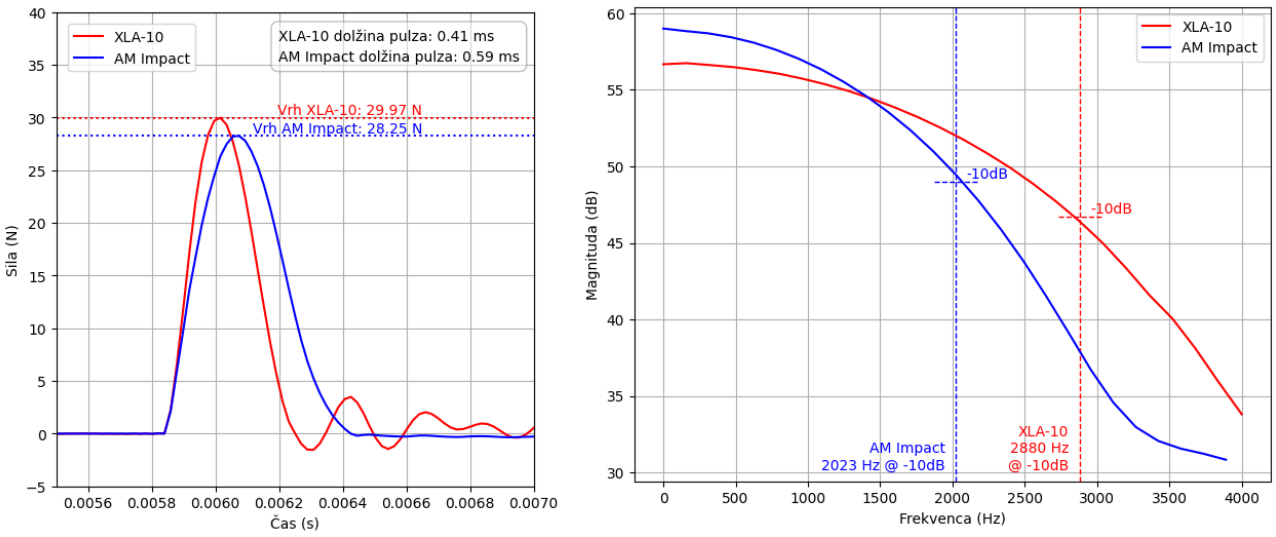
Slika 8: Zajem s hitro kamero

3 Rezultati

Uporaba aktuatorja XLA-10 za izvedbo trka brez povratnega giba se je izkazala za neučinkovito, zato teh rezultatov v nadaljevanju ne obravnavamo.

Aktuator smo za impulzno vzbujanje uspešno uporabili, ko smo z ustrezno nastavljenimi parametri krmilili prožilni in povratni hod. Za ta primer je primerjava časovnih vrst impulzov za modalno kladivo AM impact in aktuator XLA-10 podana na sliki 9a. Razvidno je, da so razlike med impulzoma razmeroma majhne. Amplituda sile pri XLA-10 je od AM impact nekoliko višja, za 6 %, čas trajanja pa je 30 % krajši. Posnetki s hitro kamero kažejo, da se je nihanje po impulzu sile pojavilo, ko senzor ni bil več v stiku s površino, zato podatkov po padcu sile pod 0 N nismo upoštevali.

S Fourierevo transformacijo smo pridobili amplitudna spektra vzbujevalne sile. Zanesljivo območje vzbujanja običajno omejuje 10 dB padca v amplitudi. Iz slike 9b je razvidno, da je frekvenčni razpon vzbujanja za AM impact 2023 Hz, za XLA-10 pa 2880 Hz.



(a) (b)

Slika 9: Sila v odvisnosti od časa (a) in transformacija pulza v vrekvenčni prostor (b)

Glavnino razhajanj med merjenima impulzoma pripisujemo razliki v materialu uporabljenih konic na zaznavalih, saj PCB 086E80 uporablja gumirano kovinsko konico, Dytran 1022V pa poliamidno konico. Na osnovi rezultatov zaključujemo, da z dobro nastavljenimi parametri, z XLA-10 aktuatorjem lahko dosežemo zanesljivost, ki je primerljiva AM Impact modalnemu kladivu.

4 Zaključki

V raziskavi smo preverili primernost ultrazvočnega resonančnega piezoelektričnega aktuatorja XLA-10 za izvedbo impulznega vzbujanja v strukturni dinamiki. Primerjali smo ga z obstoječo rešitvijo AM Impact, ki je bila razvita na Tehniški univerzi v Münchnu in ima enako ciljno uporabo. Obe napravi smo togo vpeli in izvajali trke v togo telo. Izmerili smo potek sile v odvisnosti od časa in iz zajetih podatkov ugotovili maksimalno silo, dolžino pulza in frekvenčni razpon vzbujanja ter s hitro kamero potrdili pravilno delovanje vseh poskusov. Ugotovili smo, da je obravnavani aktuator primerljiv z obstoječimi rešitvami na trgu in primeren za izvedbo impulznega vzbujanja v nižjem frekvenčnem področju. Manjše razlike v merjenih impulzih sile pripisujemo različnim materialom konic zaznavala sile. S to raziskavo smo prispevali k boljšem razumevanju zmožnosti nove tehnologije ultrazvočnih piezo aktuatorjev in pokazali, da so sposobni tudi aplikacij, kjer so potrebne visoke hitrosti.

V nadaljnjih raziskavah bi lahko poskusili dosegati še višje hitrosti in pospeške aktuatorja z optimiziranjem krmilnega vezja in komunikacije z računalnikom. Poleg tega, se v tej nalogi nismo spustili v optimiziranje frekvenc vzbujanja aktuatorja, kar bi lahko še dodatno izboljšalo delovanje.

5 Literatura

[1] J. Maierhofer, A. E. Mahmoudi, D. J. Rixen: *Development of a Low Cost Automatic Modal Hammer for Applications in Substructuring.* V: L. A., A. M., M. R., R. D. (ur.): *Dynamic Substructures, Volume 4*. Springer 2019 str. 77–86.

[2] T. B. Palmić: *Razvoj avtomatskega modalnega kladiva: magistrsko delo*. Ljubljana, 2019.

[3] *Avtomatic Modal Hammer vImpact.* Dostopno na: https://www.maul-theet.com/products/vibration-modal/hardware/automatic-modal-hammer, Ogled: 12. 8. 2024.

[4] *Scalable Automatic Modal Hammer SAM*. Dostopno na: https://www.polytec.com/int/vibrometry/products/accessories/scalable-automatic-modal-hammer-sam, Ogled: 12. 8. 2024.

[5] B. Bediz, E. Korkmaz, O. B. Ozdoganlar: *An impact excitation system for repeatable, high-bandwidth modal testing of miniature structures*. Journal of Sound and Vibration 333.13 (2014) str. 2743-2761.

[6] *Xeryon.* Dostopno na: https://xeryon.com, Ogled: 12. 8. 2024.

[7] *NI 9234*. Dostopno na: https://www.ni.com/sl-si/shop/model/ni-9234.html, Ogled: 12. 8. 2024.

[8] *LDAQ*. Dostopno na: https://github.com/ladisk/LDAQ, Ogled: 12. 8. 2024.

OCENA VOZNIH KARAKTERISTIK MOTOCIKLA "ŠTUDENTSKA TEHNIŠKA KONFERENCA - ŠTeKam"

Luka Miličić Eržen, Lin Livrin, Ajda Kajdiž, Luka Dovžan Kukič

Povzetek

Prispevek ponuja celovito analizo ključnih komponent motornega kolesa in dinamike, ki vplivajo na njegovo stabilnost, krmiljenje in manevriranje. Motorno kolo je obravnavano kot prostorski mehanizem, sestavljen iz štirih togih teles, povezanih s tremi vrtilnimi zglobi, ki omogočajo premikanje naprej, nagibanje in vrtenje krmila. Na motocikel med vožnjo delujejo različne sile, vključno z bočnimi, centrifugalnimi in gravitacijskimi silami, ki vplivajo na stabilnost vozila. Krmilni sistem motocikla se razlikuje od dvotirnih vozil zaradi dinamičnih značilnosti vožnje. Merjenje sil v krmilnem sistemu je ključnega pomena za razumevanje obvladljivosti motocikla, saj omogoča natančno analizo interakcij med vožnjo ter oceno zmogljivosti motocikla.

Motorno kolo je sistem, ki sprejema krmilne ukaze, kot so krmilni kot, navor in hitrost, ter jih pretvarja v kinematične in dinamične odzive med vožnjo. Kvantifikacijo voznih lastnosti omogočajo standardizirani vozni manevri in njihovi pripadajoči indeksi, kot so stacionarna krožna vožnja (nagibni indeks), 180-stopinjski obrat (Kochov indeks), slalom (nagibna funkcija) ter menjava voznega pasu (indeks nagibanja pri menjavi voznega pasu). Ti indeksi objektivno merijo odziv motocikla na krmilne vhode voznika in podajo manevrirno sposobnost vozila, ki je ključnega pomena za varnost voznika, saj omogoča učinkovito prilagajanje na cestne pogoje ter zagotavlja optimalno obvladljivost vozila v različnih situacijah. Objektivna primerjava voznih lastnosti motociklov dovoljuje identifikacijo morebitnih pomanjkljivosti, kar je ključno za nadaljnji razvoj in optimizacijo zmogljivosti. S tem proizvajalci motornih koles močneje konkurirajo na trgu ter krepijo zaupanje potrošnikov v kakovost in varnost lastnih proizvodov.

1 Uvod

Kvantificiranje voznih lastnosti motocikla je ključno za natančno oceno stabilnosti, manevrirnosti in splošne zmogljivosti vozila. Objektivna merila omogočajo inženirjem primerjavo različnih modelov, prepoznavanje potencialnih pomanjkljivosti in načrtovanje izboljšav, ki prispevajo k večji varnosti in boljšemu obvladovanju motociklov. Objektivno oceno voznih karakteristik omogočajo standardizirani vozni manevri, ki zagotavljajo primerljive rezultate v razvoju motociklov nove generacije.

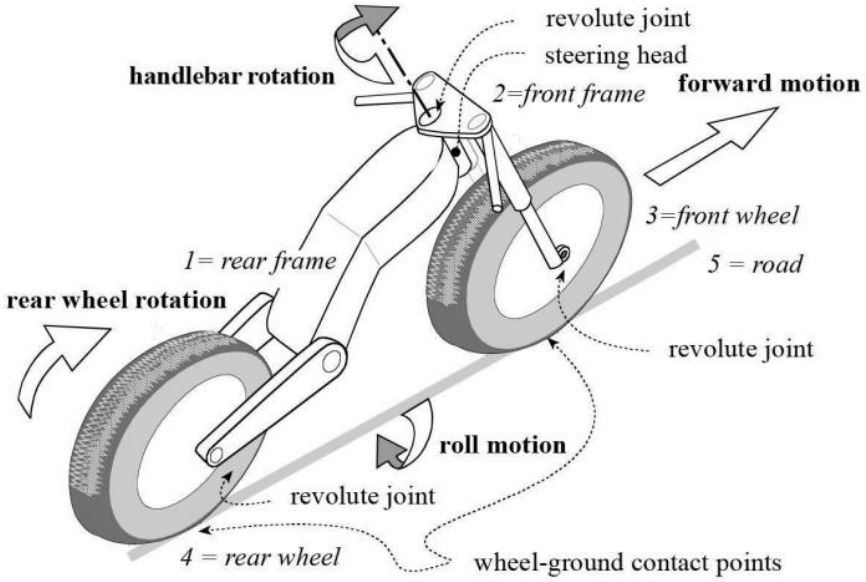
2 Definicija motornega kolesa

2.1 Definicija

Po Cossalterju [2] lahko motocikel ob predpostavki togih vpetij koles definiramo kot prostorski mehanizem, sestavljen iz štirih togih teles:

- zadnji sklop (okvir, rezervoar, pogonski sklop, zadnje vzmetenje),
- sprednji sklop (vilice, krmilna glava, krmilo),
- sprednje kolo in

- zadnje kolo.



Slika 1: Kinematična shema motocikla

Ta telesa povezujejo trije vrtilni zglobi (krmilna os in osi koles), v stiku s tlemi pa so na dveh točkah. Vsak zglob omeji 5 prostostnih stopenj, vsaka kontaktna točka pa 3. Če gibanje koles po tleh opisujemo kot čisto kotaljenje, se kolo vrti okoli:

- kontaktne točke na ravnini kolesa (premikanje naprej),
- osi preseka ravnin motocikla in tal (nagibanje) in
- osi skozi sredino kolesa (vrtenje okrog lastne osi).

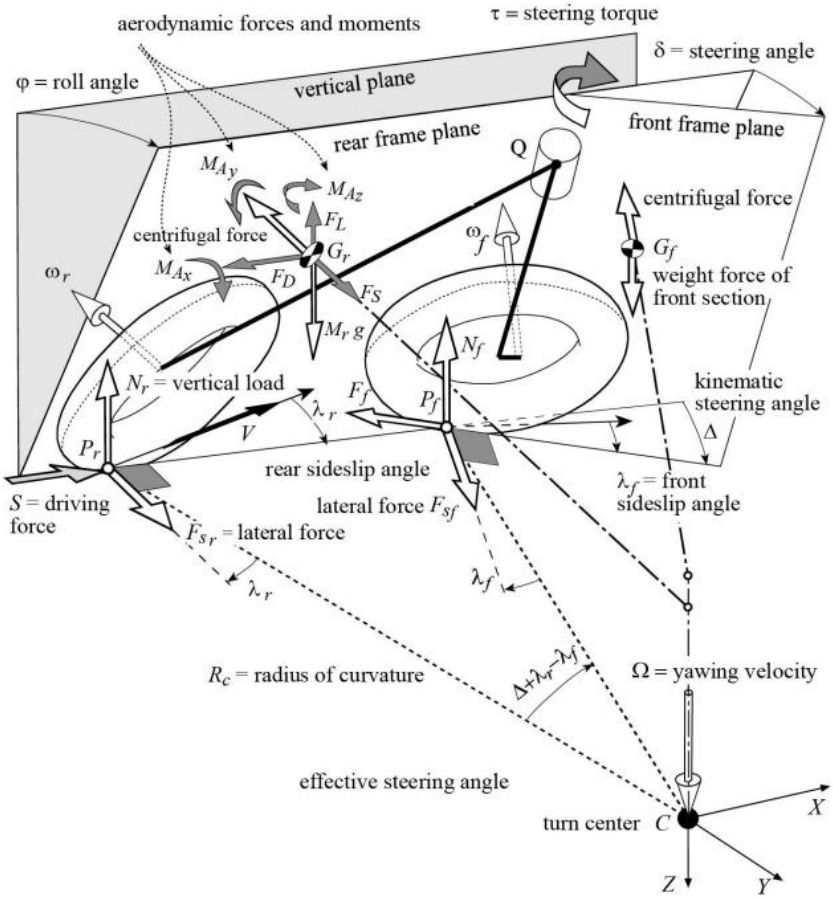
Število prostostnih stopenj motocikla je 3, če odštejemo omejitve zglobov (15) in kontaktnih točk (6) od 24 možnih stopenj štirih togih teles. Te stopnje ustrezajo trem glavnim gibanjem motocikla:

- premikanju naprej (vrtenje zadnjega kolesa),
- nagibanju okoli črte, ki povezuje kontaktne točke, in
- vrtenju krmila.

Te ugotovitve temeljijo na predpostavki gibanja koles brez zdrsa, kar pa ni povsem realistično, saj generiranje stranskih sil na pnevmatikah, ki so potrebne za ohranjanje ravnovesja motocikla med nagibom, zahteva določeno stopnjo zdrsa posameznega kolesa.

2.2 Na motorno kolo delujoče sile

Sile, ki delujejo na motocikel, je najenostavneje prikazati v primeru stacionarne krožne vožnje [2].



Slika 2: Sile, ki delujejo na motocikel pri vožnji v ovinku

Med stacionarno vožnjo v krogu deluje na motocikel več sil, ki so porazdeljene na obe pnevmatiki, težišče in središče pritiska. Na zadnjem kolesu deluje pogonska sila S, ki zagotavlja potisk za stabilno vožnjo skozi ovinek in je usmerjena naprej v ravnini zadnjega kolesa. Na prednjem kolesu deluje vzdolžna sila F_f, ki je posledica zdrsa kolesa, podobno kot pri bočnih vodilnih silah. Na obeh kolesih delujejo tudi bočne vodilne sili F_{S_f} in F_{S_r}, ki sta pravokotni na ravnino kolesa, ter normalni sili N_f in N_r, ki sta usmerjeni navzgor. V težiščih motocikla delujejo centrifugalne sile F_{Z_f} in F_{Z_r}, ki sta nasproti bočnim vodilnim silam, ter gravitacijski sili G_f in G_r, ki nasprotujeta normalnim silam [2].

Poleg sil, ki delujejo na pnevmatike in težišča, obstajajo še stacionarni in ne stacionarni upor, ki nasprotujeta pogonski sili S. Med stacionarne upore spadajo kotalni upor F_W, ki nastaja v stikih koles s tlemi in zračni upor F_D [3]. Zaradi aerodinamike vozila nastane tudi vzgonska sila F_L, ki deluje na center pritiska tako kot zračni upor.

Nestacionarni upori delujejo med nestacionarnimi fazami vožnje, kot so pospeševanje in zaviranje. Sem sodita translacijski upor zaradi mase in rotacijski upor kot vztrajnostni moment, ki izhaja iz giroskopskih sil [2]. Poleg tega pride med nestacionarnimi fazami do dinamičnih prerazporeditev obremenitev koles, ki niso enake statičnim obremenitvam, kar dodatno vpliva na normalne in bočne vodilne sile pnevmatik [6].

2.3 Sile in navori krmilnega sistema

Krmilni sistem motocikla se bistveno razlikuje od sistema pri dvotirnih vozilih zaradi drugačne dinamike vožnje in stabilizacije. Veliki krmilni koti se uporabljajo le pri manevriranju z majhno hitrostjo, medtem ko so pri vožnji skozi ovinke krmilni koti veliki le nekaj stopinj. Zato mora biti krmilni sistem natančen in občutljiv, saj stabilnost zagotavljajo majhni premiki krmila. Dodatna naloga krmilnega sistema je tudi prenašati informacije o krmilnem kotu in navoru ter zagotavljati togost, nizko trenje in majhen vztrajnostni moment [1].

Najpogostejši princip krmiljenja je okoli krmilne osi rotirajoč sistem na sprednjem delu nosilnega krmila, kar omogoča neposreden prenos gibanja. Edina slabost te konstrukcije je velik vztrajnostni moment okrog krmilne osi. Med tovrstna krmiljenja spadajo teleskopske vilice, Telelever sistem podjetja BMW in vlečne/potisne nihajne roke [1].

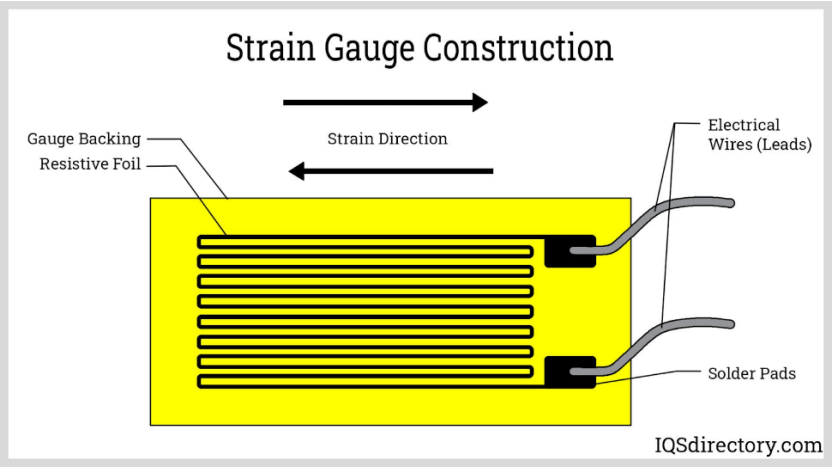
Motocikel upravlja voznik z nagibnim in krmilnim navorom. Krmilo je glavna stična točka med voznikom in motociklom, saj omogoča upravljanje in zagotavlja senzorične povratne informacijo, kar močno vpliva na voznikovo vedenje med vožnjo [4].

Dejavniki, ki imajo največji vpliv na krmilni navor, so sledeči [2]:

- položaj voznika (nagib proti notranji strani ovinka deluje močno poravnalno),
- kot krmilne glave (poravnalno delovanje),
- širina pnevmatik (poravnalno),
- višina skupnega težišča (poravnalno),
- naklon (neporavnalno delovanje),
- vrtilni moment prednjega kolesa (močno neporavnalno).

2.4 Meritev sil v krmilu

Sile v krmilnem sistemu se najlažje merijo z uporabo nalepljenih merilnih trakov raztezka. V merilni tehniki so to posebni kovinski trakovi, ki pri raztezanju spremenijo svojo upornost. Relativna sprememba upornosti omogoča izračun raztezka materiala, ta faktorja namreč nastopata v linearni odvisnosti. V primeru motocikla se izbrano mesto na krmilu očisti in zaobljena površina zbrusi do ravne, kjer se namesti merilni trak za raztezek. Pomembno je, da lepilo ne vpliva na raztezanje merilnega traka, saj bi to izkrivilo meritev [7].



Slika 3: Zgradba merilnega traku raztezka

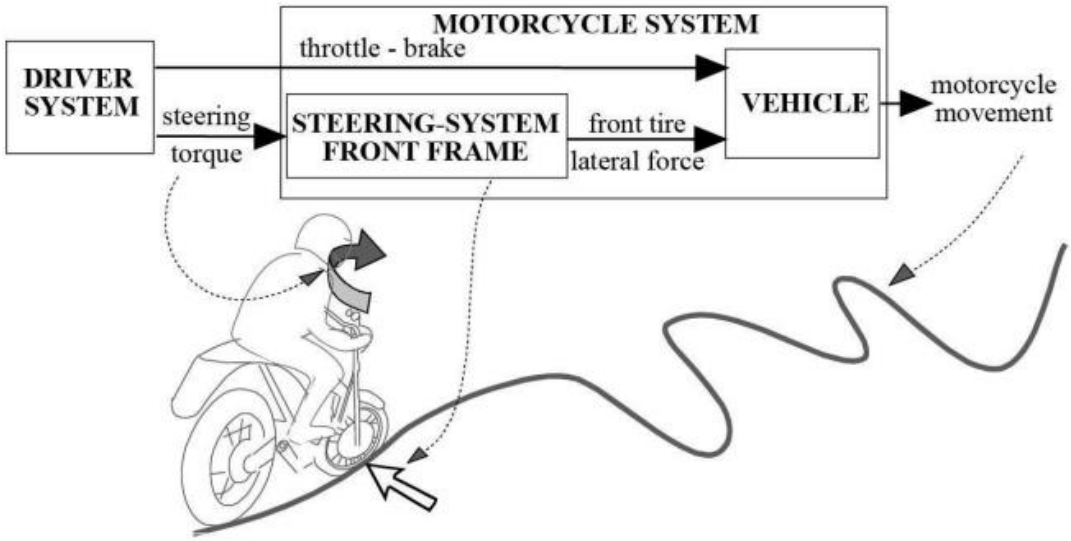
Merilni trakovi raztezka so v bistvu senzorji, katerih izhod je merjena napetost v območju mV. Signal je za lažjo nadaljnjo analizo potrebno ojačati z ojačevalnikom, ki predstavlja dodaten člen v verigi merilnega sistema motocikla. V naslednjem koraku sledi pretvorba signala iz analogne v digitalno domeno, s čimer je pripravljen na končno računalniško analizo [8]. Analiza in interpretacija merjenih signalov je mogoča s poljubno programsko opremo.

3 Ocena voznih karakteristik

Pri upravljanju se motocikel odziva na krmilne akcije voznika. V praksi je kakovost krmiljenja težko opredeljiva, saj gre za celovito lastnost, ki jo skupaj določajo različne komponente vozila, kot so motor, zavore, aerodinamika, okvir in pnevmatike. Poleg tega ima subjektivna zaznava voznika veliko vlogo pri uporabi in ocenjevanju motornega kolesa - ta je namreč močno odvisna od voznikovega sloga vožnje in njegove občutljivosti [2]. Da bi se pri ocenjevanju voznih lastnosti motocikla izognili subjektivnim vplivom, se ponujajo določene metode objektivacije obnašanja, ki vhodne podatke, npr. krmilni navor oz. kot krmila, povežejo z izhodnimi podatki, ki predstavljajo reakcijo vozila, npr. sprememba naklonskega kota.

3.1 Motorno kolo kot sistem

Motorno kolo lahko obravnavamo kot sistem, ki prejema določene krmilne ukaze (kot so krmilni kot, navor in hitrost v smeri vožnje) kot vhodne vrednosti in na podlagi teh ukazov generira kinematične in dinamične izhodne podatke. Vedenje motornega kolesa je opisano s funkcijo, ki povezuje te vhodne vrednosti z izhodnimi rezultati pri izvajanju tipičnih manevrov, kot so slalom, prehodno in stabilno zavijanje, menjavanje voznih pasov in izogibanje oviram. Potreba po različnih vrstah testov za motorna kolesa izhaja iz dejstva, da generične vozne poti ni mogoče preprosto razdeliti na zaporedje ovinkov in ravnin. Krmilni ukazi voznika namreč niso neodvisni, temveč odvisijo od predhodnih vhodnih ukazov [2].



Slika 4: Funkcionalni diagram vožnje

Objektivacija voznih lastnosti je ključna za zagotavljanje doslednosti in primerljivosti ocen vozil. Omogoča natančno analizo in optimizacijo zmogljivosti vozila, neodvisno od subjektivnih vplivov, kot so osebne preference ali slog vožnje, ter podpira utemeljene razvojne odločitve.

3.2 Vozni manevri za karakterizacijo krmilnih lastnosti

Kot omenjeno izvira potreba po različnih testih za ocenjevanje krmiljenja iz vozne fizike motocikla, pri katerem krmilni ukazi določenega manevra ne odvisijo le od manevra, ki ga voznik želi izpeljati, temveč tudi od predhodnega, ki npr. pogoji izhodno hitrost, naklon motocikla, krmilni kot in navor. Vozni manevri so zasnovani za izolacijo določenih krmilnih lastnosti motornega kolesa in omogočajo oceno krmilnih lastnosti brez neželenih vplivov.

3.2.1 Stacionarna krožna vožnja

Stacionarna krožna vožnja je priznana kot učinkovita metoda za ocenjevanje nizkofrekvenčnih voznih lastnosti, kot sta manevriranje in krmiljenje. Ker sta hitrost in polmer zavoja konstantna, je mogoče natančno meriti in reproducirati odzive vozila. Voznik upravlja vozilo z vnosom krmilnega momenta, medtem ko kot nagiba in bočni premik voznikove mase delujeta kot sekundarna parametra. Pomembno je uporabiti čim manjši navor, idealno negativen (stran od zavoja), kar označuje podkrmiljeno vozilo, ki je stabilno in pokončno pri nenadnem odvzemu nadzora. Razmerje med voznikovimi akcijami in reakcijami vozila je kvantificirano z nagibnim indeksom (ang.: Roll-Index, RI), ki predstavlja razmerje med krmilnim momentom τ in kotom nagiba φ. Poleg tega je mogoče določiti hitrost, pri kateri se vedenje vozila spremeni iz podkrmiljenja v prekrmiljenje, kar povzroči nestabilnost, za določen polmer zavoja [2].

$$RI = \frac{\tau}{\varphi} \tag{1}$$

3.2.2 180-stopinjski obrat

Lastnosti obvladovanja motornega kolesa niso določene le z vrednostjo navora za ohranjanje konstantnega zavoja, ampak tudi z navorom, potrebnim za nagibanje vozila v določen kot, ter časom, ki je potreben za dosego želenega nagiba [2]. Tipične hitrosti pri tem manevru se gibljejo med 50 in 100 km/h, pri polmeru zavoja 100 m [5]. Kochov indeks (KI) primerja maksimalni krmilni moment τ_max z maksimalno hitrostjo nagiba $\dot{\varphi}$_max, normirano glede na povprečno hitrost [2].

$$KI = \frac{\tau_{max}}{\dot{\varphi}_{max} * \bar{v}} \tag{2}$$

Kochov indeks se z večanjem hitrosti približuje mejni vrednosti, ki je odvisna od vrste motornega kolesa in polmera zavoja. Nizek Kochov indeks kaže, da je hitra sprememba naklona dosegljiva z majhnim maksimalnim krmilnim momentom, kar nakazuje dobro obvladljivo vozilo [2].

3.2.3 Slalom

Pri slalomu voznik nadzoruje motorno kolo s periodičnim upravljanjem krmilnega sistema. Ta vozni manever določata dva parametra, odmik med posameznimi stožci ter hitrost motocikla skozi slalom. Na podlagi tega je možno določiti frekvenco slaloma: hitrost delimo z dvojno razdaljo med stožci. Merilne vrednosti lahko interpretiramo s pomočjo nagibne funkcije v

odvisnosti od frekvence (ang.: Roll Transfer Function, RTF), ki prikazuje odziv sistema (nagib, predstavljen z nagibnim kotom) na vhodni signal (krmilni moment) [2].

$$RTF\ (v) = \frac{\varphi}{\tau}(v) \tag{3}$$

Visoko razmerje med nagibnim kotom φ in krmilnim navorom τ pomeni, da je mogoče z majhnim vložkom sile doseči velik nagib motornega kolesa. Povečanje frekvence slalom vožnje, torej povečanje hitrosti pri konstantni razdalji med stožci, zahteva večji krmilni napor, zato je pomembno, da za primerjavo merilnih vrednosti različnih motociklov uporabimo enako slalomsko frekvenco [2].

3.2.4 Menjava voznega pasu

Menjava voznega pasu je tipičen ne stacionarni vozni manever, rezultat katerega je močno odvisen od sposobnosti voznika in njegovega sloga vožnje. Vozniki pri tem uporabljajo različne vozne strategije, ki se razlikujejo glede na začetno nasprotno krmiljenje in premikanje telesa voznika v odnosu do motornega kolesa [2].

$$LCRI = \frac{\tau_{p-p}}{\dot{\varphi}_{p-p} * \bar{v}} \tag{4}$$

Razmerje med absolutno magnitudo (ang.: “Peak-to-Peak”) krmilnega momenta in hitrostjo nagibanja je dober pokazatelj manevrirnosti motornega kolesa. To razmerje, normirano na hitrost vožnje, je indeks nagibanja pri menjavi voznega pasu (ang.: Lane Change Roll Index, LCRI), pri čemer oznaka »p-p« označuje »Peak-to-Peak« vrednosti. Ta indeks predstavlja napor, ki ga mora voznik vložiti v obliki krmilnega momenta, da doseže želen odziv vozila glede na hitrost nagibanja [2].

4 Pomen objektivne primerjave voznih lastnosti

Vozne manevre iz poglavja 3.2 kvantificirajo pripadajoči indeksi manevrskih sposobnosti. Ti indeksi omogočajo natančno primerjavo motociklov istega razreda različnih proizvajalcev, kar je posebej uporabno v nadaljnjem razvoju modelov. Proizvajalec lahko npr. naslednika že določenega obstoječega modela bazira na temeljiti primerjavi rezultatov s konkurenco, kar mu omogoča odkrivanje možnih pomanjkljivosti lastnih produktov. S tem se odpirajo priložnosti za nadaljnje izboljšave specifičnih lastnosti, ki produkt dvignejo nad povprečje in ga še bolj ločijo od konkurence. Na ta način se zagotavlja konkurenčna prednost na trgu, povečuje zaupanje potrošnikov in krepi ugled blagovne znamke, kar dolgoročno prispeva k uspehu podjetja na globalnem trgu.

5 Literatura

[1] Jürgen Stoffregen (2018): »Motorradtechnik«
[2] Vittore Cossalter (2006): »Motorcycle Dynamics«
[3] Manfred Mitschke, Henning Wallentowitz (2014): »Dynamik der Kraftfahrzeuge«
[4] Michel, S. Espié und S. Bouaziz (2021): »Motorcycle Riding Simulator Controllability and Simulator Sickness: A Proof-of-Concept Syste«
[5] V. Cossalter, R. Lot und M. Massaro (2014): »Motorcycle Dynamics«
[6] Vittore Cossalter, Roberto Lot, Matteo Massaro, Martino Peretto (2011): »Investigation of Motorcycle Steering Torque Components«
[7] P. Kragt (2021): »Aufbau und Bewertung einer Lenkmomentmessung für den Einsatz in einem Motorrad Fahrsimulator« (Bachelorarbeit, Technische Universität München)
[8] R. Parthier (2016): »Messtechnik«
[9] S. Keil (2017): »Dehnungsmessstreifen«

RAZŠIRJENE TEHNIKE AKUSTIČNEGA IGRANJA KLAVIRJA: OSNOVE VARNE PREPARACIJE

Klara Mlakar

Povzetek

Pričujoča raziskava se ukvarja z razširjenimi tehnikami akustčnega igranja klavirja s posebnim fokusom na osnovah varne klavirske preparacije. Članek želi preko podrobnega pregleda specifik najbolj občutljivih delov klavirja ponuditi pregledne in jasne informacije o neškodljivi uporabi sodobnejših tehnik klavirske igre, skupaj z varnim vstavljanjem in odstranjevanjem preparatov, čiščenjem klavirskih delov, kot tudi markiranjem preparacij. Poleg zgoraj naštetega so v raziskavi predstavljene tudi splošne glasbeno-zgodovinske okoliščine, ki so vplivale na razvoj prepariranega klavirja ter pregled aktualne literature in problematike na tem področju. Članek želi raziskati, kam vse je smiselno usmeriti pozornost, ko prihajamo v kontakt z razširjenimi klavirskimi tehnikami in istočasno odgovoriti na dvome marsikoga, ki nekonvencionalno igro klavirja še vedno vidi kot destruktivno. Prepariran klavir je korenito vplival na tok glasbene zgodovine, zato so poznavanje njegovih specifik prepotrebne. Zaradi pomanjkanja vsesplošne literature o razširjenih tehnikah igranja klavirja, še posebej pa slovenske, raziskava prinaša polnjenje vrzeli na tem področju.

1. Uvod

Skladatelji in izvajalci že več kot sto let eksperimentirajo z izvabljanjem zvokov iz klavirja, ki ne nastanejo samo s konvencionalnim igranjem na tipke. Razširjene klavirske tehnike, ki večinoma vključujejo nekonvencinalno uporabo klavirskih pedalov in tipk ter igranje neposredno v notranjosti resonančne škatle klavirja, so se pojavile v začetku 20. stoletja z gojiščem v Severni Ameriki. Vzgib za raziskovanje novega klavirskega zvoka je posledica treh medsebojno povezanih vidikov: »vsesplošnega iskanja novega zvočnega materiala in odkrivanja novih zvočnih polj; prizadevanja za razširitev možnosti proizvedbe zvoka, v kolikor je to povezano s klavirjem (ali klavirju podobnim inštrumentom) in širitvijo prostora zvočnih barv; in spremembe pomena zvoka, kar vodi v premik kompozicijskega interesa k zanimanju predvsem za barve.« (Fürst-Heidtmann, 1997) Prišlo je do širšega kulturnega in estetskega premika, ki je cenil inovacije, eksperimentiranje in odmik od klasičnih norm. Interes skladateljev je med drugim ležal tudi v razvoju mikrotonalnosti, uporabi šumov kot del glasbe in razvrednotenju tonalnosti in temperiranih tonov. Tonske višine in alikvotni toni tako niso imeli več tonalnega oziroma harmoničnega pomena, temveč bolj barvnega. Raziskovanje barve je potekalo z roko v roki z istočasnim razvojem odnosa do že poznanih inštrumentov ter z uporabo nekonvencionalnih in ustvarjanjem novih. Tolkala so prihajala vse bolj v ospredje, ne le s povečano uporabo njih samih, ampak tudi z iskanjem tolkalskih prvih v ostalih inštrumentalnih korpusih. Klavir ni bil več zgolj simbol romantične virtuoznosti in liričnosti, temveč tudi inštrument, ki je lahko prevzel surov, perkusiven karakter. Poleg ustvarjanja

povsem novih inštrumentov, ki bi bili skladni z estetskimi vzgibi tedanjega časa (recimo četrttonski klavir), je bil istočasno fokus tudi na razvoju že poznanih inštrumentov, predvsem na širitvi tehnik nekonvencionalnega igranja. S pojavom elektronike v začetku petdesetih let pa so možnosti in zmožnosti zvoka postale praktično neomoejene ter si zaslužijo prav posebno obravnavo in analizo v ločenem članku.

Velik raziskovalec na področju razširjenih klavirskih tehnik je bil ameriški skladatelj Henry Cowell (1897-1965). Znotraj svojih del je ponudil fascinanten katalog tehnik ustvarjanja novih klavirskih zvokov. Najpomembnejši izmed teh so harfi podobno ubiranje in brenkanje strun, resonančni zven strun, »muted« toni, alikvotni toni in tonski grozdi. Cowellov izjemen prispevek so prevzeli tudi drugi pionirji, ki so razvili ta idiom v novo glasbeno tradicijo. Med njimi je bil tudi njegov učenec, ameriški skladatelj in filozof John Cage (1912-1992), ki je zaslušen za »izum« prepariranega klavirja. Leta 1938 je dobil naročilo, naj napiše glasbo za ples Bacchanale, ki bi ga odplesala Syvilla Fort. Želel je uporabiti tolkalsko zasedbo, a je bilo na odru, kjer naj bi potekala izvedba, prostora le za klavir in plesalko. Eksperimentiral je z različnimi predmeti, dokler ni odkril, da vijaki in matice, zataknjeni med strunami, lahko trajno spremenijo zvok klavirja. Cageov prispevek se je izkazal kot učinkovit in trajen; mnogi poznejši skladatelji so uporabili njegove zamisli za ustvarjanje lastne glasbe. Vsaka realizacija dela za preparirani klavir ima drugačno zvočno fizionomijo, zato je pojav prepariranega klavirja začenjal spremenil tudi odnos med komponistom in ustvarjalcem. Slednji je »iz zgolj izvršilnega organa postal soodgovoren akter glasbenega besedila. Čeprav interpret ni istoveten s skladateljem, kot je to v t.i. »musique concrète« (konkretni glasbi) in elektronski glasbi, so se meje med obema prej ločenima funkcijama začele brisati in proces emancipacije interpreta se je začel.« (Fürst-Heidtmann, 1997)

<table>
<tr><td colspan="2">Konvencionalne tehnike</td><td colspan="4">Nekonvencionalne, netradicionalne tehnike</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Tehnike igranja na tipke in pedalske tehnike</td><td rowspan="4">Posebni efekti igranja na tipke in s pedali</td><td colspan="4">Razširjene tehnike</td></tr>
<tr><td colspan="3">Aktivne</td><td>Pasivne</td></tr>
<tr><td colspan="2">Tehnike igranja na struno</td><td rowspan="3">Perkusivne & vokalne tehnike</td><td rowspan="3">Prepariran Klavir</td></tr>
<tr><td>Z rokami</td><td>S predmeti</td></tr>
<tr><td>Naturalno</td><td>Spremenjeno</td></tr>
</table>

Tabela 1: Kategorizacijo različnih vrst klavirskih tehnik po Jean-François Proulxu.

Slika 1 prikazuje kategorizacijo različnih vrst klavirskih tehnik po Jean-François Proulxu. »Konvencionalne klavirske tehnike izkoriščajo naravni ton inštrumenta z običajno akcijo prstov na tipkah, naravni ton klavirja pa je zvok, ki nastane z delovanjem nespremenjenih kladiv na nespremenjenih strunah.« (Proulx, 2009) Pričujoč članek se osredotoča na pasivne

razširjene tehnike igranja klavirja. »Prepariran klavir je klavir, ki se mu med strune vstavljajo razni predmeti, da nastanejo novi zvočni efekti« (SSKJ, 1975) Predmeti za spreminjanje zvoka, imenovani preparati, so nameščeni v klavir pred igranjem in ostanejo nedotaknjeni, dokler se izvedba ne konča.« (Proulx, 2009)

Literature na tem področju je relativno malo, še posebej pa je redka tista, ki se z obravnavanjem sodobnega klavirja ukvarja direktno. Prva in najstarejša knjiga na tem področju je »The well-prepared piano« (1973) Richarda Bungerja, katere predgovor je napisal John Cage sam. Naslednja knjiga avtorice Monike Fürst-Heidtmann »Das präparierte Klavier des John Cage« (1979) se sicer res fokusira na Cagea, vendar vseeno ponudi odlično razčlenjeno glasbeno-zgodovinsko ozadje pojava prepariranega klavirja, pa tudi zgleden pregled klavirske preparacije na splošno. V smislu knjig, ki bi se aktivno ukvarjale z razširjenimi klavirskimi tehnikami in preparacijo, pride do večdesetletnega zatišja. V tem času so se sicer pojavljali posamezni članki, krajši spisi in omembe. Največ je analiz dela Cagea ali Crumba, ki so istočasno preletavale tudi temo preparacije, vendar vedno le iz vidika analizirane skladbe. Drugi pa so članki, ki so nekakšni krajši prerezi razširjenih klavirskih tehnik, kjer se v podrobnosti ne zahaja oziroma za analizo preparacije zmanjka prostora. Zadnji so kratki papirji z navodili za uporabo razširjenih klavirskih tehnik, ki so jih zapisali profesorji klavirja za potrebe študentov svojih glasbenih univerz. Skoraj nikjer ni možno zaslediti celostne debate o klavirski preparaciji. Redka izjema je »A Pedagogical Guide to Extended Piano Techniques« Jean-Françoisa Proulxa iz leta 2009, ki jasno opisuje osnovne smernice razširjenih aktivnih klavirskih tehnik in ponuja celo vaje za pianiste, žal pa zmanjka prostora za preparacijo. Vredno bi bilo omeniti še dve knjigi: prva je »Experimentelle Pianistik: Improvisation – Interpretation – Komposition« (1994) avtorja Herberta Hencka, druga pa je avtorja Petra Roggenkampa »Schriftbild und Interpretation in Neuer Klaviermusik« (1996). Čeprav se obe sicer nedirektno ukvarjata z raširjenimi klavirskimi tehnikami, vseeno ponujata zanimiva krajša mišljenja in debate o izbranih sodobnih klavirskih skladbah, pri katerih imajo razširjene klavirske skladbe dostikrat vidno vlogo. Najnovejša literatura na tem področju je knjiga Klausa Steffes-Holländerja »Nicht nur an Tasten: Neue Spieltechiken für Klavier«. Leta 2022 napisano delo prinaša enormno polnjenje vrzeli na tem področju in ponuja do zdaj najbolj podroben pregled in sistematizacijo razširjenih klavirskih tehnik, pa tudi kopico praktičnih nasvetov. Literature na področju razširjenih klavirskih tehnik, predvsem preparacije klavirja, tako slovenskih avtorjev, kot tudi prevodov tujih knjig v slovenski jezik, zaenkrat še ni.

Je pa vsa dosedaj znana literatura na tem področju je soglasna: »razširjene klavirske tehnike, predvsem preparacije, so še vedno tabu.« (Steffes-Holländer, 2022) V mnogih koncertnih dvoranah je koncertni klavir za novo glasbo inštrument, ki je že skoraj odslužil svojo življensko dobo za redne koncertne dejavnosti. Nekateri so morda pretirano zaščitniški do svojega inštrumenta ali pa pretiravajo s potencialnimi škodljivimi učinki razširjenih tehnik. Spet drugi so napačno informirani in resnično verjamejo, da bo njihov inštrument utrpel

nepopravljivo škodo, ki zahteva draga in dolgotrajna popravila. Po drugi strani pa sta pomanjkanje znanja o novih tehnikah igranja in nepravilna izvedba s strani izvajalca nemalokrat že povzročili resne poškodbe inštrumentov ter zgornje strahove in stiske samo še podkrepili. »V resnici lahko večkratno vadenje najbolj burnih odlomkov del Liszta, Rahmaninova in Prokofjeva povzroči večjo obrabo in poškodbe klavirja kot pravilna vadba razširjenih tehnik.« (Proulx, 2009) Tudi Steffes-Holländer opozori na morebitne obrabe klavirja pri povsem običajnem igranju: »Pri igranju na tipke strune lahko počijo, zlasti pri visokih tonih, klavirski uglaševalec pa jih nato zamenja. Prav tako nihče na primer ne pomisli, da bi klavir igral samo potiho ali pa sploh ne, ker to povzroča nastanek utorov na glavi kladivc in bi moral to izdelovalec klavirja po določenem času zamenjati«. Postavlja vprašanje: Kaj inštrumentu zares škoduje in kaj ne? Točno s tem vprašanjem se ukvarja pričujoč članek. Njegov namen je odpreti dialog in normalizirati uporabo razširjenih klavirskih tehnik ter podati jasne smernice, ki bi glasbeniku zadostile za samostojno, samozavestno in varno raziskovanje novih klavirskih zvočnosti. Predpostavljena teza je sledeča: prepariranje klavirja je varno in neškodljivo, če se ga lotimo s previdnostjo in če se opremimo z znanjem. Pričujoče delo torej prispeva k razumevanju specifik klavirske preparacije, pomaga pri razumevanju razširjenih klavirskih tehnik naspoh, prav tako pa doprinaša tudi k polnjenju vrzeli v slovenski literaturi na tem področju.

2. Metode dela in potek raziskave

V raziskavi se lotim opazovanja prepariranega klavirja iz treh večjih zornih kotov. Najprej izolirano pogledam specifike posameznih elementov klavirja, njegove mehanske specifike, predvsem pa specifike njegovih pri preparaciji najbolj občutljivih delov: dušilcev in strun. V drugem delu me zanima, na kaj je vredno pomisliti ob preparaciji sami. Preparate raziščem iz vidika materiala, velikosti in oblike. Nazadnje predstavim še markiranje in čiščenje klavirja..

3. Preparacija klavirja

Klavir ima kompleksno sestavo in mehaniko, ki lahko od modela do modela konkretno variira. V kontekstu preparacije klavirja je najnujnejše preveriti zgradbo resonančnega okvirja v resonančni škatli in pozicijo ter potek strun (kako se križajo zgornje in basovske strune). Razlike med notranjostjo klavirjev različnih modelov so namreč lahko zelo velike. Določene preparacije, sploh tiste na strunah blizu resonančnega okvirja, so lahko na nekem modelu klavirja udobne in možne brez problemov, spet na drugem modelu pa praktično neizvedljive.

V kontekstu preparacije klavirja nas zanima tudi njegov osnovni mehanični vidik, predvsem kako se na klavirju naravno producira zvok. Vsaka tipka ima tri strune (z izjemo basovskih). »Ob udarcu na tipko kladivce istočasno in z enako močjo udari po vseh strunah skupine istega tona. Ko kladivce udari strune od spodaj navzgor, strune zavibrirajo.« (Blackham, 1988) Ob spustu tipke se spusti tudi dušilec, ki je nad strunami, in le-te zaduši, da bi preprečil naravno dolg zven resonance strune. Če si resonance vseeno želimo, pritisnemo desni (sustain) pedal,

ki dušilce dvigne od strune in s tem omogoči željeno tudi po spustu tipke. Vsi omenjeni deli osnovne klavirske mehanike — kladivca, dušilci in strune — so izredno senzibilni. Kladivca so pod strunami, zato je do njih pri prepariranju skorajda nemogoče dostopati in niso v »neposredni nevarnosti«. So pa na udaru dušilci in strune, zato jim v sklopu debate o preparaciji posvečamo prav posebno pozornost.

3.1. Najbolj občutljivi deli klavirja: dušilci in strune

Dušilci so izjemno občutljivi, se zlahka se upognejo jih ni mogoče popraviti, le zamenjati. Za vsako ceno se je treba izogibati karšnegakoli dotikanja dušilcev, med igranjem v njihovi bližini pa velja izredna previdnost. Poškodbe dušilcev najpogosteje privedejo do nepravilnega dušenja strun, kar zvočno rezultira v izgubi kotrole nad resonanco strune.

Na udaru so tudi strune, ki jih je pri klavirju je dvoje vrst: prve so iz karbonskega jekla, namenjene so srednjim in visokim registrom not in nastopajo v skupinah po tri. Druge, basovske strune, imajo jedro iz karbonskega jekla in bakren ovoj, pojavljajo pa se kot samostojne strune. Prav vse strune pa so občutljive na oksidacijo, hitro se lahko upognejo ali počijo. Tudi bakren ovoj na basovskih strunah se s časom lahko zrahlja in posledično ropota. Največji sovražnik strun je rja, ta pa najhitreje nastane zaradi naravnega olja naših rok. To preprečujemo tako, da pred vsako uporabo temeljito umijemo in posušimo roke, v ekstremnih primerih lahko med igranjem uporabimo tudi rokavice. Strune brez izjeme po vsaki uporabi očistimo s krpico. Več o čiščenju klavirja po uporabi je zapisano spodaj.

3.2. Preparati

3.2.1. Splošna pravila; vstavljanje in odstranjevanje

Preparacija klavirskih strun v splošnem poteka tako, da v skupini treh strun istega zvena izberemo dve, med katerima vstavimo objekt. Včasih je točno določeno, med katerima dvema naj bi se objekt nahajal (sploh, če je preperacij na isti stuni več), mnogokrat pa to ni določeno.

Prvo in najbolj pomembno splošno pravilo je, da so ob vstavljanju in odstranjevanju preparatov med strune dušilci vedno dvignjeni. To najlažje dosežemo s pritiskom na desni (sustain) pedal. Kakršenkoli premik strune, ki se med vstavljanjem in odstranjevanjem objekov neizogibno zgodi, največkrat resno zvije ali drugače poškoduje spuščene dušilce. Ko so dušilci dvignjeni, so daleč stran od strun, poškodbe kot posledica vstavljanja oziroma odstranjevanja preparatov pa so praktično nemogoče.

Drugi splošni napotek bi bil, da je pri prepariranju potrebno kar se le da minimalizirati trenje tujih materialov ob strune, zato si pri vstavljanju in odstranjevanju preparatov pomagamo z gumijastimi klinastimi utišalniki, ki se jih navadno uporablja pri uglaševanju klavirja. S temi pripomočki varno povečamo prostor med dvema strunama, kamor udobno in z minimalno frikcijo namestimo objekt na svoje mesto. Na drgnjenje seveda vplivata tudi velikost in material preparata, kar pa bo obravnavano kasneje.

3.2.2. Material preparatov

Glavno pravilo pri materialih preparatov je to, da strune nikoli ne smemo preparati z isto trdimi ali tršimi predmeti, kot je struna sama. Pravilo tu lahko razširimo tudi na raziskovanje aktivnih nekonvencionalnih klavirskih tehnik: vedno praskamo/udarjamo/drgnemo/drsamo/ mečemo tuje objekte na določen material klavirskega dela samo z materialom tujega objekta, ki je mehkejši od materiala klavirskega dela. Pri nizkih strunah obstaja posebno opozorilo: nikoli ne uporabljamo kovine na basovskih strunah. Bakreni ovoj na struni je za to preobčutljiv. Še zadnje pravilo materiala preparatov: nikoli ne uporabljamo ničesar, kar bi za seboj pustilo sledi, kot recimo lak za nohte, flomaster, lepilo in podobno.

Trdi materiali	Srednje trdi materiali	Mehki materiali
Kovina (vijaki, sorniki, matice), steklo (frnikole, steklene palice), les (leseni mozniki, palice),..	Plastika (lasnice, plastične sponke, cevi, (bančne) kartice, trzalice), kovanci, Uhu Patafix,..	Guma (radirke, gumijasti trakovi), blago (klobučevina, blago, pena), papir (navaden papir, karton),..

Tabela 2: Trdi, srednje trdi in mehki material.

3.2.3. Velikost in oblika preparatov

Steffes-Holländer je jasno povzel: »Premer navoja žeblja (oz. kateregakoli preparata) ne sme biti prevelik (strune bi bile tako preveč napete) in tudi ne preozek (vijaki (oz. preparati) ne sedijo dovolj stabilno in drsijo).«

3.3. Markiranje

Predvsem pri aktivnih nekonvencinalnih klavirskih tehnikah je markiranje strun in dušilcev stalna praksa, da se med igranjem klavirja v notranjosti hitreje orientiramo. Pri preparaciji klavirja markiranje sicer ni potrebno, je pa vseeno vir največjih nestrinjanj in nevarnosti, zato to tematiko v sklopu tega članka vseeno odpiram. Kot že večkrat omenjeno, so najobčutljivejši deli klavirja, ki so tudi najbolj na udaru, dušilci in strune. Četudi Steffes-Holländer sicer pod pogojem najvišje previdnosti predlaga uporabo okroglih etiket na dušilcih, pa praksa predvsem po visokah šolah za glasbo kaže drugače. Markus Stange, profesor za klavir na Visoki šoli za glasbo Karlsruhe in specialist na področju sodobne klavirske glasbe, na svojih predavanjih poudarja, da so za markiranje dušilcev edino sprejemljivi t.i. »Post-it« listki. Pravi: »Lepilo na spodnji strani okroglih nalepk je agresivno in reagira tako z vsemi kovinskimi materiali, kot tudi kemično z barvo na dušilcih. Škoda postane vidna šele po mesecih in je ni več mogoče popraviti [...]. Oznake na dušilcih in kovinskih delih klavirja naj bodo torej narejene samo z nalepkami »Post-it«, saj so le te rahlo lepljive.« (Stange, 2024) Slednje na dušilec ne pritrjujemo s pritiskom, nanj jih samo položimo in jih po uporabi previdno odstranimo s pinceto. Opažam tudi nestrinjanja glede označevanja strun. Stange pravi, da naj za oznake na strunah uporabimo samo belo kredo za tablo. Steffes-Holländer na drugi strani

poleg krede na karbonskih strunah predlaga tudi majhne samolepilne listke za basovske strune. »Nalepke na strunah ne vplivajo na zvok med igranjem. Da se nalepke ne bi zrahljale in odpadle zaradi tresljajev strun, ki nastanejo med običajnim igranjem, po tem, ko jih začasno položim na navite bas strune, nekajkrat podrgnem z žebljem naprej in nazaj, tako da se tudi nalepka rahlo zatakne v strunine utorne vdolbine. S tem preprečim, da bi se oznaka nenamerno odlepila. Etikete se tako ali tako zelo dobro držijo jeklenih trožilnih strun.« (Steffes-Holländer, 2022) Svojo odločitev obrazloži iz vidika čiščenja, ki bo predstavljen v odlomku spodaj. Steffes-Holländer še svetuje, da za oznake na strunah vsekakor ni priporočljivo uporabljati korekturnega traka ali laka (na primer Edigs). Kasneje ga je namreč težko odstraniti. Tudi tretji vir se strinja, da je posebna previdnost potrebna pri označevanju predvsem na basovskih strunah. »Ne uporabljajte krede, barvic, flomastra, svinčnika ali česar koli, kar pušča ostanke. Priporočamo uporabo modrega slikarskega traku: narežite tanke trakove in jih s pinceto prepletite okoli strune, tako da na željenem mestu označbe oblikujete obroč. To ne vpliva na vibracije, če so obroči dovolj tanki (približno 3 do 6 milimetrov) in jih je tudi enostavno odstraniti, ne da bi za seboj pustili sledi. Namesto bakrenih strun se vedno dotaknite neposredno traku.« (Mulcahey, Mikkelsen in Taylor)

3.4. Čiščenje

Enako kot pri vstavljanjem objektov med strune, moramo tudi pri pred odstranitvijo preparatov, vedno dvignite dušilce (najlažje z desnim pedalom). Ponovno uporabimo gumijaste klinastime utišalnike, da z minimalnim trenjem odstranimo predmete iz strun.
Stange pravi, da za čiščenje oznak s kredo uporabimo mehko ščetko (lahko je tudi zobna ščetka) ter vse strune prebrišemo s suho krpo iz bombaža ali mikrovlaken, da odstranimo olje rok iz strun. Za čiščenje nikakor ne uporabimo vode, posebnih čistilnih sredstev ali drugih tekočin. Na drug strani pa Steffes-Holländer pravi, da strune lahko čistimo z visokoprocentnim detergentom ali čistilnim alkoholom (ali kirurškim špiritom) in krpico iz blaga. To velja samo za visoke strune, saj teh čistilnih sredstev ali tekočin na splošno nikakor ne smemo uporabljati na basovskih strunah. »Po mnenju Simona Schmiderja (Klavierhaus La Bianca, Offenburg) vsaka tekočina pri bakrenem navitem ovoju basovskih strun povzroči oksidacijo. Tu ni pomembno, ali tekočina izhlapeva hitro ali počasi. Ker je baker zelo občutljiv, se lahko oksidacija v utorih med finim ovojem zgodi tudi čez nekaj dni. Med oksidacijo se navitja ovoja med seboj drgnejo in strune tako zatrdijo. Iz tega razloga krede ne smejo priti v stik z basovskimi strunami. Zadovoljimo se z nalepkami ali na primer z volneno nitjo, ki jo zavozlamo okoli basovske strune na ustreznem mestu.« (Steffes-Holländer, 2022)

4. Opredlitev izsledkov študije

Študija opozarja na nevarnosti pri preparaciji klavirja in pri uporabi razširjenih klavirskih tehnik nasploh ter zanje ponuja rešitve in praktične nasvete. Literatura si je skladna pri večini elementov, predvsem pri razumevanju specifik strun, dušilcev in preparatov, neskladnosti pa

sem zasledila v odnosu do markiranja in čiščenja klavirja. Četudi vsak poudarja, da so dušilci in (predvsem basovske) strune ene izmed najbolj občutljivih delov klavirja, so si tu nasveti neenotni. Predlagala bi, da je v primeru dvomov vedno dobro izbrati opcijo, ki je bolj na varni strani, vsekakor pa je vprašanja potrebno naslavljati na odgovorno osebo za specifičen klavir in njene zahteve spoštovati.

5. Interpretacija glede na izhodiščno témo

Začetna teza, ki predpostavlja, da je prepariranje klavirja varno in neškodljivo, če se ga lotimo s previdnostjo in se opremimo z znanjem, je vsekakor potrjena. Članek najprej preko razlage mehanike in sestave klavirja ponudi razumevanje, kje sploh utegnejo biti morebitne komplikacije, nato pa vsako občutljivo situacijo posebej obravnava in zanje poda varne rešitve. Ponudi jasne smernice in vrsto predlogov, kako se lotevati raziskovanja sodobnega klavirskega zvoka in s tem odgovarja na strahove in predsodke do preparacije, ki so omenjeni v uvodu.

6. Omejitve in nadaljna obravnava pojava

Čeprav članek dobro detaburizira sodobni klavir, vidim možnost dodatne raziskave in potenotenja informacij predvsem v askpektu markiranja delov klavirja in čiščenja. Pričujoča raziskava se je fokusirala na osnove varne uporabe pasivnih nekonvencionalnih klavirskih tehnik, kar pa je le majhen del sveta vseh razširjenih klavirskih tehnik. Obstaja prostor, da se v nadaljnih prispevkih osredotoči tudi na aktivne nekonvencionalne klavirske tehnike, kasneje pa tudi na tiste tehnike na meji s konvencionalnim in nekonvencionalnim. Dobrodošla bi bila tudi ločena raziskava klavirja in njegove uporabe ob pojavu elektroakustične glasbe.

7. Literatura

1. Klaus Steffes-Holländer. Nicht nur an Tasten. Neue Spieltechniken für Klavier. Wiesbaden, 2022.
2. Monika Fürst-Heidtmann. Das präparierte Klavier des John Cage. Kassel, 1979.
3. Richard Bunger. The well-prepared piano. Colorado College Music Press, 1973
4. Gabriel Weinreich. Die Physik der Musikinstrumente. Gekoppelte Schwingungen von Klavierseiten. Heidelberg, 1988.
5. Ted Mulcahey, Mark Mikkelsen, Phil Taylor. Guide to piano preparations + extended technique, etc. College of Music, University of Colorado Boulder. https://www.colorado.edu/music/sites/default/files/attached-files/guide_to_piano_preparation.pdf
6. Jean-François Proulx. (2009). A Pedagogical Guide to Extended Piano Techniques. Temple University Libraries. https://scholarshare.temple.edu/bitstream/handle/20.500.12613/2193/Proulx_temple_0225E_10111.pdf?sequence=1&isAllowed=y
7. Slovar slovenskega knjižnega jezika: druga knjiga: I-Na. (1975). Ljubljana: Državna založba Slovenije.

GLAS IN GOVOR PRI STAROSTNIKIH

Marjeta Nahtigal, Eva Podgornik, Maja Vidmar
Mentor in recenzent: prof. dr. Hotimir Tivadar

Povzetek

Zaradi napredka v medicini in zdravljenja ter preprečevanja bolezni se število starostnikov z vsakim dnem povečuje. Vzporedno z višjo starostjo pa se veča tudi število posameznikov, ki se srečujejo z boleznimi, značilnimi za tretje življenjsko obdobje. Mednje poleg različnih degenerativnih, nevroloških in ostalih bolezni spadajo tudi različne motnje glasu, govora, komunikacije in jezika. Poznavanje glasu in govora pri starostnikih ter motenj, povezanih z njima, bo v prihodnosti pri delu s starejšimi čedalje pomembnejše.

S starostjo in upadom telesnih funkcij se povečajo tudi težave na področju glasu in govora, kar pomembno vpliva na komunikacijo in kvaliteto življenja starostnikov. Prav zato smo se v prispevku osredotočili na analizo glasu in govora pri starostnikih, s čimer lahko omogočimo uspešnejše prepoznavanje težav na tem področju in sočasno tudi bolj uspešno pomoč in terapijo.

V empiričnem delu so prvotno opredeljene različne kategorije, ki smo jih v omenjenem delu seminarske naloge analizirali: akustične značilnosti govora, kakovost glasu, fluentnost, smiselnost oz. kontekstualna prilagodljivost ter razumljivost. V zadnjem delu prispevka smo vse kategorije, ki smo jih analizirali, primerjali med seboj ter zapisali zaključne ugotovitve.

Ugotavljamo, da glas in govor starostnikov v večini analiziranih kategorij odstopata od normativnih vrednosti za posamezne značilnosti. V vzorcu, zajetem v empiričnem delu, je pogostost glasovnih motenj visoka. Hitrost govora je bila opazno nizka, hitrost artikulacije malenkost boljša, toda še vedno je odstopala od povprečnih vrednosti za slovenščino. Fluentnost govora je bila posledično dokaj slaba. Odstopanja so bila zaznana tudi na področju smiselnosti in razumljivost govora, ki smo ju analizirali s pomočjo subjektivnega ocenjevanja.

1 Uvod

Starost je po merilih Svetovne zdravstvene organizacije opredeljena kot obdobje nad 65 let. Opisana je kot posledica staranja, ki je fiziološki proces, pri katerem poteka postopno zmanjšanje učinkovitosti delovanja bioloških procesov in funkcij organizma. Staranje zaradi psihofizičnih sprememb pomembno vpliva na telesne, motorične, mentalne ter socialne sposobnosti posameznika. Telesne spremembe se kažejo na koži, okostju, mišičju, delovanju notranjih organov, torej srca, ožilja, dihal in živčevja ter ostalih organskih sistemov, [1,2].

Glasovne motnje delimo na funkcionalne, ki nastanejo zaradi napačne rabe glasu, in organske, ki so posledica strukturne okvare. Poleg tega se v raziskavi osredotočamo tudi na govorne

motnje, ki jih opredelimo, kot nezmožnost posameznika tvoriti govor ali pa je njegov govor slabo razumljiv zaradi artikulacijskih težav oziroma težav na področju fluentnosti. Pogosto se pri govoru starostnikov srečujemo tudi z jezikovnimi motnjami, ki so najpogosteje opisane kot afazije in so posledica možganske poškodbe. Pri jezikovnih motnjah prihaja do težav na področju fonologije, morfologije, sintakse, semantike in pragmatike tako na področju razumevanja kot tudi na ekspresivnem področju jezika, [3,4].

Glas, govor in jezik imajo veliko vlogo v življenju vsakega posameznika. Govorne, jezikovne in glasovne motnje lahko zato pomembno vplivajo na kakovost posameznikovega življenja. Kar med 4,8 % in 29,1 % oseb, starejših od 60 let, se sooča z glasovnimi težavami. Omenjene motnje neugodno vplivajo na neodvisnost starostnika, njegovo aktivno vključenost v socialno okolje ter posledično kakovost njegovega življenja, zato jih je treba čim prej prepoznati in bolniku zagotoviti pomoč, [5].

Pri zdravljenju glasovnih, govornih in jezikovnih motenj ter rehabilitaciji sodeluje tudi logoped. Za ustrezno ukrepanje mora poznati značilnosti glasu, govora in jezika ter prepoznati, v katerem primeru odstopajo od normativnih vzorcev. Prav to je bilo naše vodilo pri izvedbi raziskave. Želeli smo bolj poglobljeno prepoznati in dokazati posamezne značilnosti govora in glasu starostnikov, ki bi lahko pomembno pripomogle pri nadaljnjih raziskovanjih na tem področju, ob enem pa služile kot dodatno vodilo za strokovnjake, ki sodelujejo pri obravnavi starejših. S pridobivanjem novih podatkov in informacij o značilnostih glasu v tej starostni skupini smo želeli obogatiti dosedanje skromno raziskovanje in pridobljene informacije na tem področju, [5].

Značilnosti, ki smo jih analizirali v raziskavi, so akustične značilnosti govora, kakovost glasu, fluentnost, smiselnost ter razumljivost. Izmerili smo rezultate starostnikov v raziskavi in odstopanja od normativnih rezultatov iz literature ter na podlagi analize opisali in predstavili osnovne značilnosti govora starejših. Ker se mnogo starostnikov sooča z različnimi nevrološkimi motnjami, nas je zanimalo tudi, na kakšen način le-te vplivajo na produkcijo glasu, govora in jezika ter v kakšni meri narekujejo odstopanje od normativnih rezultatov.

2 Metode dela in potek raziskave

2.1 Potek raziskave

V raziskavi je sodelovalo 14 starostnikov. Pet posnetkov smo zaradi slabše kakovosti izločili iz analize. Vsi testiranci so bili starejši od 75 let, najstarejša govorka pa je bila stara 102 leti. Struktura po spolu ni bila uravnotežena, saj je bilo v vzorcu šest ženskih govork in trije moški govorci. Vsi razen govorke 3 in govorke 5 so imeli tudi pridružene nevrološke bolezni ali motnje

- prisotnost demence, Parkinsonove bolezni ali pa možganske kapi, same diagnoze posameznega govorca pa zaradi varstva osebnih podatkov v raziskavi nismo uporabili.
Podatke za analizo smo zbrali med vodenjem delavnice na temo glasu, govora in jezika v enem izmed domov starejših občanov, ki smo jo izvedle decembra 2023. Analizo govora smo opravili na podlagi snemanja prostega govora testirancev. Govor testirancev smo okrepili z uporabo mikrofona in zvočnika. Pri tem smo zagotovili standardne in enakovredne pogoje za vse testirance, saj smo držali mikrofon na primerni dolžini 10 – centimetrov od govorčevih ust, snemanje pa je ves čas potekalo na istem mestu, na razdalji približno dva metra od zvočnika. Uporabo mikrofona in zvočnika smo upoštevali pri analizi rezultatov (posebej pri analizi jakosti glasu).

2.2 Metodologija

Pri merjenju in analiziranju vzorcev smo uporabili kvalitativni pristop, saj smo subjektivno, klinično ocenjevali in opisovali glas in govor starostnikov. Ob tem smo si za analizo akustičnih značilnosti glasu, ki bodo opisane v nadaljevanju, pomagali z instrumentalno analizo v programu Praat, za oceno kakovosti glasu pa z ocenjevalno lestvico GIRBAS. Pri prikazu rezultatov smo se osredotočili na analizo pridobljenih meritev testirancev in primerjavo le-teh z normativnimi vrednostmi iz literature. S tem smo želeli določili splošne značilnosti govora starostnikov znotraj svojega vzorca testirancev.

Po pridobitvi posnetkov smo se osredotočili na analizo glasu in govora posameznega testiranca. Opredelili smo pet glavnih kategorij opazovanja, ki so podrobneje opisane v nadaljevanju: akustične značilnosti govora (HNR, jitter, shimmer), jakost glasu, kakovost glasu, fluentnost, smiselnost in razumljivost. Pri analizi smo se opirali na objektivno ocenjevanje v programu Praat, ocenjevanje z lestvico GIRBAS, izračun hitrosti govora in fluentnosti ter subjektivno oceno smiselnosti in razumljivosti. V poglavju z rezultati smo nato znotraj vsake od kategorij prikazali rezultate testirancev in primerjavo z vrednostmi iz literature ter tako opredelili možna odstopanja.

2.2.1 Akustične značilnosti govora

Z akustično analizo glasu in govora, ki se jo opravi z različnimi računalniškimi programi za merjenje govora (na primer Praat), se lahko na objektiven način izmeri določene značilnosti glasu in govora. Tako se lahko natančno izmeri F0 (osnovna frekvenca) in njen razpon, formanti, jitter, shimmer, HNR, SPI, nivo jakosti, hitrost in druge parametre. Akustične meritve se opravlja na podlagi kakovostnih posnetkov, pridobljenih z ustrezno snemalno opremo in brez hrupa iz okolice. Najpogosteje se akustično analizo izvede, da bi pridobili informacije o fiziologiji glasilk in tako podkrepili perceptivno oceno glasu. Jitter opisuje motnjo oziroma spreminjanje višine glasu, kar bi lahko poimenovali frekvenčna nestabilnost. Shimmer pa pomeni motnjo spreminjanja amplitude glasu, kar lahko v slovenščini imenujemo intenzitetna

nestabilnost. Obe značilnosti sta merjeni pri podaljšani fonaciji samoglasnika, povezani pa s hripavostjo ter hrapavostjo. Parametra sta izražena v odstotkih (%). HNR (angleško harmonic-to-noise ratio) pomeni razmerje med periodičnimi in neperiodičnimi komponentami glasu (razmerje med tistimi deli glasu, ko je vibriranje glasilk prisotno in deli, ko ni prisotno). Opisuje, koliko zraka, izdihnjenega iz pljuč, se pretvori v glas. Vrednost se izraža v dB. Nivo jakosti je akustična mera, katere enota je decibel (dB). Nanjo vpliva oddaljenost govorca od mikrofona, govorna oz. glasovna naloga, nivo hrupa v okolju in osnovna frekvenca govorca. Povezana je s perceptivno mero, to je glasnostjo, ki meri fiziološki občutek glasnosti. Pri moških je nivo glasnosti običajno nekoliko višji kot pri ženskah, [5,6,7].

2.2.2 Kakovost glasu

Za kakovosten glas morajo biti dihala zdrava z dobro kontroliranim izdihom. Prav tako morajo biti zdravi in normalno delujoči grlo in artikulacijski organi. Kakovost glasu se lahko meri na nivoju percepcije ali pa z akustični parametri. Na nivoju percepcije je ocena subjektivna. Abnormalno kakovost glasu se ocenjuje s pomočjo GIRBAS lestvice. Le-ta ocenjuje naslednje parametre: stopnjo hripavosti, nestabilnost glasu, hrapavost glasu, zadihanost, šibkost ter stisnjenost. Strokovnjak vsak parameter oceni na podlagi analogne vizualne lestvice (na črti, katere en konec pomeni biti brez glasu, drugi pa najboljši možen glas, označi, kakšen je bolnikov glas) ali pa s pomočjo ene od štirih ocen (0 – ni prisoten, 1 – je prisoten v blagi obliki, 2 – je prisoten v srednje hudi obliki, 3 – prisoten v hudi obliki), [5].

2.2.3 Fluentnost

Motnje fluentnosti so prekinitve govora v obliki zastojev, podaljševanj in ponavljanj določenih zlogov oz. besed. Fluentnost govora smo raziskali tako, da smo analizirali različna področja govora, ki so povezana s fluentnostjo. Mednje spadajo hitrost govora in artikulacije, premori v govoru, mašila ter ponavljanje glasov, zlogov in besed. Hitrost govora po navadi podajamo v zlogih na sekundo (zl/s), za branje se uporablja tudi enota beseda na sekundo (b/s ali b/min). Glede na vpliv premorov na hitrost govora ločimo hitrost govora (v nadaljevanju HG) in hitrost artikulacije (v nadaljevanju HA). HG se računa glede na vsoto dolžine vseh nepogrešljivih delov govora, to pomeni izgovora zlogov in tihih ter zapolnjenih premorov, HA pa le na podlagi dolžine izgovora zlogov, torej izključujoč premore, [8].

2.2.4 Smiselnost (kontekstualna prilagodljivost)

Govor je smiseln, kadar je njegova vsebina razumljiva in doseže učinkovito komunikacijo med govorcem in poslušalcem. Je tudi prilagojen trenutnemu kontekstu in okoliščinam, relevanten ter jasen, [9].

2.2.5 Razumljivost

Govor je razumljiv, ko poslušalci uspejo prepoznati in interpretirati izrečene besede ter razumeti sporočilo govorca. Govorec mora besede izgovarjati jasno in razločno, pomembna je pravilna artikulacija, [9].

3 Rezultati

3.1.1 PRIMERJAVA AKUSTIČNIH PARAMETROV

V spodnji tabeli so prikazani statistični podatki o številu normativnih in patoloških vrednosti posameznih akustičnih parametrov. Vrednost shimmra je bila pri vseh devetih govorcih znotraj normativnih meja, torej je bila pri vseh govorcih višja od 3,81 %. Vrednost jitterja je bila pri štirih testirancih od devetih normativna, torej pod 1,04 %, [10]. Parameter HNR je bil nad normativno mejo 20 dB pri dveh testirancih, [5]. Glede na to lahko sklepamo, da so prisotne določene spremembe in specifike pri glasu starejših, kar smo v nadaljevanju potrdili tudi s perceptivno oceno kakovosti glasu po GIRBAS lestvici. Povprečni HNR testirancev je nižji od normativne vrednosti, ki je enaka ali višja od 20 dB, in kaže na porušeno ravnovesje med periodičnimi in neperiodičnimi komponentami glasu, ki je posledično zelo zadihan.

Tabela 1: število normativnih in patoloških akustičnih vrednosti v vzorcu

	Normativna vrednost		Patološka vrednost	
	Število testirancev	Odstotek (%)	Število testirancev	Odstotek (%)
HNR	2	22,22	7	77,78
Jitter	4	44,44	5	55,55
Shimmer	9	100	0	0

3.2 PRIMERJAVA JAKOSTI GLASU

Povprečna jakost glasu pri ženskih govorkah znaša 76,93 dB, kar je glede na oddaljenost mikrofona pri raziskavi ustrezno glede na starost testirancev (mikrofon je bil od ust govorcev oddaljen 15 cm). Standardni odklon pri ženskih govorkah je 4,39 dB. Povprečna jakost glasu pri moških govorcih znaša 81,28 dB, kar prav tako ustreza podatkom iz prejšnjih raziskav. Standardni odklon pri moških govorcih je 2,31 dB. Noben izmed govorcev oz. govork pri jakosti glasu ni imel rezultata, ki ne bi ustrezal povprečnim vrednostim iz že izvedenih raziskav, [7]

3.2.1 PRIMERJAVA OCENE KAKOVOSTI GLASU

Skupno število točk na GIRBAS lestvici je 18 točk, to predstavlja najslabši možni glas oziroma maksimalno prisotnost vseh ocenjevanih komponent glasu. Povprečna ocena oziroma

povprečen seštevek točk, ki so jih dosegli testiranci v našem vzorcu na lestvici, je 8,11, s standardnim odklonom 2,37. To kaže na pogosto prisotnost glasovnih motenj v starosti znotraj našega vzorca.
Najvišja določena vrednost je bila pri govorcu 8, ki je dosegel 13 od 18 možnih točk. Najbolje pa smo z lestvico ocenili glas govorke 2, ki je dosegla skupno 5 točk.

3.2.2 PRIMERJAVA FLUENTNOSTI

Tekočnost govora smo objektivno ocenjevali z izračunom hitrosti govora in artikulacije. Povprečna hitrost govora je znašala 2,31 zloga na sekundo, standardni odklon ob tem je bil 0,88. Ob primerjavi pridobljene povprečne vrednosti vzorca starostnikov in normativne hitrosti govora v slovenščini iz literature, ki znaša med 4,5 in 6,5 zlogov na sekundo [11], lahko ugotovimo, da gre pri našem vzorcu za pomembno zmanjšano hitrost govora, ki odstopa za več kot 2 zloga na sekundo od normativne vrednosti, to je 50 % počasnejši govor starostnikov.
Povprečna hitrost artikulacije pri govorcih v vzorcu znaša 3,15 zlogov na sekundo s standardnim odklonom 1,02. Tudi hitrost artikulacije je pomembno nižja od normativne vrednosti, navedene v literaturi, ki znaša 5,8 zlogov na sekundo, [8].

Tabela 21: tabela hitrosti govora in artikulacije s povprečjem in standardnim odklonom v vzorcu

	hitrost govora [zl/s]	**hitrost artikulacije [zl/s]**
govorka 1	2,1	3
govorka 2	1,6	2
govorka 3	4,1	4,5
govorka 4	2,44	3,54
govorka 5	2,5	3,2
govorka 6	2,2	4
govorec 7	3,07	3,99
govorec 8	1,1	1,3
govorec 9	1,69	2,85
povprečje	**2,31**	**3,15**
standardni odklon	**0,88**	**1,02**

Glede na razliko med povprečno hitrostjo govora in hitrostjo artikulacije, ki znaša 0,85 zloga na sekundo, lahko sklepamo, da so premori, ki smo jih perceptivno zaznale, eden od glavnih dejavnikov, ki vplivajo na tempo in tekočnost govora ter komunikacije starejših. Prav zato, ker so bili premori pri večini govorcev pogosti in dolgi, smo pričakovali, da bo povprečna hitrost artikulacije hitrejša od rezultatov, ki smo jih dobile. Iz tega lahko sklepamo, da premori niso

edini dejavnik, ki zmanjša tekočnost govora starejših, temveč je tudi sam tempo oziroma hitrost govora nižja.
Glede na pridobljene podatke, ki odstopajo od normativnih vrednosti, receptivno oceno premorov, ponavljanja posameznih besed in zlogov ter fluentnost lahko za naš vzorec sklepamo, da je govor starostnikov pomembno upočasnjen. Kljub temu smo govor večine govorcev ocenile kot fluenten, saj ni bilo izrazitih ponavljanj in zastojev v govoru. Kot nefluenten smo ocenile govor govork 1, 5 in 6 ter govorca številka 8.

3.2.3 PRIMERJAVA OCENE SMISELNOSTI IN RAZUMLJIVOSTI

S pomočjo subjektivnega ocenjevanja smo opredelile še razumljivost in smiselnost govora testirancev. Govor petih testirancev od devetih smo ocenile kot smiseln.
Smiseln je bil govor govork 1, 3, 5 in 6 ter govorcev 7 in 8. Tako smo ga ocenili zato, ker je bil odgovor na vprašanje logičen in ustrezen, govorka oziroma govorec pa je govoril dovolj samostojno in ni oziroma skoraj ni potreboval dodatnih podvprašanj.
Smiseln ni bil govor govork 2 in 4 ter govorca 9. Govorki in govorec so ali začeli govoriti o popolnoma drugi temi, kot je zahtevalo vprašanje, ali pa vsebine govora zaradi nerazumljivosti sploh ni bilo možno zaznati (fonetično-fonološki razlogi).
Kot razumljivega smo ocenili govor govork 1, 3, 4, 5 in 6 ter govorcev 7 in 8. V razumljivosti pa so se tu in tam vseeno pojavljala odstopanja. Mestoma so bile prisotne omisije, substitucije ali distorzije določenih glasov. Večkrat je prišlo tudi do nerazločne izgovorjave besede ali stavka. Sklepamo, da je imela določen vpliv na nerazločno artikulacijo tudi uporaba protez, vendar tega dejavnika nismo preverjale, saj smo bile s testiranci prekratek čas.
Govora govorke 2 in govorca 9 nista bila razumljiva, pri obeh je šlo le za nabor glasov, katerih vsebine ni bilo mogoče razumeti, meje med glasovi in besedami niso bile jasne, artikulacija je bila zelo omejena. Kljub temu pa sta oba upoštevala osnovna navodila menjave vlog v komunikaciji, saj sta počakala, da je testator v celoti postavil vprašanje, in šele nato začela odgovarjati. Pri obeh sklepamo na doživetje možganske kapi in posledično globalno afazijo.

4 Zaključki

Sklepne ugotovitve in značilnosti našega vzorca na podlagi empiričnega dela so, da glas in govor starostnikov v večini opredeljenih lastnosti v večji ali manjši meri odstopa od normativnih vrednosti za posamezne značilnosti. Na podlagi odstopanj v akustičnih vrednosti (HNR in jitter) in visokih ocen na GIRBAS lestvici ocenjevanja kakovosti glasu sklepamo, da je pri starostnikih v našem vzorcu prisotnost glasovnih motenj pogosta. Pomembno upočasnjen je bil glede na izračun hitrosti govora tudi tempo govorcev, ki je skupaj s povišano frekvenco in dolžino premorov ter pogostimi ponovitvami posameznih besed ali zlogov pomembno vplival na zmanjšano fluentnost govora testirancev. S subjektivnim ocenjevanjem razumljivosti in smiselnosti govora testirancev smo zaznale zmanjšane sposobnosti tudi na tem področju, kar povezujemo tudi s pogostimi dodatnimi nevrološkimi boleznimi v vzorcu.

Seminarsko delo in pridobljeni rezultati predstavljajo uvid v značilnosti govora starostnikov in so lahko spodbuda za nadaljnje raziskovanje na tem področju. Možnosti za izboljšave in natančnejšo analizo je veliko – zagotovo je treba za pridobivanje bolj splošnih in značilnih podatkov povečati vzorec testirancev. Ob ponovni izvedbi bi več poudarka namenili pridobivanju posnetkov, tako s povečanjem korpusa za analizo. Posneli bi tudi druge mere pri govoru testirancev – poleg prostega govora bi lahko dodali še dolgo fonacijo glasu /a/ in izračun fonacije zvenečega /z/ ter nezvenečega /s/. Tako bi pridobili še več podatkov o glasu in govoru starostnikov in bi bila naša analiza bolj poglobljena. V prihodnje bi bilo za nadgradnjo teh podatkov dobro pripraviti tudi perceptivne teste za ocenjevanje glasu in govora starostnikov, saj smo zdaj perceptivno subjektivno oceno pri posameznih parametrih podali le raziskovalci.

5 Literatura

[1] Accetto, Bojan, 1968*:* Staranje, starost in starostno varstvo. Ljubljana: Rdeči Križ.

[2] Kambič, Tim in Doupona Topič, Mojca, 2016: Telesna in kognitivna aktivnost starostnikov v dnevnih centrih aktivnosti v Ljubljani. Šport 64/(3-4), 107-114.

[3] Hill, Elisabeth, 2001: Non-specific nature of specific language impairment: a review of the literature with regard to concomitant motor impairments. International Journal of Language & Communication Disorders 36/2, 149–171.

[4] Marot, Valerija, Jelenc, Nika in Korošec, Barbara, 2018: Govorne motnje v otroštvu: razvrščanje govornih motenj pri slovenskih otrocih. Rehabilitacija 17/2, 50-58.

[5] Hočevar Boltežar, Irena, 2020: Patologija glasu ter izbrana poglavja iz patologije govora. Ljubljana: Pedagoška fakulteta.

[6] Zhang, Cong, Jepson, Kathleen, Lohfink, Georg in Arvaniti, Amalia, 2021: Comparing acoustic analyses of speech data collected remotely. Journal of the Acoustical Society of America 149/6, 3910–3916.

[7] Hodge, Sean, Colton, Raymond in Kelley, Richard, 2001: Vocal intensity characteristics in Normal and Elderly speakers. Journal of Voice, 15/4, 503–511.

[8] Scuteri, Lucia Gaja, 2019: Variabilnost hitrosti artikulacije v slovenščini: preliminarna raziskava. Tivadar, Hotimir (ur.): Slovenski javni govor in jezikovno-kulturna (samo)zavest. Ljubljana: Znanstvena založba Filozofske fakultete.

[9] Relaño Iborra, Helia in Dau, Torsten, 2022: Speech intelligibility prediction based on modulation frequency-selective processing. Hearing Research 426/108610.

[10] Williamson, G. (2017). Acoustic measures (Norms). SLT Info. <https://www.sltinfo.com/acoustic-measures-norms/> (Dostop 7. 1. 2024).

[11] Tivadar, Hotimir, 2017: Speech rate in Phonetic -Phonological Analysis of public speech (Using the example of political and media speech). Jazykovedný Časopis 68/1, 37–56.

UPORABA METODE GUNNAR FARNEBÄCK OPTIČNEGA TOKA ZA IDENTIFIKACIJO POMIKOV V MEHANSKIH PROCESIH

Hana Omahen

Povzetek

Identifikacija pomikov v mehanskih procesih je ključnega pomena za zagotavljanje delovanja mehanskih sistemov z visoko stopnjo natančnosti, zgodnje zaznavanje odstopanj od pričakovanih vrednosti, s tem preprečevanje napak, ter za zagotavljanje varnosti. Podatki o pomikih imajo pomembno vlogo tudi pri razvoju novih tehnologij in izboljšav obstoječih sistemov. Metode optičnega toka so eden od načinov identifikacije pomikov v mehanskih procesih. Z njimi skozi analizo sivinskih slik izračunamo optični tok med slikami. V uporabi so predvsem metode redkega optičnega toka, ki izračunajo optični tok le za izbrane slikovne elemente. Z uvedbo Gunnar Farnebäck metode namesto metod redkega optičnega toka lahko naenkrat izračunamo optični tok za vse slikovne elemente slike, saj je to metoda gostega optičnega toka. Cilj raziskave je bil določiti učinkovitost in natančnost metode Gunnar Farnebäck pri identifikaciji pomikov v mehanskih procesih ter ugotoviti, ali lahko proučevana metoda zamenja trenutno uporabljane metode. Na podlagi izvedenega sintetičnega eksperimenta smo ugotovili, da z metodo Gunnar Farnebäck pri določanju pomikov z amplitudami pod 1 slikovnim elementom dobimo primerljive rezultate kot z uveljavljenimi metodami.

1 Uvod

Mehanski procesi pogosto vključujejo kompleksne in hitre premike, kjer je natančna identifikacija ključna za zagotavljanje kakovosti in varnosti. V zadnjih nekaj desetletjih se je močno povečalo število raziskav na področju brezkontaktnih merilnih tehnik [1].

Metode optičnega toka so ene izmed brezkontaktnih merilnih metod, ki se uporabljajo za analizo zaporednih slik in izračun pomikov med njimi. Optični tok je porazdelitev navideznih hitrosti premikanja svetlobnih vzorcev na sliki. Pojavi se lahko zaradi relativnega gibanja opazovanih objektov in opazovalca. Predstavlja informacije o prostorski razporeditvi opazovanih objektov in njeni hitrosti spreminjanja. Spreminjanje razporeditve oz. premike lahko pridobimo s primerjavo dveh zaporednih slik. Metode ločimo glede na to, ali izračunavajo redek optični tok (ang. *sparse optical flow*) ali gost optični tok (ang. *dense optical flow*). Razlika je v tem, da je redek optični tok izračunan le za določene slikovne elemente, gost pa je izračunan za vse

slikovne elemente slike, kar je posledično tudi počasneje.
Metoda optičnega toka Lucas-Kanade je priznana kot metoda redkega optičnega toka z dobro natančnostjo in je bila uspešno sprejeta v laboratorijskih in terenskih poskusih [2] ter je trenutno široko uporabljana. Za razliko od metode Lucas-Kanade je Gunnar Farnebäck metoda ena izmed metod, ki izračunava gost optični tok med dvema slikama. Doslej je bila ta metoda uspešno uporabljena v različnih aplikacijah, kot so zaznavanje vozil pri spremljanju prometa [3], analiza športnih posnetkov in spremljanje premikov v medicinskih diagnostičnih postopkih [4]. Kljub obsežni uporabi te metode na različnih področjih, njena uporaba v specifičnem kontekstu mehanskih procesov še ni bila temeljito raziskana.
Namen te raziskave je proučiti, kako učinkovito lahko metoda Gunnar Farnebäck identificira pomike v različnih mehanskih procesih in ali lahko v določenih primerih zamenja druge trenutno uporabljane metode optičnega toka. Z uporabo metode gostega optičnega toka namesto redkega lahko namreč dobimo boljšo oceno celotne transformacije, saj temelji na večjem številu vektorjev toka, s čimer se napaka zmanjša. Z razširitvijo uporabe Gunnar Farnebäck metode bi lahko izboljšali natančnost in zanesljivost meritev ter s tem odprli možnosti za nadaljnje raziskave in razvoj novih tehnologij.

2 Teoretično ozadje

Večina metod optičnega toka temelji na dveh predpostavkah [5]:

1. **Predpostavka o konstantni svetlosti**
   predpostavlja, da slikovni elementi ohranjajo enako intenziteto (I) med zaporednimi slikami oz. element kljub premikom iz enega na drug položaj ohranja konstantno svetlost:

   $$I(x, y, t) = I(x + dx, y + dy, t + dt). \tag{1}$$

2. **Predpostavka o prostorski gladkosti**
   temelji na tem, da sosednji slikovni elementi običajno pripadajo isti površini in imajo zato podobno gibanje. S tem je optični tok prostorsko gladek in brez nenadnih sprememb.

Algoritem metode Gunnar Farnebäck z uporabo polinomske razširitve aproksimira intenziteto okolice vsakega slikovnega elementa s polinomom. Zanimajo nas kvadratni polinomi:

$$f(\mathbf{x}) \sim \mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{b}^T \mathbf{x} + c, \tag{2}$$

ki v lokalnem koordinatnem sistemu podajo lokalni intenzitetni model [6] in omogočajo natančno aproksimacijo sprememb v intenziteti. $\mathbf{A}$ je simetrična matrika, $\mathbf{b}$ vektor, c skalar in $\mathbf{x}$ vektor koordinat položaja v slikovnem prostoru. Koeficienti so ocenjeni z metodo uteženih najmanjših kvadratov glede na okoliške vrednosti intenzitete posameznega slikovnega elementa. Polje premikov je nato določeno z opazovanjem, kako se polinom spreminja pod translacijo med

dvema zaporednima slikama. Najboljši pomik za vsak slikovni element je določen iterativno z minimizacijo vsote kvadratov razlik med predvidenimi in dejanskimi intenzitetami. Rezultat algoritma je optični tok, ki predstavlja polje premikov za vse slikovne elemente slike [5] ter daje informacije o smeri in hitrosti gibanja objektov v zaporedju slik [7], [8].
Pri izračunu premika metoda upošteva predpostavko, da se polje premikov počasi spreminja, saj lahko s to predpostavko zmanjša šum. Problem prevelikih premikov se pojavi tudi pri kasnejšem reševanju enačb z iteracijami. Glavna slabost algoritma je torej predpostavka o počasi spreminjajočem se polju premikov, ki povzroča glajenje prekinitev. Rešitev predstavlja združevanje algoritma z vzporednim postopkom segmentacije [6], [9].

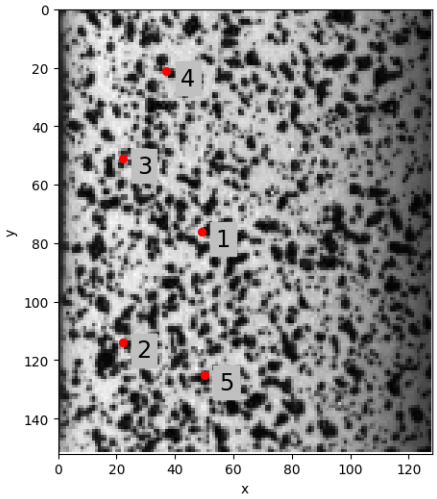
3 Metode dela in potek raziskave

3.1 Sintetični eksperiment

Pri sintetičnem eksperimentu smo simulirali različne željene pomike in tako preizkusili metodo v nadzorovanem okolju. S tem smo zagotovili natančno primerjavo rezultatov z dejanskimi pomiki, saj so referenčne vrednosti znane. Glede na to primerjavo nato ocenjujemo zanesljivost uporabljene metode in njene omejitve.
Najprej smo ustvarili tri sintetične posnetke z znanimi pomiki med posameznimi slikami na način, ki je opisan v prispevku [10]. Za ustvarjanje posnetka smo uporabili sliko, narejeno z uporabo odprtokodnega Python paketa speckle_pattern [11], ki smo jo pomikali v smeri x in y za vnaprej določene pomike. Eksperiment smo izvedli s tremi posnetki oz. za tri različne pare sinusnih funkcij pomika v smeri x in y, ki se med seboj razlikujejo glede na velikost amplitude. Predpisani pari funkcije pomika in intervali velikosti pomikov med zaporednimi slikami [slikovni el.]:

- večji pomiki: $x = 3\sin(2\pi t)$ [0.0472, 0.3760], $y = 3\sin(4\pi t)$ [0.0472, 0.7520];
- srednji pomiki: $x = 0.25\sin(2\pi t)$ [0.0039, 0.0313], $y = 0.25\sin(4\pi t)$ [0.0039, 0.0627];
- majhni pomiki: $x = 0.05\sin(2\pi t)$ [0.00079, 0.00627], $y = 0.08\sin(4\pi t)$ [0.00126, 0.02005].

Nato smo izvedli določanje pomikov sintetičnega posnetka s tremi različnimi metodami: Gunnar Farnebäck (OpenCV[12]), Lucas-Kanade (OpenCV [12]) in Lucas-Kanade (pyIDI [13]). Pomiki so izračunani kot povprečna vrednost pomikov petih značilnih točk začetne slike posnetka, s čimer zmanjšamo šum, ki bi ga lahko dobili pri sledenju samo ene točke. Na sliki 1 so oštevilčene in z rdečo piko prikazane izbrane točke sledenja.
Gunnar Farnebäck metoda optičnega toka izračunava gost optični tok. S to metodo se tako izračuna optični tok za vse slikovne elemente slike in izbira posameznih točk sledenja ni potrebna. Izbiro točk sledenja smo izvedli, saj drugi dve metodi, s katerima bomo primerjali rezultate, izračunavata pomike samo za posamezne točke.



Slika 1: Izbrane točke sledenja na začetni sliki.

Za vsako izmed uporabljenih metod smo na koncu ocenili merilno negotovost glede na predpisane vrednosti pomika. Glede na primerjavo točnih vrednosti pomika z rezultati metod smo izračunali napako, absolutno in relativno napako ter standardno deviacijo napak posamezne metode. Napako predstavlja razlika med referenčno vrednostjo in izmerjeno vrednostjo.

Napako e smo izračunali po enačbi (3), kjer je p_{ref} vrednost predpisanega pomika v določenem časovnem trenutku in p izmerjena vrednost:

$$e = p_{ref} - p. \tag{3}$$

Absolutno napako ϵ smo izračunali po enačbi (4) kot absolutno vrednost enačbe (3):

$$\epsilon = |p_{ref} - p|. \tag{4}$$

Glede na zgoraj izračunano absolutno napako ϵ in predpisano vrednost pomika p_{ref} smo z enačbo (5) izračunali relativno napako δ:

$$\delta = \frac{|p_{ref} - p|}{p_{ref}}. \tag{5}$$

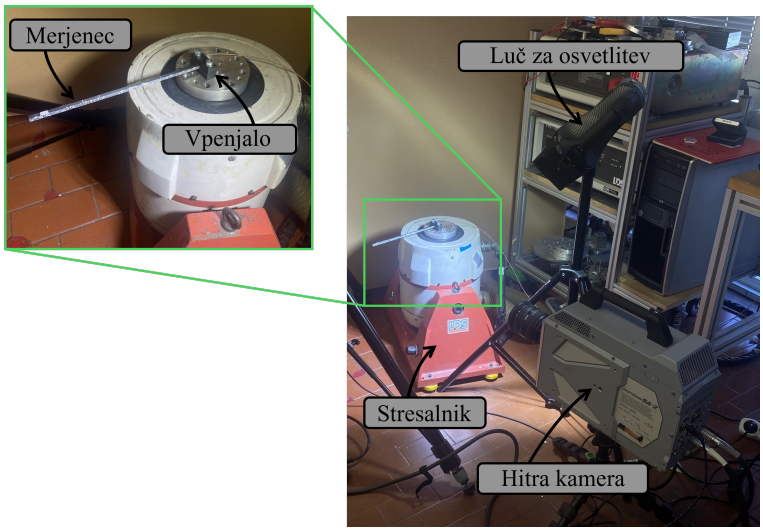
Standardno deviacijo napak σ smo izračunali po enačbi (6), kjer je e_i napaka v določenem časovnem trenutku, $\bar{e}$ povprečje napak ter N število vseh napak:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i |e_i - \bar{e}|^2}{N}}. \tag{6}$$

3.2 Eksperiment s hitro kamero

Da bi preverili uporabo metode Gunnar Farnebäck za identifikacijo pomikov tudi na realnem eksperimentu, smo si zamislili eksperiment s hitro kamero. Spodnja slika 2 prikazuje eksperimentalno postavitev.

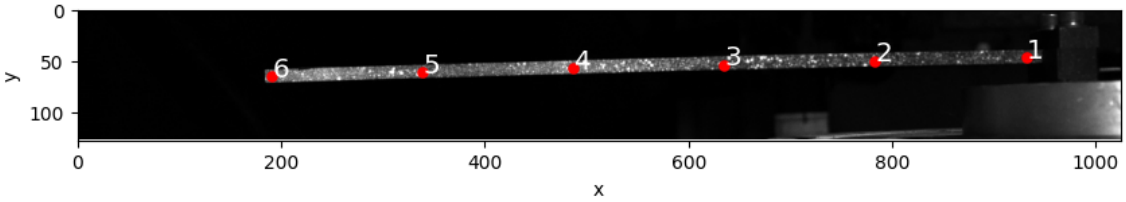
Najprej smo pripravili 3D natisnjen nosilec ter zgornji in spodnji del vpenjalne čeljusti. Tako kot pri sintetičnem eksperimentu, je tudi tukaj pomembno, da ima opazovana površina zadosten kontrast sivinskih vrednosti, saj je ta pogoj za kvalitetno uporabo metod optičnega toka, ki temeljijo na obdelavi zaporedij sivinskih slik. Poleg pravilno pripravljene površine merjenca je pomembna tudi primerna osvetlitev, ki omogoča kameri ustrezno zajemanje informacije o površini merjenca. Nosilec smo z vpenjalno čeljustjo vpeli na stresalnik in ga vzbujali s frekvenco 99 Hz. Nihanje smo med tem snemali s hitro kamero Photron FASTCAM SA-Z, ki omogoča zajemanje digitalnih slik z visoko ločljivostjo pri zelo visoki frekvenci.



Slika 2: Postavitev eksperimenta.

Posnetek smo analizirali s tremi že prej omenjenimi metodami optičnega toka in z vsako od njih izračunali pomike v smer y za 6 izbranih točk sledenja, ki so oštevilčene in z rdečo piko prikazane na sliki 3.

Za razliko od sintetičnega eksperimenta pri tem eksperimentu dejanske vrednosti pomikov niso znane, zato smo za referenčo vrednost vzeli rezultate metode Lucas-Kanade (pyIDI), saj je ta že uveljavljena na tem področju uporabe. Rezultate metode Gunnar Farnebäck in Lucas-Kanade (OpenCV) smo nato primerjali s temi izbranimi referenčnimi vrednostmi in glede na odstopanje od njih za vsako točko sledenja izračunali maksimalno absolutno napako in standardno deviacijo napak.

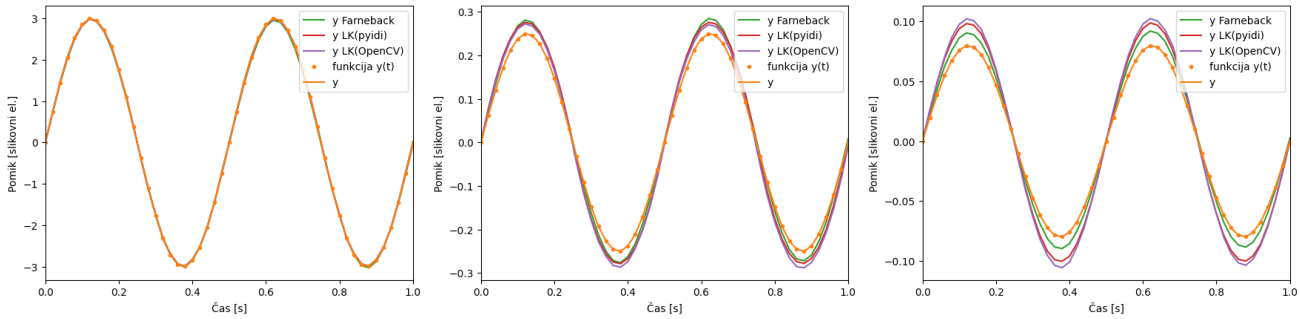


Slika 3: Izbrane točke sledenja na začetni sliki posnetka hitre kamere.

4 Rezultati

4.1 Rezultati sintetičnega eksperimenta

Rezultati metod in predpisani pomiki vseh treh posnetkov za smer y so prikazani na sliki 4.



(a) Posnetek večji pomiki *(b) Posnetek srednji pomiki* *(c) Posnetek majhni pomiki*

Slika 4: Rezultati metod za sintetični eksperiment.

Izračunane maksimalne absolutne napake (ϵ_{max}), maksimalne relativne napake (δ_{max}) in standardne deviacije napak (σ) posamezne metode za posnetek z večjimi pomiki predstavlja tabela 1, s srednjimi pomiki tabela 2 in z manjšimi pomiki tabela 3.

Tabela 1: Merilna negotovost metod za posnetek večji pomiki.

	ϵ_{max} [slikovni el.]		δ_{max} [%]		σ [slikovni el.]	
Metoda	x	y	x	y	x	y
Gunnar Farnebäck	0.1309	0.0683	6.89	11.85	0.0652	0.0217
Lucas-Kanade (OpenCV)	0.0400	0.0349	3.70	3.95	0.0211	0.0170
Lucas-Kanade (pyIDI)	0.0301	0.0274	4.60	4.27	0.0198	0.0181

Tabela 2: Merilna negotovost metod za posnetek srednji pomiki.

	ϵ_{max} [slikovni el.]		δ_{max} [%]		σ [slikovni el.]	
Metoda	x	y	x	y	x	y
Gunnar Farnebäck	0.0331	0.0349	24.61	31.82	0.0204	0.0198
Lucas-Kanade (OpenCV)	0.0353	0.0400	35.35	21.84	0.0260	0.0248
Lucas-Kanade (pyIDI)	0.0333	0.0301	31.16	26.58	0.0260	0.0244

Iz grafov in tabel, ki prikazujejo rezultate sintetičnega eksperimenta, lahko opazimo, da je natančnost metod odvisna od velikosti predpisanih pomikov. Pri posnetku z večjimi predpisanimi pomiki smo najbolj natančne rezultate dobili z metodo Lucas-Kanade (pyIDI) in najslabše z

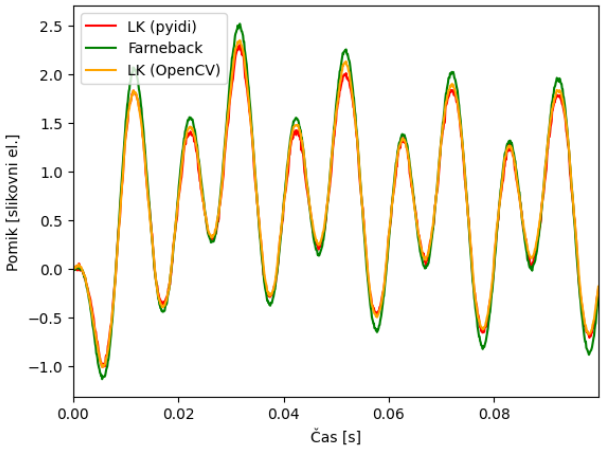
Tabela 3: Merilna negotovost metod za posnetek majhni pomiki.

	ϵ_{max} [slikovni el.]		δ_{max} [%]		σ [slikovni el.]	
Metoda	x	y	x	y	x	y
Gunnar Farnebäck	0.0076	0.0122	29.60	28.57	0.0045	0.0071
Lucas-Kanade (OpenCV)	0.0161	0.0259	43.75	35.63	0.0109	0.0168
Lucas-Kanade (pyIDI)	0.0151	0.0205	39.48	29.91	0.0105	0.0144

metodo Gunnar Farnebäck. Pri majhnih predpisanih pomikih najbolj natančno metodo predstavlja metoda Gunnar Farnebäck, drugi dve metodi pa sta si nato dokaj blizu. Z vsemi tremi uporabljenimi metodami pa pri posnetku s srednjimi pomiki dobimo podobno odstopanje rezultatov od prepisanih vrednosti.

4.2 Rezultati eksperimenta s hitro kamero

Na sliki 5 so rezultati pomika točke 1 v y smeri (glede na začetno pozicijo točke) za eksperiment s hitro kamero. Merilna negotovost metod Lucas-Kanade (OpenCV) in Gunnar Farnebäck je določena glede na rezultate metode Lucas-Kanade (pyIDI) in za vsako točko zapisana v tabeli 4.



Slika 5: Rezultati pomika v y smer za točko 1.

Iz slike 5 lahko opazimo, da rezultati pomikov metode Gunnar Farnebäck odstopajo od rezultatov drugih dveh metod predvsem ob časih, ko točka doseže lokalni maksimum in minimum. Glede na izračunano maksimalno absolutno napako, bi pri vseh šestih točkah naredili manjšo napako, če bi namesto metode Lucas-Kanade (pyIDI) uporabili metodo Lucas-Kanade (OpenCV) kot pa Gunnar Farnebäck.

Tabela 4: Merilna negotovost metod pri eksperimentu s hitro kamero.

	ϵ_{max} [slikovni element]		σ [slikovni element]	
Točka	**Gunnar Farnebäck**	**Lucas-Kanade**	**Gunnar Farnebäck**	**Lucas-Kanade**
1	0.2736	0.1357	0.1067	0.0354
2	0.8210	0.3998	0.3039	0.1221
3	0.3964	0.3501	0.1368	0.0992
4	1.1054	0.6900	0.3180	0.1773
5	0.2135	0.1038	0.0815	0.0369
6	1.3785	0.3277	0.3852	0.0833

5 Zaključki

Oba eksperimenta sta pokazala, da je izbira ustrezne metode odvisna od velikosti pomikov, ki jih želimo spremljati in določiti. Metoda Gunnar Farnebäck se je pri sintetičnem eksperimentu izkazala za najbolj natančno izmed treh uporabljenih metod pri analizi posnetka z najmanjšimi pomiki, ki je imel pomike med zaporednima slikama v rangu 0.00079–0.02005 slikovnega elementa. Pri analizi posnetka z večjimi pomiki, kjer so bili pomiki med zaporednimi slikami v rangu 0.0472–0.7520 slikovnega elementa pa se je metoda izkazala za najmanj natančno. Rezultati eksperimenta s hitro kamero so pokazali, da lahko z uporabo katerekoli izmed treh uporabljenih metod dobimo podobno obliko trajektorije gibanja točk. Vseeno pa se rezultati metode Lucas-Kanade (OpenCV) manj razlikujejo od rezultatov Lucas-Kanade (pyIDI) kot rezultati metode Gunnar Farnebäck. Razlogi za to so lahko slabša natančnost metode Gunnar Farnebäck za ta primer uporabe, podobne lastnosti metod Lucas-Kanade (pyIDI) in Lucas-Kanade(OpenCV), neustrezna osvetlitev površine merjenca ter napake pri zajemu posnetka in pripravi eksperimenta. V nadaljnjem delu bi lahko podrobneje določili meje velikosti pomikov, pri katerih določena metoda vodi do bolj ali manj natančnih rezultatov, ter izvedli primerjavo še z drugimi metodami optičnega toka.

6 Literatura

[1] Baqersad, J. et al., Photogrammetry and optical methods in Structural Dynamics – A Review, Mechanical Systems and Signal Processing, 86, pp. 17–34, 2017.

[2] Al-Qudah, S.; Yang, M. Large Displacement Detection Using Improved Lucas–Kanade Optical Flow, Sensors 2023, 23, 3152.

[3] A. Thomas, H. P. M., P. P. and V. P. Gopi, Moving Vehicle Candidate Recognition and Classification Using Inception-ResNet-v2, 2020 IEEE 44th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC), Madrid, Spain, pp. 467-472, 2020.

[4] Amiri Tehrani Zade, A., Jalili Aziz, M., Majedi, H. et al. Spatiotemporal analysis of speckle dynamics to track invisible needle in ultrasound sequences using convolutional neural networks: a phantom study.

[5] J. de Boer and M. Kalksma, Choosing between optical flow algorithms for UAV position change measurement, 2015.

[6] G. Farnebäck, Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion, vol. 2749, pp. 363–370, 2003.

[7] B. K. P. Horn and B. G. Schunck, Determining optical flow, Artificial Intelligence, vol. 17, no. 1, pp. 185–203, 1981.

[8] S. Husseini, A SURVEY OF OPTICAL FLOW TECHNIQUES FOR OBJECT TRACKING, 2017.

[9] G. Farneback, Very high accuracy velocity estimation using orientation tensors, parametric motion, and simultaneous segmentation of the motion field, in Proceedings Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. ICCV 2001, 2001, vol. 1, pp. 171–177 vol.1.

[10] Zappa, E. et al., Uncertainty assessment of digital image correlation method in dynamic applications, Optics and Lasers in Engineering, 56, pp. 140–151, 2014.

[11] Ladisk, speckle_pattern: Generate print-ready pattern images for DIC applications., GitHub. Dostopno na: https://github.com/ladisk/speckle_pattern [Ogled: 13. julij 2024].

[12] Optical Flow, OpenCV. Dostopno na: https://docs.opencv.org/4.x/d4/dee/tutorial_optical_flow.html [Ogled: 13. julij 2024].

[13] Ladisk, pyIDI, GitHub. Dostopno na: https://github.com/ladisk/pyidi [Ogled: 13. julij 2024].

DOLOČEVANJE MEHANSKIH LASTNOSTI POSAMEZNEGA VLAKNA KAMENE VOLNE

Anelija Perše in Frančeska Perše

Povzetek

Kamena volna je krhek material, ki je običajno narejen iz vulkanskih kamnin oziroma staljenih mineralov. Lastnosti dobljenih vlaken so odvisne od vrste uporabljenih surovin in postopka priprave. Namen predstavljene raziskave je bil določiti optične in mehanske lastnosti posameznih vlaken kamene volne štirih različnih materialov. Mehanske lastnosti so bile določene s pomočjo reometra, optične lastnosti pa smo določili s pomočjo optičnega mikroskopa. Rezultati so pokazali, da so se vlakna med seboj razlikovala tako po optičnih kot tudi po mehanskih lastnostih. Vlakna so namreč izkazovala različno debelino, ne samo v odvisnosti od vrste materiala, ampak tudi vzdolž enega vlakna. Posledično se je precej razlik pojavilo pri merjenju mehanskih lastnosti, na katere je vplivala tudi struktura vlaken. Na vlaknih so bili opazni različni vključki, ki so se med seboj razlikovali po obliki, strukturi in velikosti. Ne glede na strukturo in debelino vlaken pa je raziskava pokazala, da je bila izbrana metoda dovolj učinkovita za ustrezno določitev mehanskih lastnosti posameznega vlakna kamene volne.

1 Uvod

Kamena volna, ki se pogosto imenuje tudi mineralna volna, nastane s predenjem ali vlečenjem staljenih mineralov (pri temperaturi okoli 1600 °C), skozi katere piha tok zraka ali pare [1]. Po izgledu lahko kamena volna spominja na sladkorno peno, saj je postopek pridobivanja zelo podoben postopku nastajanja sladkorne pene. Kamena volna je uporabna predvsem v gradbeništvu, saj služi kot odličen toplotni izolator sten, streh in tal. Omogoča izolaciji, da zadrži vroč zrak v vročih podnebjih in ohrani toploto v hladnih podnebjih. Poleg tega je volna ena izmed varnejših izolatorjev, saj je odporna na ogenj. Njena proizvodnja temelji na naravnih virih, ki so prisotni v velikih količinah po vsej Zemlji, npr. vulkanske kamnine, običajno bazalt ali dolomit. Poleg surovega materiala se lahko med procesom izdelave doda tudi reciklirana kamena volna in ostanki žlidre iz kovinske industrije [2]. Zaradi značilne nizke gostote in visoke poroznosti kamena volna zelo dobro absorbira zvok. Poleg tega jo je mogoče večkrat reciklirati, zaradi česar lahko govorimo o materialu brez konca življenjske dobe [3].

V raziskavi smo se posvetili mehanskim in optičnim lastnostim posameznega vlakna štirih različnih vzorcev kamene volne. V literaturi je bila kamena volna obravnavana le kot celota, nikjer pa ni zaslediti raziskav o določevanju mehanskih lastnosti posameznega vlakna.

Zanimalo nas je torej, kakšne so lastnosti posameznega vlakna kamene volne, pri čemer smo se poleg mehanskih osredotočili tudi na optične lastnosti.
Za določevanje mehanskih lastnosti tankih materialov je bila v Laboratoriju za eksperimentlano mehaniko, FS, UL pred leti že razvita metoda [4], ki smo jo želeli preizskusiti tudi na izbranih vlaknih kamene volne. Uporabljena metoda lahko zagotovi natezne meritve na relativno kratkih in krhkih vlaknastih materialih, kot so mineralna vlakna kamene volne. Metoda je bila teoretično (z analizo parametričnih napak) in eksperimentalno (z mehansko karakterizacijo) ovrednotena na različnih vlaknih. Izkazalo se je, da je metoda visoko zmogljiva in omogoča prilagajanje uporabljenega SER-tool senzorskega sistema za izvajanje različnih študij, ki raziskujejo učinke termomehanske zgodovine, kemične sestave in drugih parametrov na posameznih vlaknih [4]. Kasneje je bila metoda uporabljena tudi za določevanje mehanskih lastnosti las, kjer se je prav tako izkazala za zelo učinkovito. Pri tem je potrebno poudariti, da so lasje veliko bolj vzdržni in debelejši od kamene volne [5]. Zaradi dobrih predhodnih rezultatov smo to metodo smo tudi v predstavljeni raziskavi, za katero so bili na razpolago štirje vzorci kamene volne. Učinkovitost izbrane metode za določevanje mehanskih lastnosti enega vlakna je namreč zelo pomembna, saj lahko na podlagi teh meritev izberemo najboljši material in procesne pogoje za izdelavo skupka vlaken v obliki kamene volne. Na ta način izboljšamo mehanske lastnosti in kvaliteto tega izolacijskega materiala.

2. Eksperimentalni del

Za namen raziskave so bili uporabljeni 4 različni vzorci kamene volne, ki so bili pripravljeni pri različnih procesnih pogojih. Vzorce smo poimenovali MAT1, MAT2, MAT3 in MAT4. Posameznim vlaknom je bilo potrebno najprej določiti optične lastnosti, nato pa so bile določene še njihove mehanske lastnosti. Pri vsakem materialu je bilo opravljenih po 10 ponovitev. Ker so vlakna kamene volne zelo krhka in tanka, je bila priprava vzorcev in izvedba meritev izredno zahtevna, zato pri vseh vzorcih vse meritve niso bile uspešne.
Optične lastnosti so bile določene s pomočjo optičnega mikroskopa Holland, Novex. Vsako vlakno smo najprej posneli s kamero, nato pa smo z računalniškim programom določili debeline. Mehanske lastnosti, torej napetost in deformacijo, so bile določene s pomočjo reometra Haake MARS II, Thermoscientific. To je naprava, ki omogoča spremljanje odziva snovi pod vplivom zunanje obremenitve, v našem primeru sile. Kot rezultat smo dobili vrednosti maksimalne napetosti, ki jo je vlakno preneslo, preden se je strgalo in vrednosti deformacije oziroma spremembe dolžine, ki je pri tem nastala.

2.1 Določitev debeline in optičnih lastnosti kamene volne

Določevanje debelin in optičnih lastnosti s pomočjo mikroskopa je potekalo tako, da je bilo vsako vlakno najprej pritrjeno na nosilni papir, nato smo ga namestili na stekelce, ga položili pod povečevalni objektiv in izostrili sliko s pomočjo računalniškega programa. Pri vsakem

vlaknu smo debeline določili na njegovi levi strani, na sredini in na desni strani. Na vsaki strani smo opravili po tri meritve, tako da smo na koncu dobili 9 izmerjenih debelin na enem vlaknu.

2.2 Določitev mehanskih lastnosti kamene volne

Za trdna telesa v določenem območju sil velja Hookov zakon, pri čemer E predstavlja Youngov modul v enotah Pascal (Pa). Definiran je kot razmerje med napetostjo (sila na ploskovno enoto) in deformacijo:

$$E=\sigma/\varepsilon. \quad (1)$$

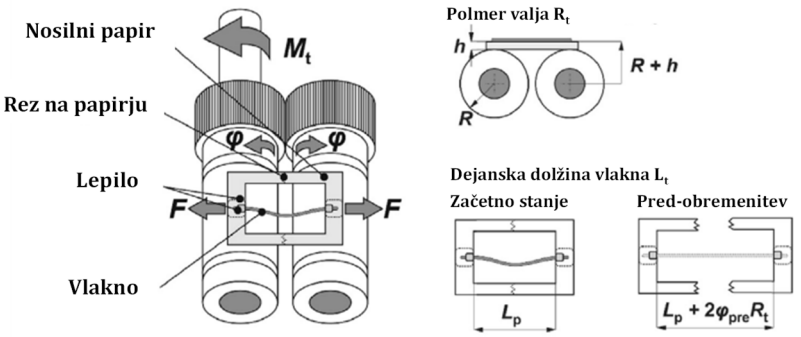
V primeru določevanja mehanskih lastnosti, t.j. natezne napetosti v odvisnosti od deformacije (raztezka), lahko za posamezen material določimo njegov elastičen modul v linearnem elastičnem območju.

Raztezek oziroma deformacija, ki je brez enot, definiramo kot:

$$\varepsilon=\Delta l/l_0 , \quad (2)$$

pri čemer je Δl razlika med začetno in končno dolžino vlakna, l_0 pa je začetna dolžina vlakna. Pri določevanju mehanskih lastnosti vlaken lahko iz meritev določimo deformacijo, pri kateri pride do porušitve oziroma zloma vlakna (deformacija porušenja, torej $\varepsilon_{por.}$). Največjo napetost pred zlomom vlakna imenujemo maksimalna napetost (ε_{maks}).

Mehanske lastnosti posameznega vlakna so bile določene s pomočjo prej omenjenega reometra in senzorskega sistema dveh valjev (SER-tool, slika 1) pri nateznem obremenjevanju vlaken, ki je nastalo tako, da sta se valja senzorskega sistema vrtela vsak v svojo smer. Pri vseh meritvah so bili pogoji obremenjevanja enaki. Hitrost deformacije je znašala 0.001 s^{-1}, meritve pa so potekale pri konstantni sobni temperaturi 25 °C. Vlakno je bilo na valja pritrjeno preko nosilnega papirja. Preden sta se valja začela vrteti, smo nosilni papir prerezali na sredini, kot kaže slika 1. Meritev je bila končana, ko je vlakno doseglo maksimalno deformacijo in se strgalo.



Slika 1: Senzorski sistem SER Tool (levo); način izvedbe meritev z nosilnim papirjem (desno) [4]

3 Rezultati

Pri določevanju optičnih lastnosti posameznega vlakna smo ugotovili, da so se debeline vlaken razlikovale. Izmerjene vrednosti na različnih mestih posameznih vlaken so prikazane v tabeli 1.

Tabela 1: povprečne debeline materialov na treh straneh vzorca

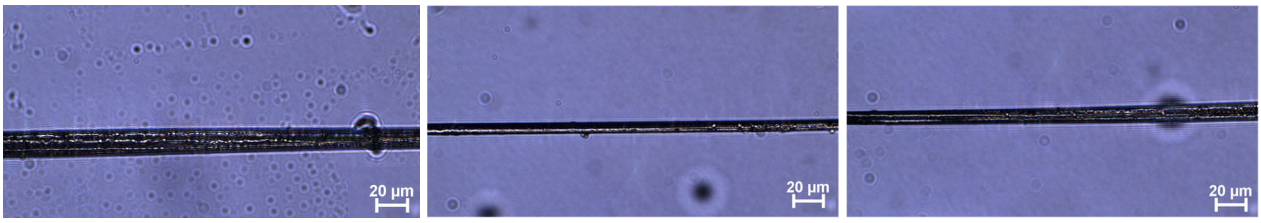
MAT1	levo [µm]	sredina [µm]	desno [µm]
vzorec 1.1	8,55	8,79	8,99
vzorec 1.2	4,29	6,35	3,42
vzorec 1.5	9,69	6,64	6,45
vzorec 1.6	7,43	5,74	6,96
vzorec 1.7	15,59	15,29	15,43
vzorec 1.8	56,81	33,76	25,56
vzorec 1.9	12,87	9,39	10,28

MAT2	levo [µm]	sredina [µm]	desno [µm]
vzorec 2.3	9,62	10,86	12,07
vzorec 2.4	7,29	6,64	7,01
vzorec 2.9	15,66	11,16	8,37
vzorec 2.10	8,52	7,60	8,65
vzorec 2.11	13,92	18,82	6,21

MAT3	levo [µm]	sredina [µm]	desno [µm]
vzorec 3.2	7,95	8,15	7,81
vzorec 3.3	24,58	14,76	12,96
vzorec 3.4	11,68	17,96	10,24
vzorec 3.5	15,23	13,88	13,74
vzorec 3.6	10,30	12,62	22,20
vzorec 3.7	6,70	8,25	6,80
vzorec 3.12	6,13	9,09	6,82

MAT4	levo [µm]	sredina [µm]	desno [µm]
vzorec 4.1	22,68	24,07	17,34
vzorec 4.2	10,28	13,60	12,80
vzorec 4.3	7,75	16,82	10,48
vzorec 4.4	11,83	7,29	9,44
vzorec 4.5	10,94	15,82	9,30
vzorec 4.7	13,38	18,06	17,75
vzorec 4.8	13,05	15,64	22,11
vzorec 4.9	17,86	7,62	10,26
vzorec 4.10	9,79	16,07	12,93

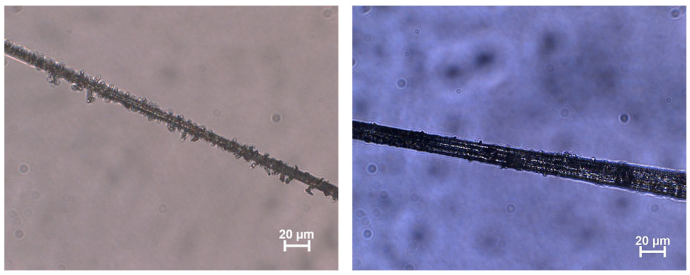
Iz tabele 1 lahko vidimo, da so se debeline vlaken razlikovale glede na vrsto materiala, poleg tega pa so tudi vlakna istega materiala izkazovala različno debelino, strukturo in izgled. Zelo zanimivo je bilo tudi to, da sta bili pogosto struktura in debelina vlakna na eni strani skoraj čisto drugačni kot na drugi strani vzorca. Primer takega vlakna, je prikazan na sliki 2. Razlika v debelini tega vlakna na najtanjšem in najdebelejšem delu je znašala kar 10,24 µm.



Slika 2: Mikrograf vzorca 4.9 na različnih delih vzdolž vlakna - levo, sredina in desno

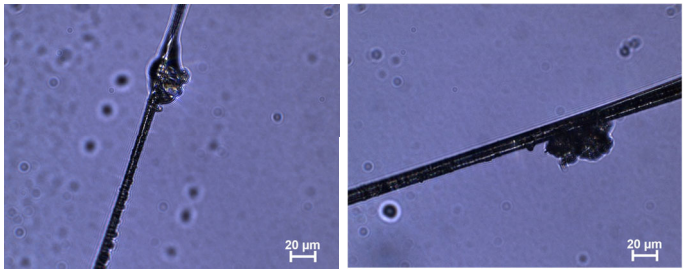
Optični pregled vlaken je na večini vlaken pokazal prisotnost raznih struktur, ki smo jih poimenovali vključki. Takšne strukture so se med seboj razlikovale, nekatere so bile večje in so se na vlaknu redkeje pojavljale, spet druge pa so bile manjše in na vlaknu bolj pogoste. Prisotnost in pogostost vključkov na vlaknih smo poskusili tudi ovrednotiti. Izkazalo se je, da so bile strukture in pogostost pojavljanja vključkov zelo naključne, zato kakršnihkoli trendov nismo mogli določiti. Kljub temu pa smo lahko vključke razdelili glede na velikost, količino in strukturo v tri skupine: okrogli, grudičasti in kosmičasti vključki različnih oblik in velikosti. Največ je bilo kosmičastih vključkov, ti so se namreč pojavili pri vseh štirih materialih in so bili

pri nekaterih vzorcih zelo neizraziti in nejasni. Pri večini vzorcev s takšnimi vključki so vključki ležali blizu skupaj, eden zraven drugega (Slika 3).



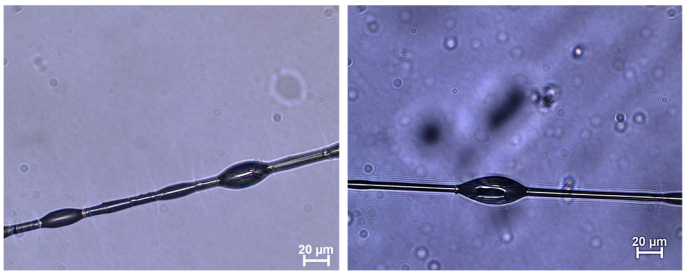
Slika 3: Primer kosmičastih vključkov na vzorcu 2.2 (levo) in 2.7 (desno)

Vključke, ki so se na vzorcih pojavljali posamično in v nepravilnih oblikah, smo poimenovali grudičasti vključki. Taki vključki so bili praviloma največji, vendar so se po obliki in velikosti med seboj tudi najbolj razlikovali. Če primerjamo vzorec 3.12 in 3.6 (Slika 4) vidimo, da sta vključka drugačna tako po obliki kot tudi po velikosti.



Slika 4: Grudičasti vključek na vzorcu 3.12 (levo) in 3.6 (desno)

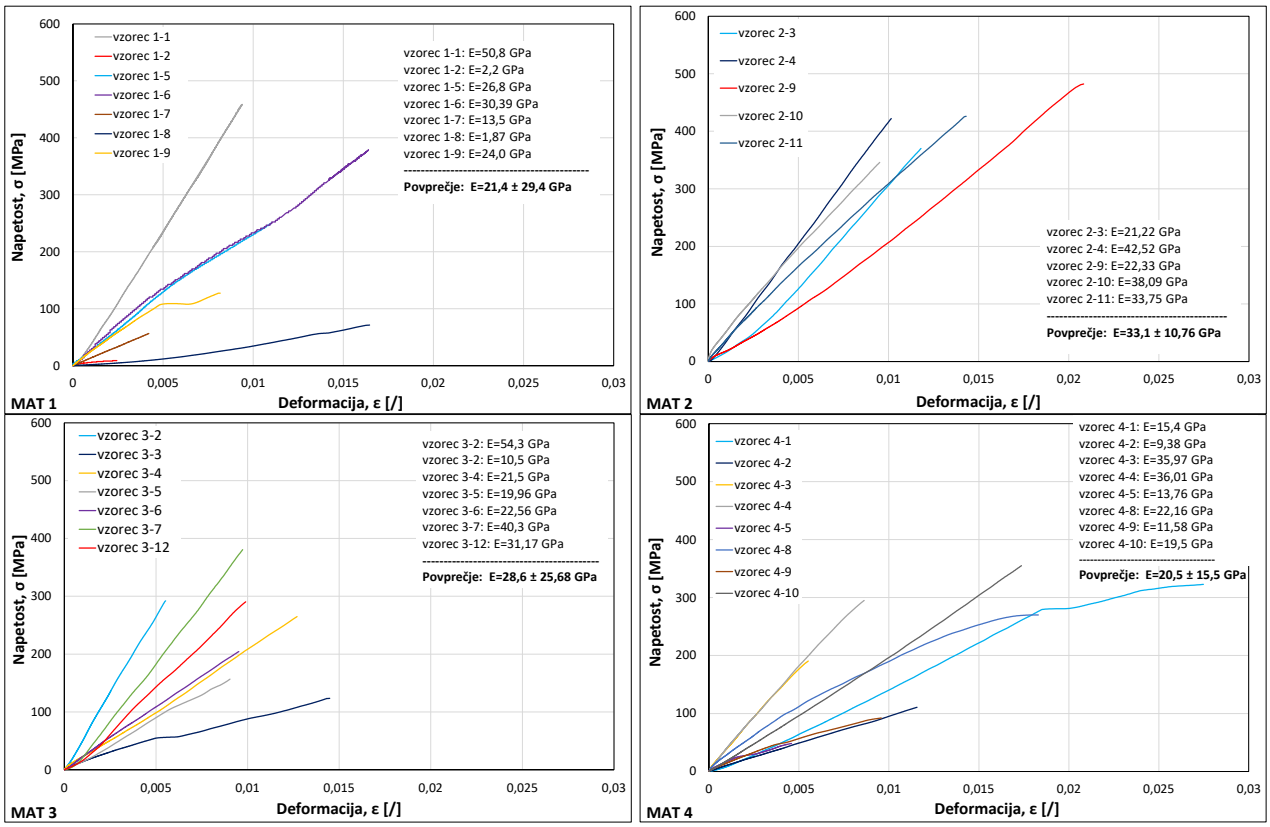
Najmanj je bilo okroglih vključkov, pojavili pa so se le pri materialih 1, 2 in 3. Okrogli vključki so se lahko nahajali blizu skupaj ali pa so se pojavili tudi posamično. Takšni vključki so bili sicer zelo podobnih, skoraj enakih oblik, vendar zelo različnih velikosti. Če primerjamo vzorec 3.2 in 2.11 (Slika 5), opazimo, da je vključek na vzorcu 2.11 večji od vključkov na vzorcu 3.2.



Slika 5: Okrogli vključki na vzorcu 3.2 (levo) in na vzorcu 2.11 (desno)

Glavni cilj naše raziskave je bil poleg optičnih lastnosti določiti tudi mehanske lastnosti posameznemu vlaknu. V praksi se mehanske lastnosti vedno določajo skupku vlaken, v našem primeru pa je bila izdelana metoda za določitev napetostno-deformacijskih krivulj vsakemu

izbranemu vlaknu posebej. Iz debelin vlaken, določenih s pomočjo optičnega mikroskopa na različnih delih vlakna, smo izračunali povprečno debelino, ki smo jo potrebovali, da smo iz meritev sile določili napetost posameznega vlakna. Dobljene krivulje napetosti v odvisnosti od deformacije za vzorce štirih materialov so prikazane na sliki 6. Iz rezultatov je razvidno, da je do najmanjšega odstopanja med meritvami različnih vzorcev prišlo pri vzorcu materiala 2 (napaka meritev ± 10,76 GPa). Pri tem vzorcu so si bile krivulje tudi najbolj podobne, kar pomeni, da so vlakna dosegala podobne vrednosti napetosti in pri obremenitvi dosegla tudi približno enake deformacije. Po drugi strani pa je do največjega sipanja rezultatov prišlo pri materialih 1 in 3, kjer so se Youngovi moduli različnih meritev razlikovali za 25 - 30 GPa. Poleg tega lahko opazimo, da so bile napetostno-deformacijske krivulje pri teh dveh materialih (MAT1 in MAT3, Slika 6) drugačne tudi po obliki. Prav tako smo različno obliko napetostno-deformacijskih krivulj opazili pri materialu 4, kjer pa je bilo sipanje rezultatov nekoliko manjše kot pri materialih 1 in 3. Predvsem smo opazili različno razteznost vlaken, saj je na primer pri vlaknu 4.1 deformacija znašala 0,03 %, pri vlaknu 4.5 pa malo manj kot 0,005 %. Če primerjamo vse štiri materiale, ugotovimo, da je do najmanjše deformacije prišlo pri materialu 1, do največje pa pri materialu 4.



Slika 6: Krivulje napetosti v odvisnosti od deformacije za vse štiri materiale kamene volne

S pomočjo dobljenih krivulj smo določili mehanske lastnosti posameznega vlakna. Strma krivulja prikazuje material z visokim Youngovim modulom, tak material pa se pri veliki

napetosti minimalno raztegne. Po drugi strani pa je položna krivulja značilna za material, ki se že pri manjših napetostih zelo deformira. Iz naklona krivulje smo izračunali Youngov modul za vsako posamezno vlakno, nato pa smo pri vsakem materialu iz vseh uspelih meritev določili tudi povprečno vrednost modula. Vrednosti modulov so se pri uporabljenih vlaknih razlikovale in zajemale vrednosti med 20 in 30 GPa. Za primerjavo, v literaturi za kvalitetno industrijsko volno (torej skupek vlaken) poročajo o vrednostih modulov med 40 in 60 GPa [4]. Neposredno teh vrednosti ne moremo primerjati, saj so bili moduli v našem primeru določeni na enem vlaknu in ne na skupku. Posamezno vlakno lahko izkazuje nižje module, v skupkih, kjer pa je vlaken več in so pogosto med seboj močno prepletena, se mehanske lastnosti izboljšajo. Poleg tega je bilo določevanje mehanskih lastnosti posameznega vlakna izjemno zahtevno, saj so bila vlakna zelo tanka in krhka. Tanjši kot so bili vzorci, težje je bilo pomeriti njihove mehanske lastnosti in posledično je uspelo manjše število meritev. Kljub temu smo pri vsakem materialu opravili več uspešnih meritev, njihovo število pa se je pri uporabljenih materialih razlikovalo.
Kot je bilo omenjeno v uvodu, so bile s to metodo že določene mehanske lastnosti las [5]. Ker je las veliko bolj trpežen in debelejši kot kamena volna, so bile meritve las nekoliko bolj uspešne in zato tudi številčnejše od meritev kamene volne. Poleg tega je debelina las po dolžini bolj enakomerna, zato je pri meritvah prišlo do manjšega sipanja kot pri meritvah kamene volne. Pri kameni volni je namreč pri meritvah modula prišlo od 10,76 GPa do 29,4 GPa odstopanja, medtem ko je pri meritvah las prišlo le do 0,32 GPa odstopanja. [5]
Veliko sipanje rezultatov mehanskih lastnosti bi lahko pripisali tudi prisotnosti različnih vključkov. Iz rezultatov sledi, da prisotnost vključkov nima velikega vpliva na mehanske lastnosti kamene volne, saj uspešnost izvedenih meritev ni bila povezana s količino ali vrsto vključkov. Meritve mehanskih lastnosti so bile enako uspešne pri vzorcih z največjim številom vključkov, kot tudi pri vzorcih brez vključkov. V splošnem velja, da na mehanske lastnosti posameznega vlakna močno vpliva njegova debelina. Pri materialih 2, 3 in 4 so tanjša vlakna izkazovala višji elastični modul kot debelejša, vendar pa smo opazili, da sta se pri materialu 1 krivulji najtanjšega in najdebelejšega vzorca skoraj prekrivali.

4 Zaključki

V opravljeni raziskavi je bil glavni cilj določiti mehanske in optične lastnosti enega samega vlakna kamene volne. Da bi vlaknom čim bolje določili lastnosti, smo uporabili v ta namen prilagojeno metodo. Zmogljivost metode je bila preverjena na štirih vrstah kamene volne, vsaka od drugega proizvajalca. Najprej je bilo potrebno vlakna izolirati in jih pritrditi na nosilni papir. Pri vsakem materialu smo naredili po 10 vzorcev in vsakemu vlaknu s pomočjo optičnega mikroskopa določili debeline. Izkazalo se je, da na debeline ni vplivala le vrsta materiala, temveč je bila večkrat debelina enega vlakna na eni strani drugačna kot na drugi. Primer takšnega vlakna je bil vzorec 4.9, kjer je razlika med najtanjšim in nadebelejšim delom znašala 10,24 μm. Z optičnim mikroskopom smo opazili, da so vlakna vsebovala različne vključke, ki so se na vzorcih pojavljali dokaj pogosto. Ker so bili vključki različnih oblik, struktur in velikosti, smo jih

razdelili v tri skupine: kosmičasti, okrogli in grudičasti vključki. Največ je bilo kosmičastih vključkov, najmanj pa okroglih vključkov.

S pomočjo posebne metode smo posameznim vlaknom določili napetostno-deformacijske krivulje, iz katerih je razvidno, da je do najmanjšega odstopanja med različnimi vzorci prišlo pri materialu 2, kjer so vlakna dosegala podobne vrednosti napetosti in približno enake deformacije. V nasprotju pa je do največjega sipanja rezultatov prišlo pri materialih 1 in 3, pri čemer so se tudi oblike krivulj med seboj najbolj razlikovale. Pri materialu 4 je bilo sicer sipanje nekoliko manjše, vendar pa je bila razteznost vlaken različna. Čeprav je prišlo do velikih odstopanj, se je uporabljena metoda izkazala za učinkovito. Meritve vlaken so bile uspešne tako pri tanjših vlaknih kot tudi pri debelejših. Poleg tega smo ugotovili, da prisotnost vključkov ni vplivala na učinkovitost metode, saj so bile meritve vlaken z vključki enako uspešne kot meritve vlaken brez vključkov.

Raziskovanje kamene volne bi lahko nadaljevali tako, da bi se posvetili tudi kemijski strukturi vlaken in jo povezali z mehanskimi lastnostmi. Na ta način bi lahko ugotovili, kakšna kamena volna je najbolj kvalitetna in primerna za uporabo. Ob raziskovanju bi bilo zanimivo določiti tudi izvor vključkov oziroma vzrok za njihov nastanek.

5 Literatura

[1] 'Benefits of Stone Wool Insulation'. *This Old House*, 3 July 2018, https://www.thisoldhouse.com/insulation/21015697/what-makes-stone-wool-a-smart-insulation-choice.

[2] 'What Is Stone Wool - Rock Wool - Definition'. *Thermal Engineering*, 22. 5. 2019, https://www.thermal-engineering.org/what-is-stone-wool-rock-wool-definition/.

[3] G. Capitani, F. Vergani, R. Conconi, P. Mrvar, D. Bombač, L. Slemenik Perše, A. Oseli and B. Bizjan, Recycling thermally detoxified asbestos-cement in stone-wool: an end-less-life material. Const. & Build. Mat., vol. 440, pp. 1-10, 2024.

[4] A. Oseli, B. Bizjan, E. Król, B. Širok and L. Slemenik Perše, Tensile Properties of Mineral Fibers Determined with Sentmanat Extensional Rheometer, Constr. & Build. Mat., vol. 253, pp. 1-12, 2020.

[5] O. Perše, Las, ostani zdrav, Raziskovalna naloga, Društvo mladih raziskovalcev, 2020.

6 Zahvala

Za pomoč pri izdelavi in meritvah bi se avtorici prispevka radi zahvalili doc. dr. Oseli Alenu in Šobak Matic iz Laboratorija za eksperimentalno mehaniko, Fakultete za strojništvo, UL.

Na piezoelektričnem zaznavalu temelječa 3D natisnjena naprava za uravnoteženje togih rotorjev

Alen Planinšec

Povzetek

Rotorji so ključni mehanski elementi v številnih napravah. Najdemo jih v marsikaterem stroju, katerega sestavni del so generatorji, turbine, motorji in črpalke. Z vrtenjem okoli osi pretvarjajo energije iz ene oblike v drugo. Vsak rotor je za dolgotrajno in pravilno delovanje potrebno uravnotežiti. Raziskava se osredotoča na razvoj simulacije za balansiranje togih rotorjev ter izdelavo 3D natisnjene naprave, s katero izvedemo postopek dinamičnega uravnoteženja. Za silomer je uporabljeno prav tako 3D natisnjeno piezoelektrično zaznavalo. Delo obsega opis razvoja in izdelave naprave s tehnologijo 3D tiska, postopek umerjanja in meritve, s katerimi nato eksperimentalno uravnotežimo togi rotor. Izdelana je še simulacija dinamičnih sil, ki se pojavijo na ležajnih mestih ter programska koda, ki izvede postopek uravnoteženja in test za preverjanje uspešnosti izvedbe postopka. Vsa programska koda je zapisana v programskem jeziku Python, 3D tisk je izveden na tiskalniku Original Prusa XL, vse meritve pa so izvedene z merilno opremo iz laboratorija Ladisk.

1 Uvod

V industriji in tudi v domači rabi je veliko rotorjev, ki postanejo zaradi obrabe ali nepravilne izdelave neuravnoteženi. Namen uravnoteženja rotorjev je zmanjšanje dinamičnih sil na ležaje, ki so posledica neuravnoteženosti samega rotorja. Te povzročajo neželene pojave v obliki vibracij, kar pa vodi v povečano obrabo mehanskih delov ter povečanja hrupnosti naprave. Pojav skrajša življenjsko dobo izdelka, ob enem pa ustvarja neprijetno bivalno okolje.
V praksi se uporabljajo številni načini in različne naprave za balansiranje rotorjev [1]. Iz dosedanje literature pa ni mogoče trditi, da bi uspešno izdelali za to področje uporabno napravo s pomočjo 3D tiskalnikov. Cilj raziskave je izdelava simulacije dinamičnih sil ter na njihovi podlagi temelječe uravnoteženje rotorja in razvoj naprave za balansiranje togih rotorjev v enem procesu s tehnologijo 3D tiska. Pri tem se tudi za merjenje sil na ležajnih mestih uporabi 3D natisnjeno piezoelektrično zaznavalo. S primerno izbranimi komponentami za sestavo preizkuševališča omogočimo karseda natančne meritve dinamičnih sil na ležaja. Nato lahko z izmerjenimi silami na ležajnih mestih določimo postopek dodajanja mas, ki v čim večji meri zmanjša neuravnoteženost rotorja, kar zmanjša dinamične sile na ležajnih mestih. Posledica je

manj hrupa in vibracij.
Po postopku izdelave naprave je potrebno določiti njeno občutljivost zaznavanja velikosti spremembe debalansa. S tem določimo, kakšna je teoretično največja možna natančnost naprave. Pred izvajanjem poskusov uravnoteženja je potrebno napravo še umeriti.
Na koncu z umerjeno napravo izmerimo dinamične sile na rotorju z neznanim debalansom. Tega nato uravnotežimo po postopku, ki je zapisan v programski kodi za simulacijo. Nivo znižanja dinamičnih sil na ležajnih mestih nam pove, kako uspešni smo bili pri poskusu uravnoteženja.

2 Metode dela in potek raziskave

2.1 Teoretično ozadje problema

V industriji in v lastni rabi je veliko rotorjev, ki ob nepravilni izdelavi ali obrabi posameznih delov izkazujejo lastnosti neuravnoteženosti. Rotor želimo uravnotežiti, da bi zmanjšali dinamične sile na ležaje, ki so posledica neuravnoteženosti samega rotorja in povzročajo neželene vibracije, ki vodijo v povečano obrabo mehanskih delov ter povzročajo hrup.

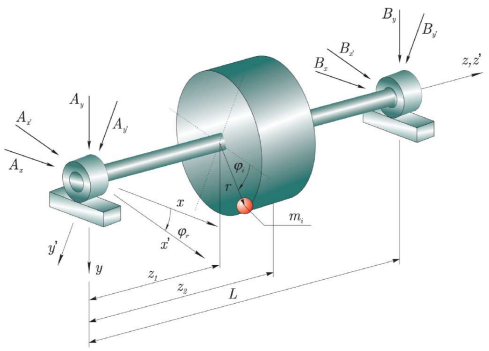
2.2 Razvoj teoretičnega modela in numerične simulacije

Obravnavamo togi[1] rotor mase m, ki je vrtljivo vpet med ležaja z medsebojno razdaljo L in se vrti okoli nepomične osi z. Definiramo fiksen oz. nepomičen koordinatni sistem (KS) xyz z izhodiščem v prvem ležaju in pomičen KS $x'y'z'$ tako, da težišče T leži na osi x'. Zasuk osi x' glede na x popišemo s kotom φ. Sile na ležaja A in B v vrtečem se KS označimo z $A_{x'}$, $A_{y'}$, $B_{x'}$, $B_{y'}$, deviacijska MVM z $J_{y'z'}$ in $J_{x'z'}$, ekscentričnost z e, kotno hitrost rotorja s $\dot{\varphi}$, kotni pospešek pa s $\ddot{\varphi}$. Vse oznake in slika modela so prevzete iz vira [3].
Zapišemo lahko enačbe za vsoto vseh sil in vsoto vseh momentov v pomičnem KS za smeri x', y' in z'. Dobimo naslednji sistem 6 gibalnih enačb:

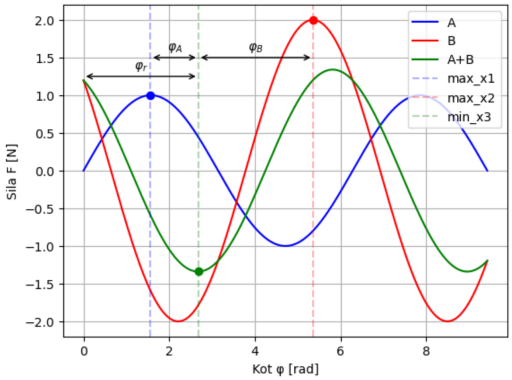
$$\sum F_{x',i} = A_{x'} + B_{x'} = -m\,e\,\dot{\varphi}^2 \tag{1}$$
$$\sum F_{y',i} = A_{y'} + B_{y'} = m\,e\,\ddot{\varphi} \tag{2}$$
$$\sum F_{z',i} = 0 \tag{3}$$
$$\sum M_{x'} = -B_{y'}\,L = -J_{x'z'}\,\ddot{\varphi} + J_{y'z'}\,\dot{\varphi}^2 \tag{4}$$
$$\sum M_{y'} = B_{x'}\,L = -J_{x'z'}\,\dot{\varphi}^2 - J_{y'z'}\,\ddot{\varphi} \tag{5}$$
$$\sum M_{z'} = J_{z'z'}\,\ddot{\varphi} \tag{6}$$

Zaradi neuravnoteženosti rotorja se pri konstantnem vrtenju pojavijo sile na ležajih. Ker ima dinamična sila konstantno amplitudo, ki kroži z enako hitrostjo, kot se vrti rotor, je dovolj, da merimo velikost sile zgolj v eni smeri. Velikost sile v posamezni smeri se spreminja sinusno in rezultat meritve nam da za vsak ležaj svojo sinusoido. Na podlagi meritev določimo fazni zamik vrtečega se koordinatnega sistema. Težišče rotorja sovpada z ravnino xz, ko je vsota

[1] Togo telo je sistem velikega števila masnih točk, med katerimi se razdalje ne spreminjajo [2].



Slika 1: Model rotorja [3].



Slika 2: Sili na ležaja A in B ter njuna vsota.

izmerjenih sil v obeh ležajih $A_x + B_x$ najmanjša, kar za primer na slikah 1 in 2 ustreza kot φ_r. Nato določimo še fazni zamik sil A in B ter ju označimo s φ_A in φ_B ter amplitude sil A_x, A_y, B_x, B_y. Z znanimi amplitudami izračunamo ekscentričnost rotorja ter deviacijska MVM:

$$m\,e \;=\; -(A_{x'} + B_{x'})/\dot{\varphi}^2 \tag{7}$$

$$J_{y'z'} \;=\; -B_{y'}\,L/\dot{\varphi}^2 \tag{8}$$

$$J_{x'z'} \;=\; -B_{x'}\,L/\dot{\varphi}^2 \tag{9}$$

Neuravnotežen rotor je možno uravnotežiti s pravilno postavitvijo vsaj dveh mas m_1 in m_2 na določeni mesti na rotorju. Masi dodamo na dveh različnih ravninah z_1 in z_2 ter na izbranem polmeru r. Zapišemo sistem 6 ravnotežnih enačb s 6 neznankami, njegova rešitev pa je:

$$m_1 \;=\; \frac{\sqrt{(J_{x'z'} - m\,e\,z_2)^2 + {J_{y'z'}}^2}}{\sqrt{r^2(z_1 - z_2)^2}} \qquad m_2 \;=\; \frac{\sqrt{(J_{x'z'} - m\,e\,z_1)^2 + {J_{y'z'}}^2}}{\sqrt{r^2(z_1 - z_2)^2}} \tag{10}$$

$$x_1' \;=\; \frac{r(z_1 - z_2)(m\,e\,z_2 - J_{x'z'})}{\sqrt{(z_1 - z_2)^2}\sqrt{(J_{x'z'} - m\,e\,z_2)^2 + {J_{y'z'}}^2}} \tag{11}$$

$$y_1' \;=\; \frac{J_{y'z'}\,r(z_2 - z_1)}{\sqrt{(z_1 - z_2)^2}\sqrt{(J_{x'z'} - m\,e\,z_1)^2 + {J_{y'z'}}^2}} \tag{12}$$

$$x_2' \;=\; \frac{r(z_1 - z_2)(J_{x'z'} - m\,e\,z_1)}{\sqrt{(z_1 - z_2)^2}\sqrt{(J_{x'z'} - m\,e\,z_1)^2 + {J_{y'z'}}^2}} \tag{13}$$

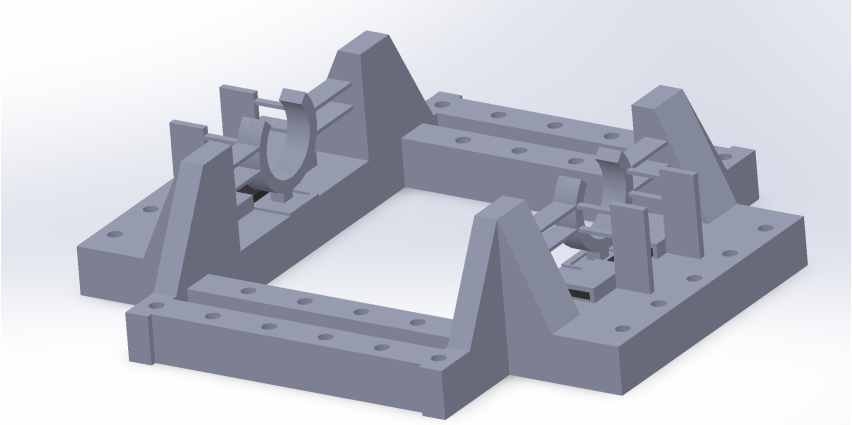
$$y_2' \;=\; \frac{J_{y'z'}\,r(z_1 - z_2)}{\sqrt{(z_1 - z_2)^2}\sqrt{(J_{x'z'} - m\,e\,z_1)^2 + {J_{y'z'}}^2}} \tag{14}$$

Pozicijo dodajanja mas m_1 in m_2 nam določajo x_1', x_2', y_1' in y_2'. Izračunamo še kota φ_1 in φ_2:

$$\varphi_1 \;=\; \arctan\left(\frac{y_1'}{x_1'}\right) \qquad \varphi_2 \;=\; \arctan\left(\frac{y_2'}{x_2'}\right) \tag{15}$$

2.3 Razvoj in zasnova naprave

Snovanje naprave je potekalo z izdelavo 3D modela s programom SolidWorks, nato pa smo pred tiskom model ustrezno uvozili v PrusaSlicer. Naprava je bila natisnjena v enem procesu



Slika 3: 3D model zasnove, narejen s programom SolidWorks.

in večinoma iz materiala PLA. Tukaj so opisani za delovanje naprave ključni elementi.

1. **Ležajno mesto** je del naprave, ki ima neposreden stik z rotorjem. Vanj vstavimo ležaj, pri tem pa je ključnega pomena zagotavljanje dovolj tesnega ujema, saj bi v nasprotnem primeru drsenje ležaja povzročalo dodaten neželen šum pri meritvah.
2. **Listnate vzmeti** so omogočile učinkovito merjenje sil s silomerom, saj so bile oblikovane na način, ki v čim večji meri ohrani sile v vertikalni smeri in obenem v čim večji meri prepreči prenos sil v vseh ostalih smereh. V vertikalni smeri imajo majhno togost in hkrati v horizontalni smeri čim večjo togost. Pri razvijanju tega dela naprave smo spreminjali njihovo širino, debelino, dolžino ter material. Z razporeditvijo enakih vzmeti na vsako stran ležaja smo v največji možni meri zmanjšali horizontalni pomik ležajnega mesta. Cilj je bil namreč ohraniti le vertikalen pomik, ki je pravokoten na površino piezoelektričnega senzorja. Podvojitev vzmeti na vsaki strani ležajnega mesta pa je zmanjšala še rotacijo, pravokotno na os vrtenja rotorja. Dodatno smo rotacijo preprečili še z listnatimi vzmetmi v smeri osi vrtenja.
3. **Podporni stebri** povežejo listnate vzmeti, ki so pripete na ležajno mesto, z osnovno površino ohišja. Ta način zasnove omogoča prazen prostor pod ležajnim mestom, kamor vstavimo silomer. Pri določanju parametrov smo morali biti pozorni na to, da so bili stebri dovolj togi, da so preprečili nihanje v horizontalni smeri.
4. **Prenosnik sile** oz. t.i. trn je element, pravokotne oblike, pod ležajnim mestom in je med merjenjem sil v neposrednem stiku s piezoelektričnim zaznavalom, zato ga je potrebno dimenzionirati glede na geometrijske lastnosti silomera [4]. Pomembno je tudi, da je površina trna, ki se dotika senzorja, gladka in ravna, saj bi bila v primeru ukrivljenosti stična površina trna odvisna od velikosti dinamičnih sil zaradi debalansa, kar pa bi vodilo

do ožjega razpona uporabnosti tako izdelane naprave.

5. **Vodilo silomera** omogoči, da lahko piezoelektrični senzor vselej postavimo v enak položaj pod ležajno mesto. To poveča ponovljivost meritev.
6. **Vpetje silomera** smo izvedli z izdelavo gumijastega traku iz fleksibilnega materiala TPU. To je preprečilo dodatne vibracije in tako povzročeni šum pri meritvah zaradi drsenja silomera ob osnovno površino naprave.

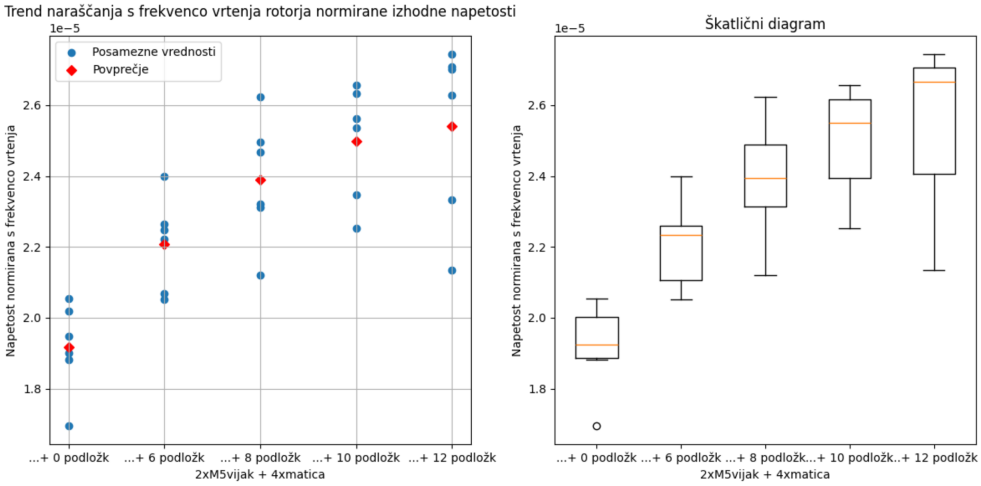
Pri razvijanju naprave je zelo pomembno prednapetje piezoelektričnega zaznavala. S spreminjanjem razmaka med dvema stebroma smo povečevali ali zmanjševali dolžino listnatih vzmeti. S tem smo določali njihovo togost v navpični smeri, kar pa je kasneje ob vstavitvi piezoelektričnega senzorja vplivalo na velikost prednapetja. Silomer lahko meri le v področju stiskanja piezoelektričnega materiala oz. ne omogoča merjenja v področju raztezanja od nedeformiranega stanja dalje. Dinamične sile se vrtijo, kar pomeni, da je vertikalna komponenta sile enkrat na obrat rotorja največja. To se zgodi v trenutku, ko je vektor sile v ležaju zaradi debalansa rotorja usmerjen navpično navzgor. Za pravilno delovanje naprave moramo z oblikovanjem zgoraj opisanih elementov zagotoviti večje prednapetje, kot je velikost vektorja sile na ležaj. V nasprotnem primeru bi v legi, ki jo predstavlja ekstrem sile usmerjene navpično navzgor, prišlo do odmika trna od piezoelektričnega senzorja. Opisan primer z meritvijo zaznamo kot povečanje dvakratnika frekvence vrtenja rotorja, pri tem pa tudi slišimo povsem drugačne zvočne frekvence. Razlog takega pojava je predvsem neželjeno udarjanje trna po silomeru. Zato moramo pri snovanju naprave upoštevati njen namen uporabe. Za merjenje velikih sil je potrebno zagotoviti večje, za merjenje manjših sil pa manjše prednapetje. Preveliko prednapetje za merjenje relativno majhnih sil ni najboljše, ker s tem zmanjšamo občutljivost naprave.
Material, iz katerega je narejena naprava, izkazuje lastnost lezenja. S časom prednapetje popušča, zato je v primeru, ko naprava ostane dalj časa v prednapetem stanju, potrebno ponovno izvesti postopek umerjanja.

2.4 Umerjanje naprave ter meritve

Po izdelavi smo napravo umerili, tako da smo jo obtežili z masami znanih velikosti ter izvedli meritev. Dobili smo graf napetosti v odvisnosti od kota zasuka rotorja in te vrednosti primerjali s teoretično izračunanimi dinamičnimi silami na ležajnih mestih, ki jih povzročijo dodane mase. Rezultat nam je predstavljalo razmerje med izračunano silo in izmerjeno napetostjo za vsak silomer posebej. Ugotovili smo namreč, da se silomeri med seboj razlikujejo in je zato potrebno uravnotežiti vsakega posebej. Razmerje F/U je znašalo $3.74\,N/V$ za prvi silomer in $4.96\,N/V$ za drugi silomer. Ker noben realen rotor ni idealno uravnotežen, smo za namen umerjanja naprave dodali veliki masi, da je bil doprinos umetno ustvarjenega debalansa k skupnemu debalansu rotorja čim večji in s tem napaka določitve konstante čim manjša.

2.5 Določitev občutljivosti

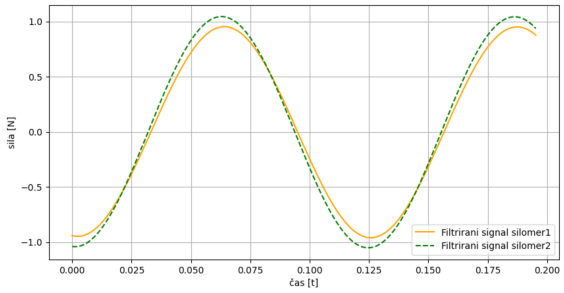
S spreminjanjem debalansa smo želeli ugotoviti, kako majhno spremembo še lahko zaznamo z meritvijo napetosti. Na rotor smo dodajali različno število podložk ter opravljali meritve. Rezultati so prikazani na sliki 4.



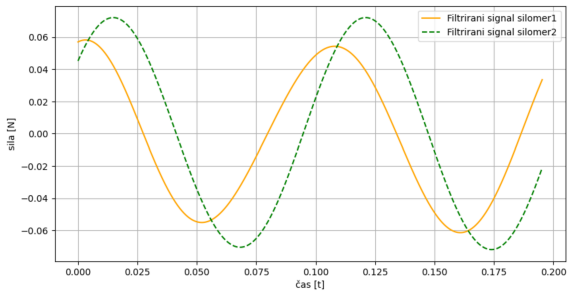
Slika 4: Grafični prikaz občutljivosti naprave na spremembo mase.

3 Rezultati

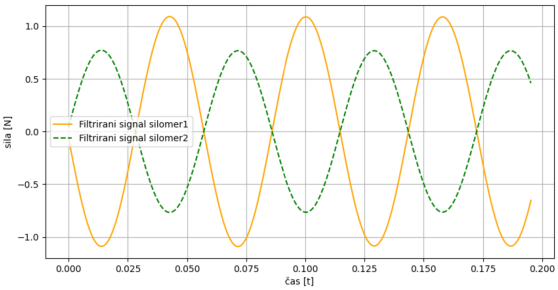
Eksperimentalno smo najprej izvedli uravnoteženje statično neuravnoteženega rotorja. Rezultat je prikazan na slikah 5 in 6. Nato je sledil poskus uravnoteženja dinamično neuravnoteženega rotorja z ekscentričnostjo enako 0. Rezultat je prikazan na slikah 7 in 8. Na koncu smo izvedli še uravnoteženje dinamično neuravnoteženega rotorja z ekscentričnostjo, ki je različna od 0. Rezultat je prikazan na slikah 9 in 10. Iz grafov vidimo, da smo bili pri statičnem uravnoteženju bolj uspešni kot pri dinamičnem z vidika zmanjšanja sil na ležajnih mestih. Tak rezultat je povsem pričakovan, saj smo napravo umerili s statičnim debalansom, dodatno pa nastane odstopanje, ker silomer poleg vertikalne komponente sile izmeri še moment, ki je očitno pri dinamičnem debalansu večji kot pri statičnem.



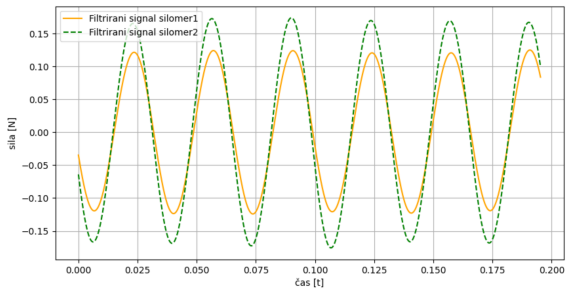
Slika 5: Sile na ležajnih mestih pred uravnoteženjem (primer 1).



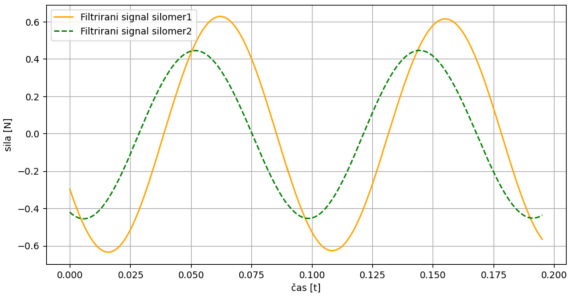
Slika 6: Sile na ležajnih mestih po uravnoteženju (primer 1).



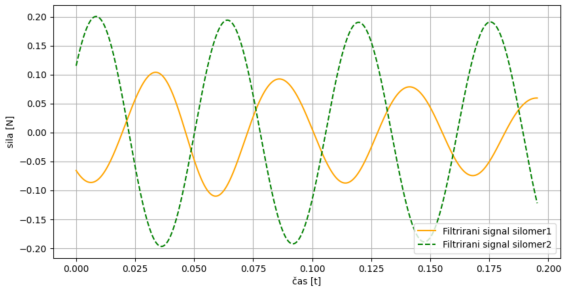
Slika 7: Sile na ležajnih mestih pred uravnoteženjem (primer 2).



Slika 8: Sile na ležajnih mestih po uravnoteženju (primer 2).



Slika 9: Sile na ležajnih mestih pred uravnoteženjem (primer 3).



Slika 10: Sile na ležajnih mestih po uravnoteženju (primer 3).

4 Zaključki

Tekom raziskave smo:

- izdelali simulacijo dinamičnih sil vrtečega se rotorja ter napisali program, ki uravnoteži neuravnotežen rotor in preveri uspešnost postopka uravnoteženja,
- zasnovali in izdelali 3D natisnjeno napravo za uravnoteženje togih rotorjev,
- opisali vse pomembne lastnosti naprave, ki ključno vplivajo na meritve,
- izdelali preizkuševališče za uravnoteženje togih rotorjev,
- z določitvijo konstant za oba silomera umerili napravo,
- izvedli več poskusov uravnoteženja togega rotorja za različne primere debalansa.

V raziskavi smo pokazali, da tehnologija 3D tiska omogoča izdelavo naprave, ki lahko uspešno zazna dinamične sile na ležajnih mestih togega rotorja ter statično uravnoteži rotor. Naprava

je primerna za statično uravnoteženje togih rotorjev, njena nadgradnja pa bi v prihodnje lahko vodila do zasnove, ki bi omogočila dinamično uravnoteženje. Predlog za izboljšanje razpona uporabnosti naprave je v določitvi razmerij F/U za večje število faznih zamikov dinamičnih sil med ležajema. Prav tako bi lahko izdelali napravo v različnih velikostih, kar bi povečalo uporabnost. Z razvojem vse bolj natančnih 3D tiskalnikov lahko pričakujemo, da bo v prihodnosti mogoče izdelati bolj natančne naprave, ki bodo omogočale uspešno izvedbo dinamičnega balansiranja.

5 Literatura

[1] Y. Ishida in T. Yamamoto, *Linear and Nonlinear Rotordynamics*, Wiley, 11 2012.

[2] J. Slavič, *Dinamika, mehanska nihanja in mehanika tekočin*, 3. izd. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, 2023.

[3] L. Knez in J. Slavič, *Dinamika togih teles, Laboratorijske vaje*, dostopno na: `http://lab.fs.uni-lj.si/ladisk/data/pdf/LaboratorijskeVajeDTT.pdf` [ogled: 10. 7. 2023].

[4] T. Košir in J. Slavič, "Manufacturing of single-process 3D-printed piezoelectric sensors with electromagnetic protection using thermoplastic material extrusion," *Additive Manufacturing*, let. 73, 7 2023.

[5] T. Košir in J. Slavič, "Modeling of single-process 3d-printed piezoelectric sensors with resistive electrodes: The low-pass filtering effect," Polymers, let. 15, 1 2023.

[6] G. Awari, C. Thorat, V. Ambade, in D. Kothari, *Additive Manufacturing and 3D Printing Technology*, CRC Press, 2021.

[7] K. Uchino, *The Development of Piezoelectric Materials and the New Perspective*, Elsevier, 2017, str. 1–92.

[8] P. Dineva, D. Gross, R. Müller, and R. Tsviatko, "Piezoelectric materials," *Solid Mechanics and its Applications*, let. 212, str. 7–32, 2014.

[9] *LDAQ 1.0.0 Documentation*, dostopno na: `https://ldaq.readthedocs.io/en/stable/index.html` [ogled: 14. 7. 2024].

[10] M. Boltežar, *Mehanska nihanja - 1. del.* Univerza v Ljubljani Fakulteta za strojništvo, 2006. za strojništvo, 2019.

[11] V. Ramamurti, *Mechanics of Machines*, 3. izd. Alpha Science, 2010.

[12] J. Slavič, *Procesiranje signalov*, `https://github.com/jankoslavic/procesiranjesignalov.git`, 2023, [ogled: 1.7.2024].

3D tisk magnetnega inkrementalnega dajalnika

Matic Plut

Povzetek

V članku je predstavljena izdelava linearnega magnetnega inkrementalnega dajalnika s pomočjo tehnologije 3D tiska ter izračun njegovega premika. Namen raziskave je bil razviti natančen dajalnik položaja z uporabo kompozitnega filamenta, ki vsebuje zlitino NdFeB (neodim, železo, bor). Dajalniki položaja se uporabljajo za določanje lege komponent v številnih aplikacijah. 3D tisk izdelkov iz več materialov z različnimi lastnostmi omogoča izdelavo pametnih struktur in senzorjev v enem procesu, kar pohitri in poceni njihovo izdelavo. S tehnologijo 3D tiska smo izdelali glavo in sled magnetnega dajalnika ter ju namagnetili. Izdelali smo preizkuševališče, na katerem smo lahko merili in izračunali premik natisnjenega dajalnika. V poglavju Rezultati sta predstavljena izračunan in izmerjen premik magnetnega inkrementalnega dajalnika ter njegova napaka. Iz rezultatov lahko zaključimo, da sta pri izdelavi magnetnega dajalnika s 3D tiskom najpomembnejša natančen tisk njegovih komponent in konstantno namagnetenje magnetnih segmentov sledi dajalnika.

1 Uvod

Dajalniki položaja se uporabljajo na mnogih področjih, kot so visoko natančnostne robotske roke, določanje položaja osi v CNC strojih in koordinatnih merilnih napravah [1]. Njihova naloga je natančno prevajanje svojega položaja v izhodni signal. Obstaja več vrst dajalnikov, ki za določitev položaja izkoriščajo različne fizikalne principe. Med najširše uporabljenimi tehnologijami pa so, zaradi dobre odpornosti na umazanijo in maščobe, magnetni dajalniki položaja [2].

Aditivne tehnologije, predvsem 3D tisk, je hitro razvijajoče se tehnologija, ki postaja vse bolj učinkovita in dostopna. Omogoča izdelovanje kompleksnih tridimenzionalnih struktur in izdelkov iz raznovrstnih materialov [3]. Uporaba več različnih vrst ter materialov s posebnimi lastnostmi, kot so piezoelektričnost in električna prevodnost, omogoča izdelavo pametnih struktur in senzorjev. V tem članku je predstavljena izdelava linearnega magnetnega inkrementalnega dajalnika z uporabo tehnologije 3D tiska z uporabo kompozitnega filamenta z vključki NdFeB (neodim, železo, bor) zlitine.

Na področju 3D tiska dajalnikov položaja je narejenih že nekaj raziskav, [4, 5], v katerih so

raziskovali predvsem absolutne elektromagnetne dajalnike izdelane z uporabo 3D tiska dielektričnega PLA materiala. Glava dajalnika zaznava sepremembe v dielektričnosti. V članku [6] je opisana izdelava in magnetizcaija polimera z vključki NdFeB, iz katerega lahko izdelujemo magnete kompleksih oblik in namagentenosti.

2 Metode dela in potek raziskave

2.1 Teoretično ozadje

Linearni magnetni dajalniki so zgrajeni iz sledi, katera nosi inforamcije o položaju ter bralne glave, ki te inforamcije prebira. Delujejo lahko na podlagi dveh fizikalnih principov, in sicer z zaznavanjem spremembe jakosti in polaritete magnetnega polja permanentih magnetov ali z zaznavanjem induciranega magnetnega polja [1]. V splošnem so sestavljeni iz:

- **Magnetne sledi dajalnika** sestavljene segmentov s periodično izmenjujočim se južnim in severnim magnetnim poljem,
- **glave dajalnika**, ki se pomika vzdolžno po magnetni sledi, v njej pa se nahaja senzor za zaznavo magnetnega polja.

Zaznavanje sprememb magnetnega polja dosežemo s Hallovimi senzorji ali z magnetouporovnimi senzorji, uporaba ene ali druge vrste pa je odvisna od namena uporabe dajalnika. Hallovi senzorji se uporabljajo tako v digitalni kot v analogni obliki. Magnetouporovni senzorji zaradi fizikalnega principa zaznave magnetnega polja omogočajo dvakrat večjo ločljivost dajalnikov pri enaki gostoti razporeditve magnetnih odsekov na sledi, zato se velikokrat uporabljajo v aplikacijah, kjer je zahtevana večja natančnost meritev.
Inkrementalni dajalniki imajo dva izhodna signala, v splošnem imenovana A in B. Oba signala lahko zavzemata le visoko stanje (1) ali nizko stanje (0). Signala sta postavljena v kvadraturo (ang. *quadrature*), kar pomeni, da sta v faznem zamiku 90°. To pomeni, da so v ciklu štetja dajalnika 4 različne kombinacije izhodnih signalov A in B. Prehode signalov ločimo na inkremente in dekremente. Razlika med njimi je smer premika dajalnika. Njegovo končno lego določimo s prištevanjem inkrementov in odštevanjem dekrementov, skupno vsoto pa pomnožimo z ločljivostjo.
Glavna lastnost dajalnikov položaja je njihova ločljivost, ki je najmanjša sprememba lege dajalnika, ki ga ta še zazna. Ločljivost linearnih dajalnikov predstavlja dolžino enega koraka, običajno merjena v mikrometrih. Ta se izračuna iz dolžine posameznega odseka sledi in številom bitov, ki jih dajalnik zajema.

2.2 Izdelava magnetnega inkrementalnega dajalnika

Glavo in sled magnetnega inkrementalnega dajalnika smo izdelali s pomočjo tehnologije 3D tiska. Sled je sestavljena iz izmenjujočih se magnetnih in nemagnetnih odsekov. Magnetne odseke izdelamo iz materiala z vključki NdFeB, nemagnetne dele in podporno strukturo pa iz PLA. Dolžina posameznega odseka je 1,6 mm, na enem vzorcu pa je 20 parov magnetnih in nemagnetnih delov. Dolžina ene periode dajalnika je enaka skupni dolžini magnetnega in nemagnetnega segmenta, torej 3,2 mm. Globina magnetih odsekov je 1.5 mm, debelina celotne sledi pa 2 mm.

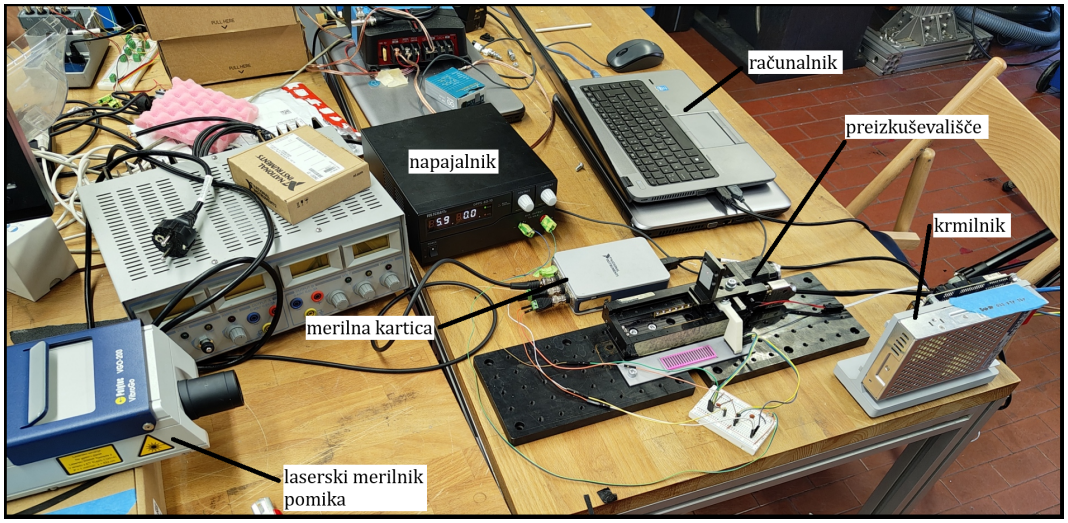
Glavo izdelamo s 3D tiskom iz PLA filamenta. Spremembe magnetnega polja zaznavamo z dvema Hallovima senzorjema AH49E, katerih dimenzije ohišja preberemo iz njihovega podatkovnega lista. Glavo dajalnika dimenzioniramo tako, da upoštevamo velikost Hallovega senzorja in 3D natisnjene magnetne sledi, naredimo tudi kanal za žice senzorja. Razdalja med senzorjem in magnetno sledjo je 0,2 mm. Točki, v katerih senzorja merita gostoto magnetnega polja sta razmaknjeni za 5 mm. Da bosta signala v kvadraturi morata biti Hallova senzorja zamaknjena za 1/4 dolžine periode dajalnika, torej 0,8 mm.

Sled izdelamo na tiskalniku Prusa XL 5T, ki omogoča tiskanje struktur iz kombinacij več materialov. Za tisk magnetnega filamenta smo uporabili šobo velikosti 0,8 mm, temperaturo šobe 230°C, temperaturo mize 40°C, ekstruzijkski koeficient 1,3, maksimalni volumski pretok materiala 3 mm^3/s in višino slojev 0,3 mm. Polimer PLA tiskamo z 0,4 mm veliko šobo pri temperaturi 215 °C in temperaturi mize 40 °C. Del mize, kjer bomo tiskali magnetno sled, prekrijemo s papirnatim lepilnim trakom, da zagotovimo kakovosten prvi sloj.

Sled magnetimo s pripravo za magnetenje. Magnetno polje dosežemo z uporabo permanentnih NdFeB magnetov. Megnento polje usmerjamo z jeklenimi palicami, saj ima jeklo veliko večjo permeabilnost od okoliškega zraka. Sled dajalnika vstavimo v pripravo in vse skupaj položimo na mizo 3D tiskalnika, segreto na 100°C. Po 5 min pripravo s sledjo odstranimo iz mize in ju pustimo, da se ohladita na sobno temperaturo. Med ohlajanjem sledi jo pustimo v pripravi in tako v magnetnem polju. Ker je sled večja od površine, ki jo lahko naenkrat magnetimo, postopek ponovimo še za ostale dele sledi. Pri tem pazimo, da je sled vedno enako orientirano v pripravi za magnetenje.

2.3 Meritev in izračun premika dajalnika

Magnetnemu inkrementalnemu dajalniku želimo določiti spreminjanje magnetnega polja s spreminjanjem lege glave dajalnika na magnetni sledi. Relacijo določamo na preizkuševališču, na katerem hkrati merimo magnetno polje in premik glave. Merilna priprava je prikazana na sliki 1. Konstantne premike dosežemo z linearno premično mizo na katero pritrdimo glavo dajalnika z dvema Hallovima senzorjema AH49E. Miza je gnana s koračnim elektromotrojem, katerega krmilimo s krmilno kartico Duet3D. Položaj mize merimo z laserskim merilnikom Polytec VGO-200-P. Podatke iz senzorjev zajemamo z merilno kartico National Instruments 9215.



Slika 1: Priprava za merjenje premika inkrementalnega dajalnika.

Podatke iz merilne kartice zajemamo z Python knjižnico LDAQ in meritve sproti shranjujemo v binarne .pkl datoteke. Rezultate meritev analiziramo in prikazujemo v Pythonu s pomočjo knjižnic NumPy in Matplotlib.

Glavo in sled dajalnika smo zasnovali tako, da sta signala iz Hallovih senzorjev zamaknjena za četrtino ene periode oz. 0,8 mm. Tako zagotovimo, da sta signala v kvadraturi. Merimo pomik v dveh smereh na dolžini 10-ih period sledi magnetnega inkrementalnega dajalnika, kar je enako 32 mm. Na signalih iz senzorja imamo šum, katerega odstranimo z glajenjem signala. Signale gladimo z drsečim povprečjem, pri velikosti okna funkcije $N = 100$.

Napetosti Hallovih senzorjev pretvorimo v binarne signale z dvema možnima stanjema, in sicer nizko in visoko. To naredimo s funkcijo `inkrementi()`. Funkcija vrne podatkovno polje enakih dimenzij, kot podatkovno polje izmerjenih napetosti. Za vsako napetost v polju na njegovo mesto zapiše 1, če je ta večja od določene vrednosti, in 0, če je manjša. S funkcijo iz izmerjenih napetosti dobimo binarna signala A in B. Vrednost, s katero primerjamo napetosti vsakega senzorja, je povprečna napetost, ki jo izmerimo na enem prehodu glave iz začetne v končno točko ($0 \rightarrow 32$ mm).

S funkcijo `premik()` izračunamo položaj inkrementalnega dajalnika. Funkcija gleda prehode med 1 in 0 na vsakem signalu in za vsak prehod med stanjema določi, ali je inkrement ali dekrement. Za vsak inkrement funkcija legi prišteje 1, za vsak dekrement pa 1 odšteje. Funkcija za vsak indeks shrani vrednost izračunane lege. Lego inkrementalnega dajalnika v milimetrih dobimo tako, da število inkrementov zmnožimo z ločljivostjo našega dajalnika. Ločljivost je 0,8 mm. Na podlagi premika izmerjenega z laserjem lahko določimo napako izračunane vrednosti premika dajalnika. Napaka je razlika med izračunano in izmerjeno vrednostjo z laserjem. Izračunamo jo v točkah kjer pride do spremembe izračunane lege.

3 Rezultati

Pri meritvi na preizkuševališču dobimo 3 signale, katerim odstranimo šum. Določimo začetke in konce premikanja mize. Magnetni odseki na sledi so namagneteni s tako polarizacijo, da se na izhodih Hallovih senzorjev izhodna napetost poveča. Pričakujemo, da se maksimalna vrednost gostote magnetnega polja pojavi na sredini namagnetenega segmenta, kar pomeni, da maksimumi izmerjenega signala predstavljajo sredine namagnetenih segmentov sledi, dolgih 1,6 mm. Določimo maksimume signalov in shranimo časovne indekse, pri katerih se pojavijo maksimumi. Za vse čase shranimo izmerjeno lego dajalnika v tisti točki. Povprečna razlika r_{AB} med maksimumi signalov A in B je 1,033 mm, kar je približno 25 % več od 0,8 mm, kar je dejanski razmak med Hallovima senzorjema v glavi. Do take razlike v zamaknjenosti signalov pride, ker senzorja ne merita gostote magnetnega polja na isti liniji, segmenti pa niso popolnoma enako namagneteni po njihovi širini.

Med prvim premikom mize (0 mm $\rightarrow$ 32 mm) izračunamo povprečni vrednosti napetosti Hallovih senzorjev U_{pA} in U_{pB}. Na sliki 2 sta prikazana signala iz prvega premika mize, izračunani povprečni vrednosti $U_{pA} = 3,086\text{V}$ in $U_{pB} = 3,079\text{V}$ ter označeni maksimumi signalov. Napetosti na obeh Hallovih senzorjih nihata za približno 20 mV od povprečnih. Ta odklon napetosti je relativno majhen zaradi šibke namagnetenosti magnetnih segmentov. Z močnejšim namagnetenjem bi lažje določili prehode med stanji.

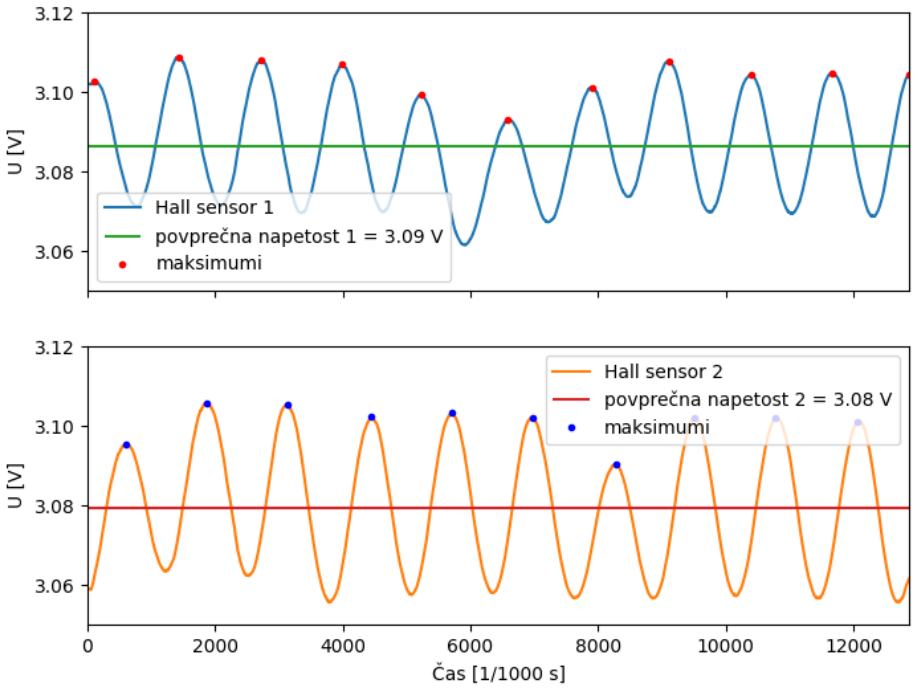
Z funkcijo `inkrementi()` iz meritev Hallovih senzorjev preoblikujemo v binarna signala A in B. Za čas celotno meritev sta prikazana na sliki 3.

Izračunan premik inkrementalnega dajalnika prikažemo na grafu, ki je prikazan na sliki 4. Slika prikazuje premik mize med potekom meritve. Z modro je narisan izračunan premik glave inkrementalnega dajalnika, z rdečo pa premik, izmerjen z laserjem. Izračunan premik je sestavljen iz 'stopnic', saj novo lego dajalnika izračunamo šele, ko pride do spremembe stanja signala A ali B. Premik dajalnika je lahko le večkratnik njegove ločljivosti (0,8 mm). Po prvem premiku iz začetne lege za 32 mm je končni izmerjeni premik enak 31,92 mm, izračunan pa 32 mm.

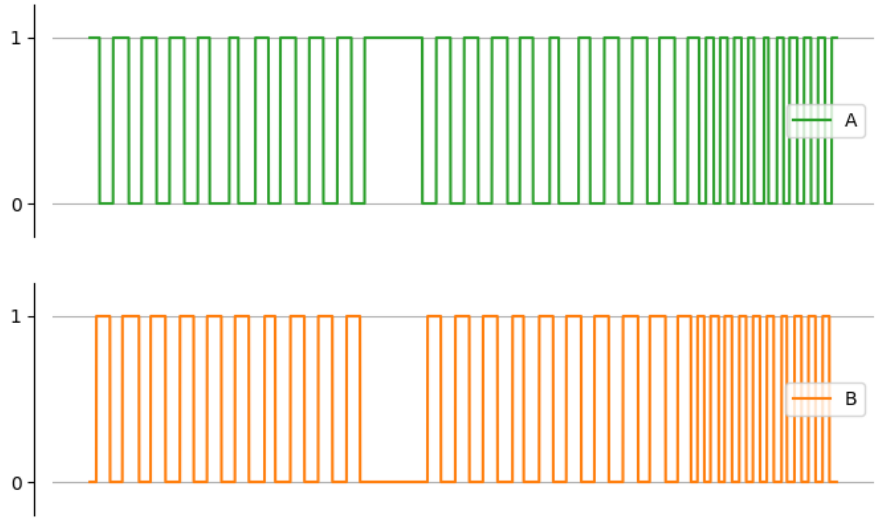
Na sliki 5 je prikazana razlika med izmerjeno in izračunano vrednostjo položaja glave dajalnika. Ta je izračunana le v točkah, kjer pride do spremembe stanj signalov A in B. Na sliki je označena tudi ločljivost inkrementalnega dajalnika. Napaka ne bi smela presegati meje ločljivosti, vendar je iz slike razvidno, da temu v nekaj točkah ni tako. Največja vrednost napake je 0,889 mm. Dejanska ločljivost našega dajalnika je enaka razdalji $r_{AB} = 1,033\text{mm}$.

Do večjih napak pride zaradi določanja prehodov med stanji na podlagi izračunane povprečne vrednosti. Pri tem postopku napaka nastane pri nekonstantnih izmerjenih napetostih na prehodih med segmenti. Do nekonstantnosti pride zaradi različnih namagnetenosti magnetnih segmentov sledi ali zaradi nihanja razdalje med sledjo in glavo dajalnika, saj s tem niha tudi gostota magnetnega polja, ki jo zazna Hallov senzor.

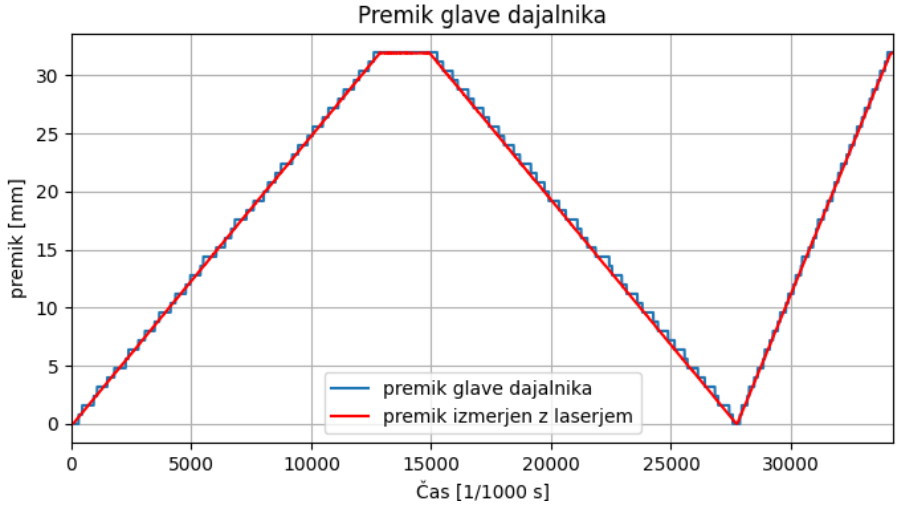
Ločljivost bi lahko zmanjšali z drugačnim procesiranjem signalov, tako da bi bolje določili pre-



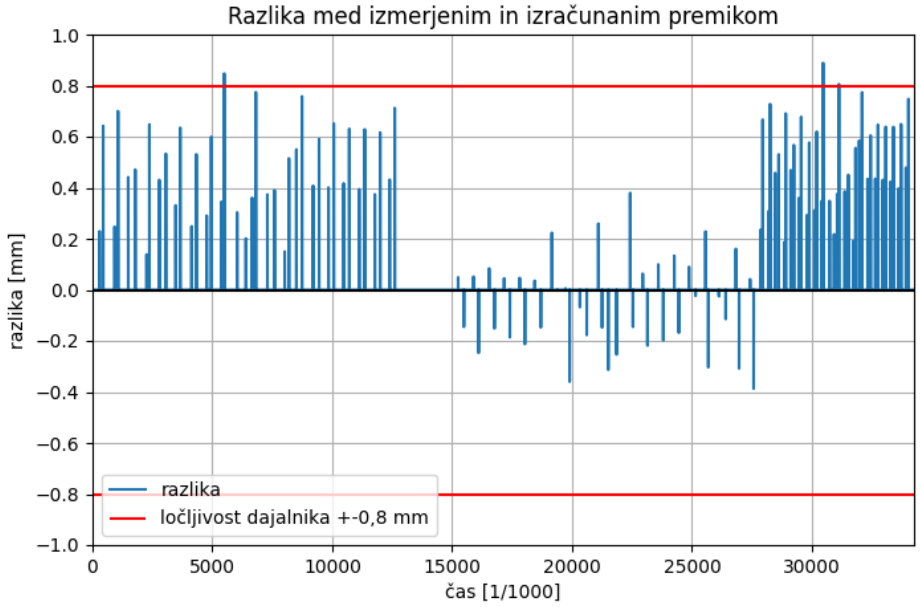
Slika 2: Meritvi napetosti s Hallovima senzorjema v prvem premiku dajalnika (0 mm → 32 mm) z označenimi vrhovi funkcije in povprečnima napetostima U_{pA} in U_{pB} na tem segmentu



Slika 3: Binarna signala A in B celotne meritve premika



Slika 4: Izmerjen in izračunan premik magnetnega inkrementalnega dajalnika



Slika 5: Odstopanje izračunane vrednosti dajalnika od izmerjene z laserjem v točkah prehodov signalov A in B

hode med segmenti sledi. Večjo ločljivost bi dosegli tudi z izdelavo inkrementalnega dajalnika, katerega segmenti bi bili krajši in bi tako bili prehodi med stanj signalov A in B pogostejši. Povečanje pogostosti prehodov izhodnih signalov dosežemo tudi s povečanjem števila Hallovih senzorjev in zmanjšanjem razdalje med njimi.

4 Zaključki

V okviru raziskave smo uspešno izdelali različne strukture iz magnetnega filamenta s tehnologijo 3D tiska ter jih namagnetili. S pomočjo teorije o linearnih inkrementalnih dajalnikih smo 3D natisnili inkrementalni magnetni dajalnik ter zasnovali preizkuševališče za njegovo ovrednotenje. Ugotovili smo, da sta za natančnost dajalnika ključna tako natančnost izdelave s tehnologijo 3D tiska kot tudi konstantno in močno namagnetenje segmentov sledi. Pomembna je konstantna razdalja med Hallovim senzorjem in namagneteno sledjo dajalnika.
V nadaljnjih raziskavah bi lahko natančnost dajalnika izboljšali z drugačnim pristopom določevanja prehodov med stanji in izdelavo dajalnika z več kot dvema Hallovima senzorjema. Pri izdelavi magnetnega inkrementalnega dajalnika bi poskušali s tehnologijo 3D tiska v celoti natisniti senzor, ki bi zaznaval spremembe magnetnega polja.

5 Literatura

[1] D. S. Nyce, *Linear position sensors: theory and application.* John Wiley & Sons, 2004.

[2] RLS, *Knowledge center - Encoder handbook*. dostopno na: https://www.rls.si/eng/encoder-handbook [ogled: 10. 6. 2024].

[3] A. Kantaros, E. Soulis, F. I. T. Petrescu in T. Ganetsos, "Advanced composite materials utilized in fdm/fff 3d printing manufacturing processes: the case of filled filaments," *Materials*, let. 16, Ĺˇt. 18, str. 6210, 2023.

[4] C. Herrojo, F. Paredes, J. Bonache in F. Martin, "3-d-printed high data-density electromagnetic encoders based on permittivity contrast for motion control and chipless-rfid," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, let. 68, Ĺˇt. 5, str. 1839–1850, 2020.

[5] F. Paredes, C. Herrojo in F. Martín, "3d-printed quasi-absolute electromagnetic encoders for chipless-rfid and motion control applications," *Electronics*, let. 10, Ĺˇt. 10, str. 1154, 2021.

[6] H. Komura, M. Kitaoka, T. Kiyomiya in Y. Matsuo, "Establishment of multipole magnetizing method and apparatus using a heating system for nd-fe-b isotropic bonded magnets," *IEEE Transactions on Magnetics*, let. 44, Ĺˇt. 11, str. 4266–4268, 2008.

Alternativna odprtokodna metoda za izvedbo vibracijskega testa letal z uporabo hitre kamere

Maks Simčič

Povzetek

Zemeljski vibracijski test predstavlja zadnji mejnik v zasnovi letalnika pred prvim testnim poletom. Zaradi visokih stroškov razvoja novih tipov letalnikov sodobne študije stremijo k optimizaciji izvedbe testiranja, pri čemer mora ta še vedno omogočati visoko kakovost pridobljenih podatkov. V sklopu te raziskave je bila zasnovana alternativna metoda za izvajanje zemeljskega vibracijskega testa z uporabo optičnih sistemov. Temelj metode predstavlja zajem odziva strukture z uporabo hitre kamere. Del metode za identifikacijo odziva strukture je bil zasnovan na način, ki omogoča visoko mero avtomatizacije testiranja, kar znižuje prisotnost napak, zvišuje ponovljivost ter pohitri izvedbo testov. Za zagotavljanje zanesljive identifikacije dinamskih lastnosti z visoko prostorsko gostoto je bila v sklopu zasnove metode uporabljena hibridna modalna analiza. Ta združuje minimalno uporabo zanesljivih vendar neoptimalnih senzorjev za izboljšanje modalne identifikacije po celotni strukturi, ki nam jo ponujajo slikovne meritve. Zasnovana alternativna metoda je bila uspešno primerjana z že obstoječo in zanesljivo konvencionalno izvedbo vibracijskega testa z uporabo pospeškomerov. Pri primerjavi metod je alternativna metoda indicirala potencial za pohitritev izvedbe vibracijskega testa letalske strukture.

1 Uvod

Zemeljski vibracijski test v sklopu zasnove novega letalnika predstavlja pomemben mejnik za uspešno izvedbo prvega testnega poleta. Kljub temu, da je bilo področje v preteklosti že precej raziskano, se moderne študije osredotočajo na optimizacijo metod, ki bi pohitrile in pocenile izvedbo testiranja. V sklopu dinamike letalskih struktur se običajno osredotočamo na nižja frekvenčna območja, ki so z vidika aero-elastičnosti najpomembnejša [1]. V teh frekvenčnih območjih so amplitude pomikov v primerjavi z amplitudami pospeškov izrazitejše, kar z vidika šuma daje smisel zajemu odziva strukture z uporabo optičnih metod (posredno merjenje pomikov). Na podlagi tega je v sklopu te raziskave zasnovana alternativna metoda za izvajanje vibracijskega testa s hitro kamero. Z uporabo optičnih sistemov lahko dosežemo veliko mero avtomatizacije, kar se pogosto izrazi v cenejši in hitrejši izvedbi testiranja.

2 Razvoj in validacija metode

2.1 Teoretično ozadje

Dinamični aero-elastični odziv strukture pogojuje diferencialna enačba drugega reda [1]:

$$\mathbf{M}\ \ddot{\boldsymbol{d}}(t) + \mathbf{C}\ \dot{\boldsymbol{d}}(t) + \mathbf{K}\ \boldsymbol{d}(t) = \mathbf{C_{aero}}(v^2)\ \dot{\boldsymbol{d}}(t) + \mathbf{K_{aero}}(v)\ \dot{\boldsymbol{d}}(t), \tag{1}$$

kjer $\boldsymbol{d}$ predstavlja vektor pomika v izbranih prostostnih stopnjah. Leva stran enačbe se navezuje na strukturo, kjer so $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$ in $\mathbf{K}$, masna, dušilna in togostna matrika strukture. Desna stran popisuje aerodinamično vzbujanje, ki je funkcija hitrosti obtekajočega fluida. Pri tem matriki $\mathbf{C_{aero}}$ in $\mathbf{K_{aero}}$ predstavljata aerodinamično dušenje in togost. V sklopu zemeljskega vibracijskega testa je izvedena eksperimentalna določitev dinamskih lastnosti letalske strukture. Pri tem izhajamo iz enačbe (1), pri čemer je neznano aerodinamično vzbujanje predstavljeno z znanim vzbujevalnim signalom. Rešitev diferencialne enačbe predstavljajo lastne vrednosti in lastni vektorji, ki so neposredno povezani z modelnimi parametri: lastnimi frekvencami, oblikami in razmerniki dušenja. Le ti nam omogočajo enostavno karakterizacijo dinamike struktur [2, 3].

Za eksperimentalno določitev modalnih lastnosti je potrebno poznavanje vzbujanja in odziva strukture. V sklopu tega dela se osredotočamo na uporabo alternativnega pristopa pri zajemu odziva strukture, konkretno pomikov, z uporabo optičnega sistema. Osnovo za zajem predstavlja centralna perspektivna preslikava, ki jo popisuje spodnja enačba [1, 2, 3]:

$$\boldsymbol{u} = \mathbf{P}\ \boldsymbol{U} = \mathbf{K}\left[\mathbf{R}|\boldsymbol{t}\right]\ \boldsymbol{U}, \tag{2}$$

kjer je $\mathbf{R}$ ortogonalna rotacijska matrika in $\boldsymbol{t}$ vektor translacije, ki skupaj preslikata točke iz globalnega koordinatnega sistema v koordinatni sistem kamere. Z matriko $\left[\mathbf{R}|\boldsymbol{t}\right]$ so določeni t. i. zunanji (ang. *extrinsic*) parametri kamere. Matrika $\mathbf{K}$ preslika točke iz koordinatnega sistema kamere v ravnino slike in tako določa notranje (ang. *intrinsic*) parametre kamere. Celotno centralno perspektivno preslikavo popisuje matrika $\mathbf{P}$ [2, 3].

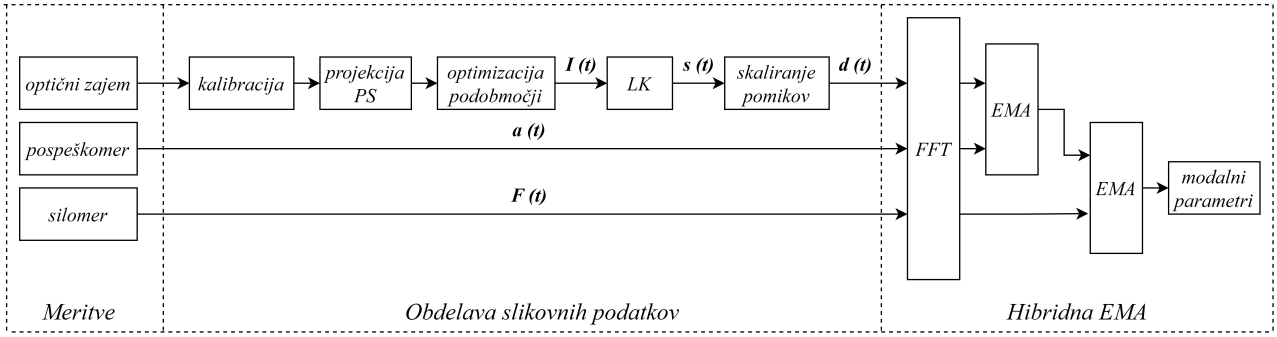
Za identifikacijo pomikov iz zaporedja slik je poznanih več metod. V sklopu te naloge je uporabljena metoda Lucas-Kanade. Pri tej metodi gre za optimizacijski pristop k izračunu optičnega toka, pri katerem v iterativnem postopku izbrano pod-območje (ang. *subset*) zajetih slik poravnamo z referenčno sliko. Izraz, iz katerega je mogoča določitev vektorja ravninskega pomika $\boldsymbol{s}(k)$, popisuje spodnja enačba [2, 3]:

$$\sum_{x\in\kappa} \nabla\mathbf{I_0}(x)\left(\mathbf{I_0}(x) - \mathbf{I_1}(x)\right) + \boldsymbol{s}(k)\left(\nabla^T\mathbf{I_0}(x)\nabla\mathbf{I_0}(x)\right) = 0, \tag{3}$$

pri čemer $\mathbf{I_1}$ predstavlja sivinske vrednost zajetega pod-območja, $\mathbf{I_0}$ pa referenčnega.

2.2 Zasnova alternativne metode

Na sliki 1 je prikazan diagram poteka zasnovane metode za izvedbo vibracijskega testa. Prvi sklop metode predstavlja eksperimentalni zajem meritev, drugi in tretji pa obdelavo zajetih podatkov in določitev modalnih parametrov strukture.



Slika 1: Diagram poteka metode.

Zajem podatkov

Osnova za uspešno izvedbo eksperimentalne modalne analize je poznavanje vzbujanja in odziva strukture. V sklopu predlagane metode vzbujevalni signal predstavljajo meritve vzbujevalne sile na točki vzbujanja. Za potrebe implementacije hibridne modalne analize je potreben zajem odziva strukture z dvema ločenima pristopoma, pri čemer eden izmed njiju ponuja meritve visoke kvalitete za identifikacijo lastnih vrednosti, drugi pa nudi visoko prostorsko gostoto za določitev modalnih konstant po celotni površini strukture. V sklopu metode je bil signal odziva visoke kvalitete zajet z uporabo pospeškomera, odziv z visoko prostorsko gostoto pa z uporabo hitre kamere.

Obdelava slikovnih podatkov

Večinski odziv strukture je določen na podlagi slikovnih meritev z uporabo hitre kamere. Za pravilno obdelavo zajetih podatkov je potrebno slikovnemu sistemu določiti notranje in zunanje parametre. V kolikor optični sistem uporabljamo večkrat, lahko notranje parametre kamere določimo vnaprej, na podlagi slik znanega kalibracijskega vzorca v različnih položajih. Ko optični sistem postavimo v prostor, pa na podlagi točk na sliki (točke $\boldsymbol{u}$), katerih lokacijo v prostoru poznamo (točke $\boldsymbol{U}$), določimo še zunanje parametre kamere. Poznanih je več metod reševanja problema določitve položaja kamere v prostoru (ang. *Perspective-n-point*, PnP), ki delujejo neposredno na podlagi povezave (2). Reševanje je običajno izvedeno iterativno, z minimizacijo napake reprojekcije vseh znanih opazovanih točk na osnovi enačbe centralne perspektivne preslikave [2, 6]:

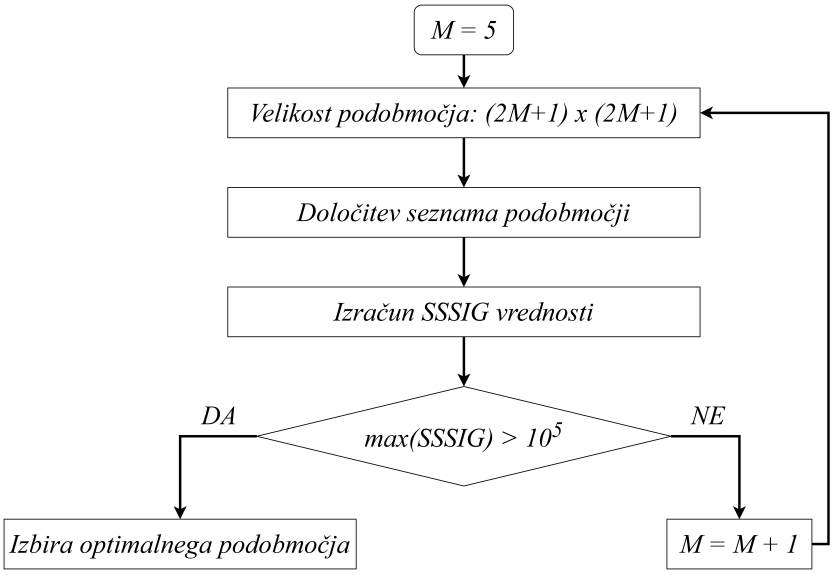
$$\sum_i (\boldsymbol{u}_i - \mathbf{P}\boldsymbol{U}_i)^2. \tag{4}$$

Na podlagi geometrijskega modela so določene globalne pozicije merilnih točk s pripadajočimi tolerančnimi območji. S poznavanjem projekcijske matrike $\mathbf{P}$ lahko globalno določene točke in območja, preko zveze (2), projiciramo iz strukture letala na sliko.

Pri določitvi pomikov iz zaporedja sivinskih slik po metodi Lucas-Kanade je kvaliteta identifikacije pomikov odvisna od pozicije in velikosti podobmočja. Kakovost izbranega podobmočja je karakterizirana z uporabo kriterija seštevkov kvadratov gradientov intenzitet podobmočja (ang. *Sum of Square of Subset Intensity Gradients, SSSIG*) [4]:

$$\mathrm{SSSIG}(k) = \sum_{u \in \kappa} \left(\frac{\partial I_0}{\partial u} \right)^2, \tag{5}$$

Iz že obstoječega algoritma za optimalno določitev velikosti podbomočja, glede na vrednosti SSSIG kriterija, je bil le ta razširjen še na optimizacijo lokacije znotraj tolerančnega območja izbrane merilne točke. Zasnovan algoritem je prikazan v sklopu diagrama na sliki 2.



Slika 2: Določitev optimalne velikosti in pozicije podobmočja.

Velikost podobmočja je definirana z zapisom $(2\ M + 1) \times (2\ M + 1)$, pri čemer je začetna vrednost parametra $M = 5$. Glede na izbrano velikost podobmočja je nato določen seznam podobmočji k, ki jih je mogoče umestiti v projicirano tolerančno območje posameznega merilnega mesta. Za vsako podobmočje sta v naslednjem koraku določeni vrednosti SSSIG kriterija v obeh gradientnih smereh. V kolikor ena izmed vrednosti kriterija preseže določeno vrednost

(10^5 glede na vir [4]), je zanka prekinjena. Optimalno podbomočje je določeno glede na trenutno vrednost parametra M in lokacijo, v kateri je bila izračunana največja vrednost SSSIG kriterija. V kolikor v nobenem izmed podobmočji ni bila presežena mejna vrednost kriterija, se zanka ponovi, pri čemer se meja podobmočja poveča za en slikovni element.

Glede na optimalni izbor podbomočji prostostnih stopenj je izvedena identifikacija ravninskih pomikov iz zaporedja sivinskih slik z uporabo metode Lucas–Kanade. Pridobljeni pomiki so določeni v koordinatnem sistemu slike, z enoto slikovni element, in jih je potrebno pretvoriti v prostorske. Ker je pri zajemu slike izgubljena globina scene, za enolično določitev prostorskih pomikov potrebujemo najmanj dva pogleda na isto referenčno točko v prostoru. Določitev prostorskih pomikov je kompleksen postopek, ki pa se z uporabo določenih predpostavk lahko poenostavi. V kolikor prostostne stopnje strukture večinoma nihajo zgolj v eni smeri, in sicer v smeri normalne na površino, je določitev pomikov enostavnejša in omogoča uporabo zgolj enega pogleda. Za posamezno prostostno stopnjo je tako predpisan globalni normalni vektor $\boldsymbol{n}$, ki predstavlja smer nihanja izbrane prostostne stopnje in je v koordinatnem sistemu slike definiran skladno z enačbo:

$$\boldsymbol{e} = \mathbf{P}\left(\boldsymbol{n} + \boldsymbol{U}_{ref}\right) - \mathbf{P}\left(\boldsymbol{U}_{ref}\right). \tag{6}$$

Aproksimizacija prostorskega izven-ravninskega pomika je, na podlagi vektorja smeri nihanja, izvedena po spodnji zvezi:

$$\boldsymbol{d}(t) = \boldsymbol{e_u} \boldsymbol{s_u}(t) + \boldsymbol{e_v} \boldsymbol{s_v}(t). \tag{7}$$

Hibridna modalna analiza

Kvaliteta optičnih meritev je v veliki meri odvisna od ustrezne priprave merilnega okolja. Prav tako je razmerje med signalom in šumom pri slikovnih meritvah tipično nižje v primerjavi s konvencionalnimi senzorji. Da lahko še vedno dovolj dobro karakteriziramo strukturo, je v sklopu zasnovane metode uporabljena hibridna modalna analiza, ki omogoča določitev modalnih konstant tudi v frekvenčnih območjih, pri katerih so pomiki na ali celo pod mejo šuma optičnega sistema. Ker pospeškomeri običajno nudijo manj šumne podatke, so na podlagi pospešenosti strukture določene začetne lastne vrednosti. Njihovo poznavanje pa nam olajša identifikacijo stabilnih polov pri določitvi modalnih parametrov, z visoko prostorsko gostoto, iz pomikov, ki so bili identificirani na podlagi optičnega toka [5].

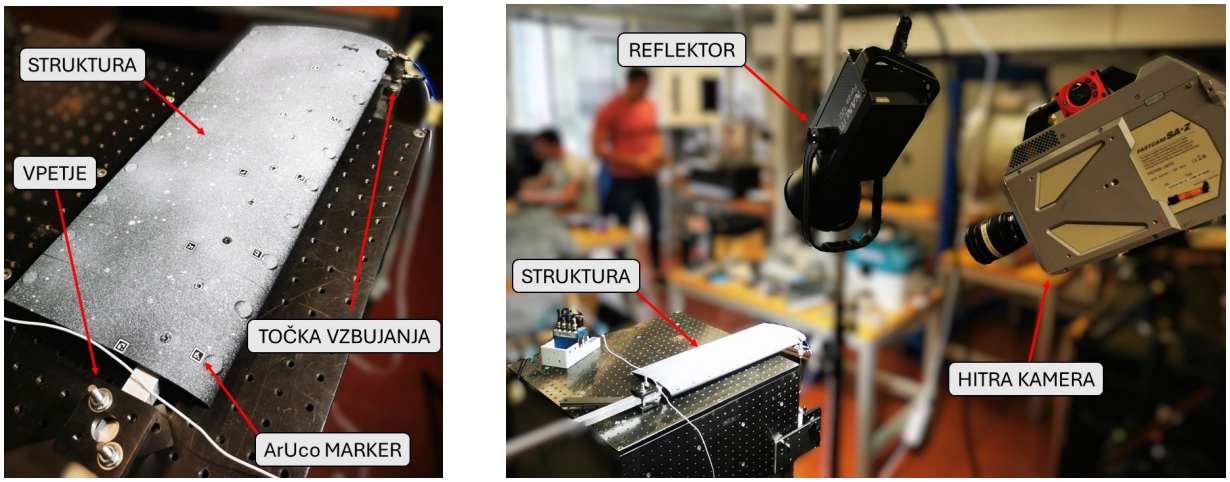
2.3 Validacijski eksperiment

Za validacijo alternativne metode je bil izdelan model strukture letalskega krila. Osnovni gradnik je predstavljala aluminijasta cev kvadratnega preseka 20 mm z delilno stene 2 mm in dolžine 600 mm. Nanjo je bilo privijačenih deset aerodinamičnih odskov iz PLA materiala, z aeroprofilom NACA 0018, širine 50 mm in dolžino tetive 200 mm, ki so modelu podajali

značilno obliko letalske strukture. Model krila je bil na merilno mesto vpet konzolno, kar ponazarja klasično vpetje krila letala. Poleg značilne konstrukcije zasnove je bila struktura tudi numerično analizirana, kar je potrdilo ustreznost odziva, primerljivega z odzivom realnega letalskega krila.

Za uspešno detekcijo optičnega toka je bil na strukturo nanešen visoko-kontrastni naključni vzorec (ang. *speckle pattern*). Na znane točke na strukturi so bili postavljeni ArUco markerji, ki so omogočali avtomatsko izvedena kalibracije izbranega pogleda (glej sliko 3a).

Struktura je bila točkovno vzbujana z uporabo elektro-magnetnega stresalnika, z lokacijo 70 mm pred elastično osjo strukture. Na sledeči način smo tako v strukturi vzbudili tako upogibne kot tudi torzijske nihajne načine, kar nam je omogočilo vpogled v širši spekter lastnih oblik. Zavoljo uporabe hibridne modalne analize in validacije ustreznosti optične metode je bil v tridesetih točkah in v točki vzbujanja pomerjen odziv z uporabo pospeškomera. V sklopu alternativne metode pa je bil odziv strukture posnet z uporabo hitre kamere PHORTON FASTCAM SA-Z, ki je bila postavljena pred prednji rob modela krila, pri čemer je optična os na vodoravno ravnino strukture vpadala pod kotom 32°. Postavitev eksperimentalne verige je prikazana na sliki 3.



(a) Merjena struktura. *(b) Postavitev optičnega sistema.*

Slika 3: Eksperimentalna postavitev vibracijskega testa.

Obdelava podatkov je bila poleg lastne implementacije algoritmov izvedena z uporabo odprtokodnih paketov openCV [6] in pyIDI [7] pri optičnem delu in paketa sDyPy [8] pri izvedbi hibridne eksperimentalne modalne analize.

3 Rezultati

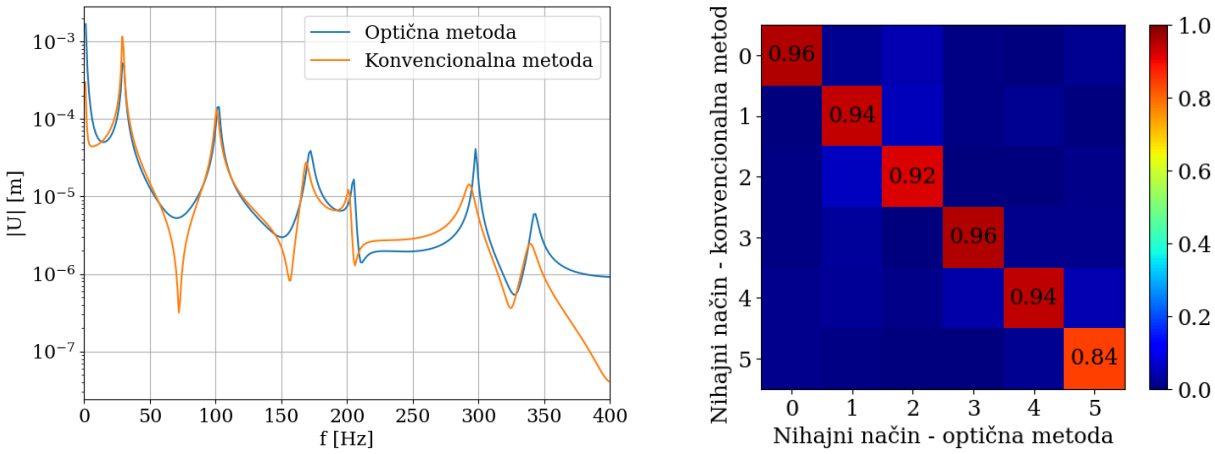
3.1 Validacija alternativne metode

V sklopu raziskave je bila izvedena primerjava konvencionalne metode izvajanja vibracijskega testa in alternativne metode z uporabo optičnega sistema. V tabeli 1 so primerjane vrednosti lastnih frekvenc.

Tabela 1: Primerjava identificiranih lastnih frekvenc pri konvencionalni in alternativni metodi.

Lastni način	1.	2.	3.	4.	5.	6.
Konvencionalna metoda	29,4 Hz	100,9 Hz	168,6 Hz	201,7 Hz	293,3 Hz	339,1 Hz
Alternativna metoda	29,7 Hz	102,1 Hz	171,8 Hz	205,0 Hz	298,0 Hz	342,6 Hz
Relativno odstopanje	1,0 %	1,2 %	1,9 %	1,6 %	1,6 %	1,0 %

Na sliki 4a sta primerjani frekvenčni prenosni funkciji za eno izmed prostostnih stopenj, na sliki 4b pa je prikazana primerjava prvih šest lastnih oblik z uporabo MAC kriterija.



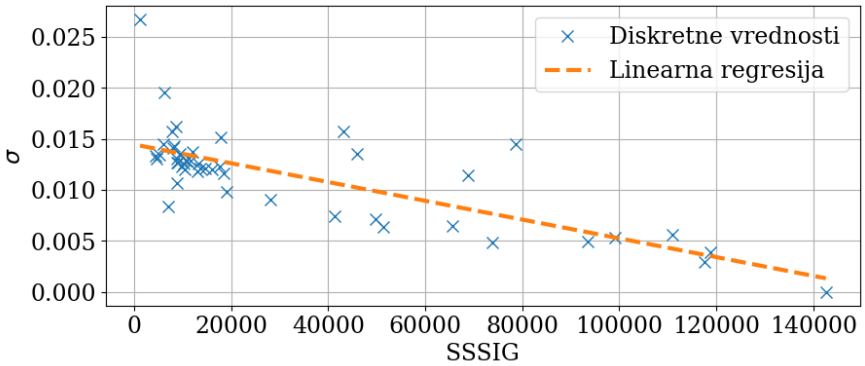
(a) Primerjava FPF. *(b) MAC kriterij.*

Slika 4: Primerjava konvencionalne in alternativne metode.

Iz pridobljenih rezultatov je mogoče opaziti, da se identifikacija dinamskih lastnosti strukture pri uporabi alternativne metode precej ujema z validacijskimi vrednostmi. To je predvsem izrazito pri nižjih lastnih načinih, le ti pa so z vidika aero-elastike najpomembnejši. Pri nihanju strukture v nižjih frekvenčnih območjih imamo pogosto prisotne večje pomike, zato je razmerje med signalom in šumom višje, kar se odraža v natančnejši identifikaciji dinamskih lastnosti. Obratno velja za višja frekvenčna območja. Ker se v sklopu vibracijskih testov letal pogosto osredotočamo predvsem na prva dva lastna načina, je merjenje pomikov z vidika šuma smiselno. Glede na pridobljene rezultate lahko potrdimo ustreznost uporabe alternativne metode za izvajanje vibracijskega testiranja letalske strukture z uporabo hitre kamere.

3.2 Vpliv izbire podobmočja in SSSIG kriterij

Ker zasnovana metoda optimizira izbiro poodobmočja na podlagi SSSIG kriterija, je bil v sklopu raziskave preučen njegov vpliv na kvaliteto indetifikacije pomikov. Znotraj tolerančnega območja enega merilnega mesta je bilo ovrednotenih več različnih podobmočji. Standardni odkloni odziva v frekvenčni domeni, glede na SSSIG vrednosti podobmočji, so prikazani na sliki 5. Trend nakazuje nižjo prisotnost šuma pri območjih z višjo vrednostjo kriterija, s čimer lahko potrdimo pozitiven vpliv optimizacijskega algoritma na kakovost določitve odziva.



Slika 5: Standardni odklon odziva glede na SSSIG vrednost podobmočja.

3.3 Vpliv avtomatizacije in časovni doprinos alternativne metode

V sklopu raziskave je bila izvedena časovna primerjava alternativne metode s konvencionalno metodo vibracijskega testa. Za zajem odziva tridesetih prostostnih stopenj je pri konvencionalni uporabi plavajočega pospeškometra (ang. *roving sensor*) testiranje modela strukture potekalo 30 minut, z uporabo optične metode pa zgolj 5 minut. Kljub temu, da so časovni okvirji precej grobo določeni, nam ponujajo dobro indikacijo potenciala alternativne metode za pohitritev izvedbe testiranja, ki je izrazitejši pri višanju števila opazovanih prostostnih stopenj.

4 Zaključki

V sklopu raziskave je bila zasnovana alternativna metoda za izvajanje zemeljskega vibracijskega testa letal z uporabo optičnega sistema. Ustreznost alternativne metode je bila uspešno potrjena z validacijskim testom že obstoječe in preverjene konvencionalne metode z uporabo pospeškomerov. Implementacija alternativne metode nam zaradi zmanjšane kompleksnosti merilne verige in velike mere avtomatizacije omogoča hitrejšo izvedbo testov z veliko mero ponovljivosti. Njena uporaba pa nam tako olajša in pohitri prehod letala iz prototipne faze do prvega testnega poleta. Za končno potrditev ustreznosti metode, bi bilo potrebno preveriti še na realni letalski strukturi.

5 Literatura

[1] S. Giclais, P. Lubrina in C. Stephan, Aircraft ground vibration testing at onera, Testing in Aerospace Research, let. 12, 2016.

[2] D. Gorjup, Identifikacija prostorskih obratovalnih oblik nihajočih struktur z uporabo samo ene hitre kamere, doktorska disertacija, Ljubljana, 2022.

[3] J. Javh, Modalna analiza na podlagi meritev pomikov s hitro kamero, Ljubljana, 2018.

[4] B. Pan, H. Xie, Z. Wang, K. Qian, in Z. Wang, Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns, Optics Express, let. 16, str. 7037-7048, 2008.

[5] J. Javh, J. Slavič in M. Boltežar, High frequency modal identification on noisy high-speed camera data, Mechanical Systems and Signal Processing, let. 98, str. 344 – 351, 2018.

[6] Open Source Computer Vision Library, OpenCV team, 2024. dostopno na: https://opencv.org/ [ogled: 15. 07. 2024].

[7] K. Zaletelj, K. Čufar, D. Gorjup, J. Slavič, Jaša Šonc, Ivan Tomac, T. Masmeijer, ladisk/pyidi: Release of the version v0.30.1, April 2024. dostopno na: https://doi.org/10.5281/zenodo.4017152 [ogled: 15. 07. 2024].

[8] Structural Dynamics Python, SDyPy Consortium, 2020, dostopno na: https://github.com/sdypy/sdypy [ogled: 15. 07. 2024].

Stabilnost Taylor-Couetteovega toka med fazno spremembo

Urh Štempihar Jazbec, Enej Istenič, Miha Brojan

Povzetek

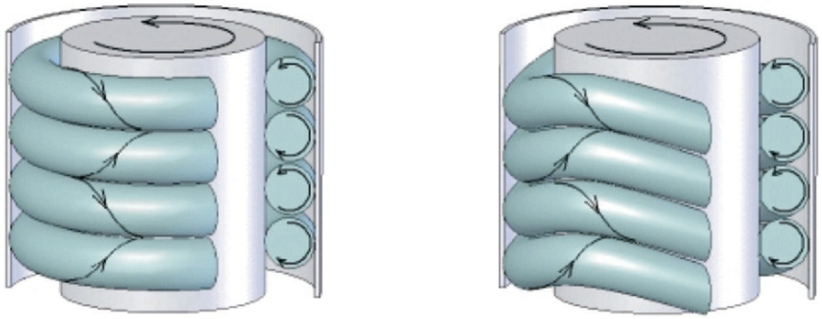
V članku obravnavamo stabilnost Taylor-Couettovega toka med fazno spremembo, ki je časovno in krajevno odvisna, torej tok fluida od viskoznega do viskoelastičnega. Izpeljava stabilnostnih enačb, ki jih numerično rešujemo v programu Wolfram Mathematica, izhaja iz ravnovesne Orr-Sommerfeldove enačbe in kontinuitetne enačbe o ohranitvi mase. Ob upoštevanju linearne teorije majhnih motenj harmonske oblike, ki jih aproksimiramo z Besselovimi funkcijami, časovno stabilnost Taylor-Couetteovega toka določimo po metodi razcepa singularne vrednosti. Obravnavani so primeri polimerizacije fotopolimera, pri osvetljevanju z notranje ali zunanje strani, pri čemer rotira le notranji ali zunanji valj. Cilj je določiti, kako na časovno stabilnost toka vpliva stopnja polimerizacije fluida, režim vrtenja valjev in njihova hitrost. Ugotovili smo, da je viskoelastičen fluid stabilnejši od viskoznega in da je tok viskoelastičnega fluida najbolj stabilen v primeru, ko je fazna sprememba odvisna samo od časa. Taylor-Couetteov tok je stabilnejši pri nižjih hitrostih vrtenja valjev in pri višjih stopnjah polimerizacije ter v primeru vrtenja zunanjega valja. Glede na numerične rezultate elastičnost v viskoelastičnem fluidu povečuje togost in posledično tok postane stabilnejši.

1 Uvod

Že pred več kot sto leti so znanstveniki začeli s preučevanjem stabilnosti različnih tokov, med katerimi so najpogosteje obravnavani tok med dvema neskončnima ravninama, tok v cevi ali kanalu in tok med dvema koncentričnima rotirajočima valjema oziroma Taylor-Couetteov tok [1]. Teoretično in eksperimentalno so pokazali, da je tok pri nizkih hitrostih stabilen, vendar nikomur do sedaj ni uspelo natančno določiti mejne hitrosti med stabilnim in nestabilnim stanjem. Najbolje je to uspelo Raynoldsu, ki je predpostavil naključno motnjo, nato pa definiral pri kakšnih pogojih bo ta motnja rasla in vodila v tranzicijo v turbulentni tok, oziroma bo zamrla in bo tok stabilen. Na ta način je definiral okvirno vrednost, ni pa določil najvišje in najnižje hitrosti, pri kateri bo tok še stabilen, oziroma bo postal nestabilen.

V članku se bomo osredotočili na Taylor-Couetteov tok, ki ga uporabljamo za desolifikacijo morske vode, magnetohidrodinamiko, analizo viskoznosti in pri drugih postopkih. Z njim lahko

ob določenih predpostavkah opišemo tudi astrofizikalne tokove materiala v cirkumstelarnih diskih okoli zvezd in planetov [2]. Couette je pripravo z dvema koncentričnima valjema uporabljal za določevanje viskoznosti fluidov, Taylor pa se je prvi podrobneje lotil preučevanja stabilnosti Couettovega toka. Pokazal je, da je v primeru vrtenja zgolj notranjega valja tok stabilen, vendar le do določene hitrosti. Nad to kritično hitrostjo se pojavijo tako imenovani osnosimetrični Taylorjevi vrtinci (slika 1a), ki ostajajo v primeru, da hitrosti ne povečujemo. Pri povečevanju hitrosti začnejo ti vrtinci valoviti (slika 1b) in stanje ni več osnosimetrično. Na sliki 1 so poleg oblike vrtincev prikazane tudi smeri gibanja fluida znotraj Taylorjevih vrtincev. Ob nadaljnjem povečevanju hitrosti postopoma dosežemo kritično hitrost, pri kateri se pojavi turbulenten tok [4]. Taylor je v članku [1] obravnaval tudi spiralne vrtince, ki jih dobimo v primeru, ko se valja vrtita v nasprotnih smereh.



(a) *(b)*

Slika 1: Taylorjevi vrtinci (a) in valoviti Taylorjevi vrtinci (b) [5]

Dosedanje raziskave pretežno obravnavajo le viskozen odziv tekočin, v nalogi pa bomo analizirali stabilnost viskoelastične tekočine. Osredotočili se bomo na prehod, ki ga bomo opisali z uporabo operatorjev ulomčnega in spremenljivega reda, med viskozno in viskoelastično tekočino. Poznavanje slednjega je pomembno pri 3D tisku, ekstrudiranju in brizganju polimerov, zamreževanju smol, mešanju različnih tekočin, strjevanju ledu, lave, itn., [3].

V nadaljevanju bomo predstavili izpeljavo stabilnostnih enačb za Taylor-Couetteov tok med fazno spremembo in upoštevane predpostavke. Določili bomo stabilnost Taylor-Couettovega toka za viskoezen fluid in viskoelastičen fluid med fazno spremembo, ki je krajevno in časovno odvisna in jo dosežemo z osvetljevanja fotopolimera.

2 Metode dela in potek raziskave

2.1 Fizikalno-matematični model

Pri izpeljavi stabilnostnih enačb za tok fluida izhajamo iz ravnovesne Orr-Sommerfeldove enačbe (1), ki govori o ohranitvi momentov [3]. Neodvisno sta jo v istem času izpeljevala Orr in Sommerfeld, zato nosi ime po obeh. V enačbi

$$\rho\left(\frac{\partial v_j}{\partial t}+v_k\frac{\partial v_j}{\partial r_k}\right)=\frac{\partial}{\partial r_k}\sigma_{jk}+\rho\xi_j \tag{1}$$

predstavlja člen ξ_j zunanje obremenitve, σ_{jk} komponente napetostnega tenzora, v_j komponente hitrosti v smeri posamezne koordinate, ρ gostoto fluida in r_j koordinate krajevnega vektorja. Glede na obliko obravnavanega sistema bomo uporabili cilindrični koordinatni sistem, pri čemer je $r_j, j \in \{r, \phi, z\}$. Pri obravnavi viskoelastičnega fluida ima napetostni tenzor obliko

$$\sigma_{jk}(r_j,t)=\underbrace{-p\delta_{jk}+2\mu_0\dot{\epsilon}_{jk}(r_j,t)}_{\text{viskozni del}}+\underbrace{2\mu^{\alpha(r_j,t)}E^{1-\alpha(r_j,t)}{}_0^C\mathcal{D}_t^{\alpha(r_j,t)}\epsilon_{jk}(r_j,t)}_{\text{viskoelastični del}}\text{[3]}. \tag{2}$$

V enačbi (2) predstavlja $p\delta_{jk}$ gradient tlaka, μ_0 dinamično viskoznost tekočine pred fazno spremembo, μ in E dinamično viskoznost fluida in modul elastičnosti po daljšem času. Členi $\dot{\epsilon}_{jk}(r_j,t)$ in $\epsilon_{jk}(r_j,t)$ so komponente tenzorjev specifičnih hitrosti in specifičnih deformacij. Parameter α opisuje stopnjo polimerizacije v odvisnosti od kraja in časa. Pred fazno spremembo in na mestih, kjer je fluid popolnoma viskozen ima vrednost $\alpha = 1$, po fazni spremembi, ko je fotopolimer polimeriziral in je fluid viskoelastičen, pa je $\alpha = 0$. V enačbi (2) nastopa Caputov operator

$${}_{t_0}^C\mathfrak{D}_t{}^n f(t) := \frac{1}{\Gamma(m-n)}\int_{t_0}^{t}(t-t')^{m-n-1}\frac{\partial^m}{\partial t'^m}f(t')\,dt'\text{[3]}, \tag{3}$$

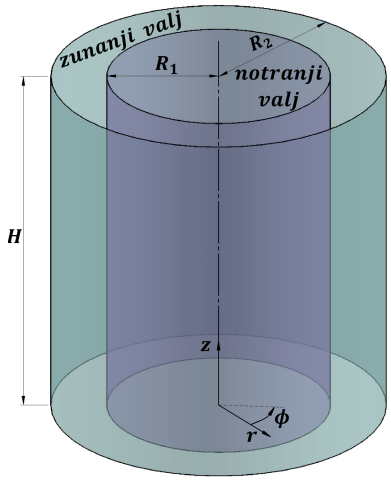
ki je operator ulomčnega in spremenljivega reda, zato z njim lahko opišemo fluid med fazno spremembo od viskoznega do viskoelastičnega fluida. Caputov operator označimo s črko C pri operatorju $\mathfrak{D}$, pod katerim zapišemo spodnjo (t_0), ki je v našem primeru 0, in zgornjo (t) mejo območja v katerm operator n-tega reda deluje nad poljubnim matematičnim izrazom $f(t)$. V definiciji Caputovega operatorja nastopata še Eulerjeva gamma funkcija (Γ) in m, ki predstavlja celoštevilsko stopnjo odvoda. V članku [3] avtorji pokažejo, da mora biti m najbližje večje celo število od n. V našem primeru je red operatorja $n = \alpha(r,t)$, ki se spreminja od 1 do 0, zato upoštevamo $m = 1$.

Poleg ohranitve momentov upoštevamo tudi kontinuitetno enačbo o ohranitvi mase

$$\frac{\partial v_j}{\partial r_j}=0. \tag{4}$$

2.2 Izpeljava stabilnostnih enačb za Taylor-Couetteov tok med fazno spremembo

Obravnavamo dva koncentrična valja, ki sta prikazana na sliki 2, med katerima se nahaja fluid.



Slika 2: Skica Taylor-Couetteovega toka

Predpostavimo, da se notranji in zunanji valj vrtita ločeno vsak s svojo hitrostjo in smerjo vrtenja, kot to naredijo avtorji v člankih [1, 4]. Pri izpeljavi upoštevamo opazovano višino fluida H v reži med valjema, polmer notranjega valja R_1 in zunanjega R_2. Obravnavamo primer neskončno dolgih valjev, da se izognemo vplivu robnih pogojev v vertikalni smeri.Izpeljava enačb izhaja iz ravnovesne Orr-Sommerfeldove enačbe (1) in kontinuitetne enačbe (4). Stabilnost obravnavamo po teoriji majhnih motenj harmonske oblike, zato so hitrosti v posameznih smereh in tlak definirane kot vsota hitrosti in tlaka v ravnovesnem stanju ter motenj, ki so v primerjavi s hitrostmi in tlakom v ravnovesnem stanju dovolj majhne. Predpostavimo, da je v ravnovesnem stanju tok osnosimetričen in da se fluid premika samo v tangencialni smeri. Fotopolimer bomo po celotni višini osvetljevali s strani notranjega ali zunanjega valja.

Za bolj splošen in kompakten zapis enačb pri izpeljavi uporabimo brezdimenzijska števila. Predpostavimo, da imajo motnje harmonsko obliko in da je njihova velikost ob steni valja enaka 0, ker ne pride do zdrsa med fluidom in valjem. Z Laplaceovo transformacijo preidemo iz časovne v frekvenčno domeno, saj v njej lažje razrešimo integrale in poenostavimo izraze. Nato izvedemo inverzno Laplaceovo transformacijo in enačbe zapišemo v matrični obliki

$$\mathbf{C} \begin{pmatrix} \tilde{v}_r \\ \tilde{v}_\phi \\ \tilde{v}_z \\ \tilde{p} \end{pmatrix} = \omega \mathbf{D} \begin{pmatrix} \tilde{v}_r \\ \tilde{v}_\phi \\ \tilde{v}_z \\ \tilde{p} \end{pmatrix}, \tag{5}$$

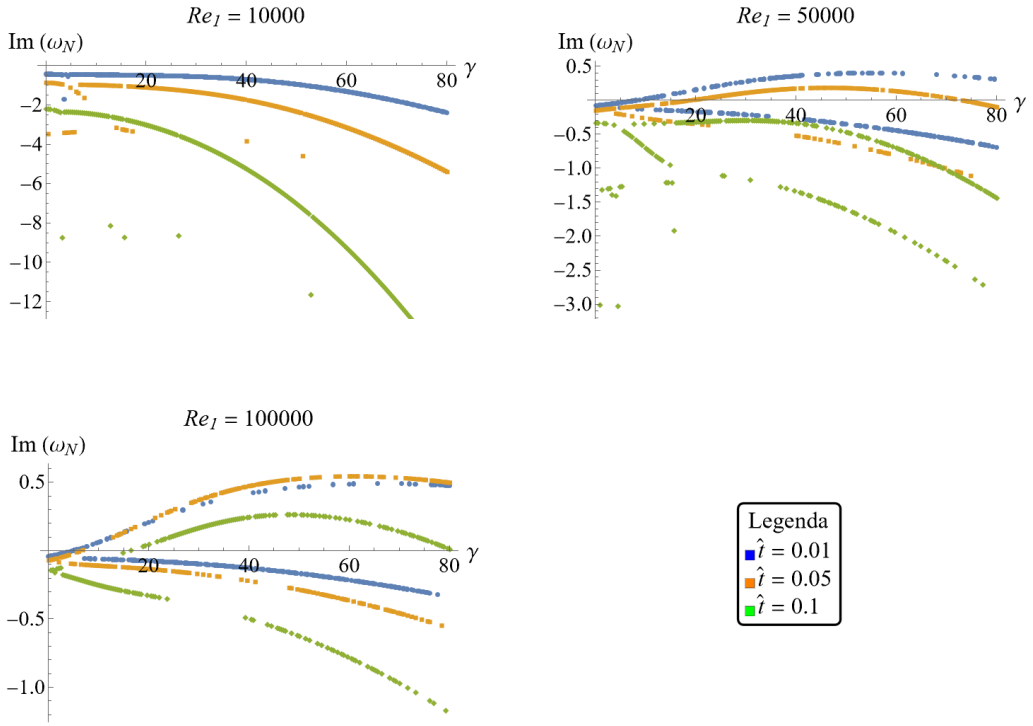
saj obravnavamo sistem štirih linearnih enačb. **C** in **D** sta matriki funkcij in konstant, ki delujejo nad brezdimenzijskimi hitrostnimi ($\tilde{v}_j, j \in \{r, \phi, z\}$) in tlačnimi ($\tilde{p}$) koeficienti motenj, ki so odvisni od radialne koordinate. ω predstavlja časovno lastno vrednost motenj. Sistem enačb numerično rešimo v programu Wolfram mathematica, pri čemer motnje aproksimiramo z vsoto Besselovih funkcij prvega reda. Matriki v enačbi (5) sta singularni, zato časovne lastne vrednosti določimo po metodi razcepa singularne vrednosti. Izmed dobljenih lastnih vrednosti izločimo dejanske časovne lastne vrednosti in med njimi poiščemo tisto, ki ima največjo imaginarno komponento, saj bo ta odločala o stabilnosti Taylor-Couettovega toka. Pri pozitivni imaginarni komponenti časovne lastne vrednosti bo tok nestabilen in motnje bodo s časom naraščale [6], pri negativni vrednosti bo stanje stabilno in motnje bodo zamirale, pri vrednosti nič pa bo stanje nevtralno.

Parametre za izvajanje numeričnih izračunov smo izbrali poljubno glede na parametre v članku [3], tako da pridemo do zanimivih rezultatov. Višina opazovanega fluida v reži med valjema bo $H = 0.05\,\mathrm{m}$. Notranji valj ima polmer $R_1 = 0.05\,\mathrm{m}$, zunanji pa $R_2 = 0.055\,\mathrm{m}$. Uporabili bomo fluid z gostoto $\rho = 1300\,\mathrm{kg\ m^{-3}}$, modulom elastičnosti $E = 1.5 \cdot 10^6\,\mathrm{Pa}$, začetno dinamično viskoznostjo $\mu_0 = 1.5 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{Pa\,s}$ in dinamično viskoznostjo po daljšem času $\mu = 4.5 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{Pa\,s}$.

3 Rezultati

Izvedli smo konvergenčno analizo in ugotovili, da se z upoštevanjem vsote večih Besselovih funkcij vedno bolj približujemo dejanski vrednosti imaginarne komponente časovne lastne vrednosti. Konvergenca je v obravnavanem primeru hitra, zato smo se odločili, da pri nadaljnji analizi za aproksimacijo upoštevamo vsoto osmih Besselovih funkcij, saj je tako razlika med dobljeno in dejansko vrednostjo manjša od 1%. Nato smo stabilnostno analizo izvedli za viskozen fluid in dobili rezultate, ki se ujemajo z rezultati v obstoječih člankih, s čimer smo potrdili ustrezno delovanje našega programa za določanje stabilnosti.

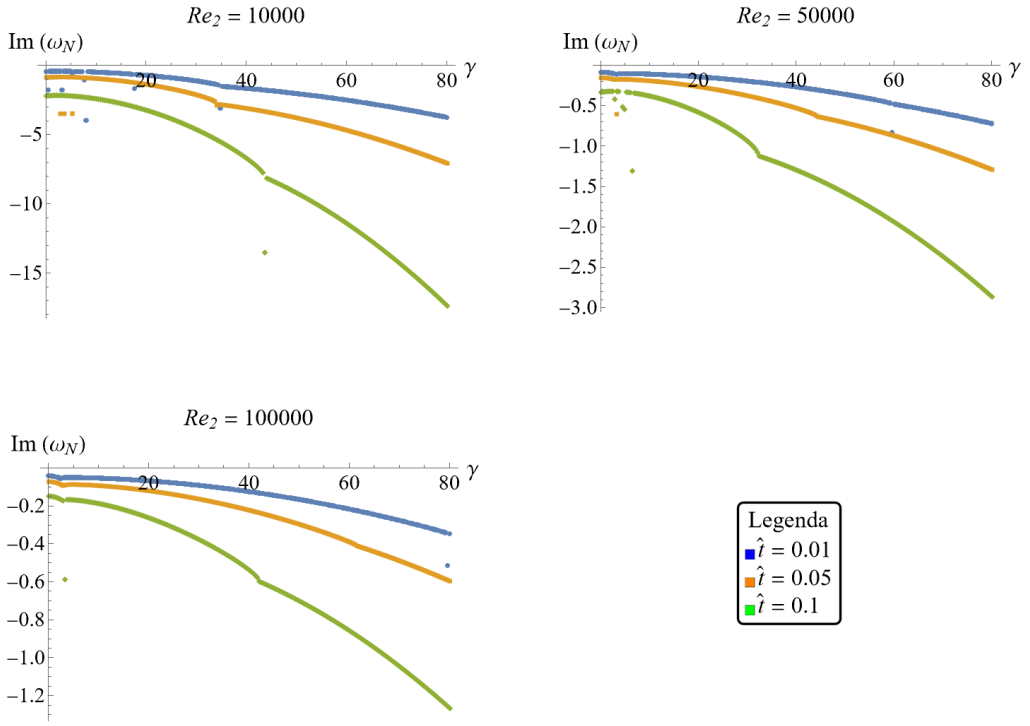
Na sliki 3 smo prikazali imaginarne komponente časovnih lastnih vrednosti ($\mathrm{Im}(\omega_N)$), pri rotiranju notranjega valja, katerega hitrost določimo iz izbranega Reynoldsovega števila Re_1, za brazdimenzijske čase ($\hat{t}$) v začetnem delu fazne spremembe, ki je časovno odvisna. Brezdimenzijski čas smo definirali tako, da je na začetku fazne spremembe $\hat{t} = 0$, na koncu pa $\hat{t} = 1$. Obravnavali smo osnosimetrične motnje, zato je v smeri osi ϕ prostorska lastna vrednost $\beta = 0$, pri različnih vrednostih prostorske lastne vrednosti γ v smeri osi z. Podobno, kot pri viskoznem fluidu, tudi v primeru viskoelastičnega fluida ugotovimo, da je Taylor-Couetteov tok pri nizkih vrednostih Re stabilen. Iz grafov na sliki 3 je razvidno, da se nestabilno stanje ($\mathrm{Im}(\omega_N) > 0$) pojavi šele pri $Re_1 = 25\,000$, kar je precej višja vrednost kot pri viskoznem fluidu. Iz tega sklepamo, da elastičen del fluida poveča togost in zato Taylor-Couetteov tok postane stabilnejši.



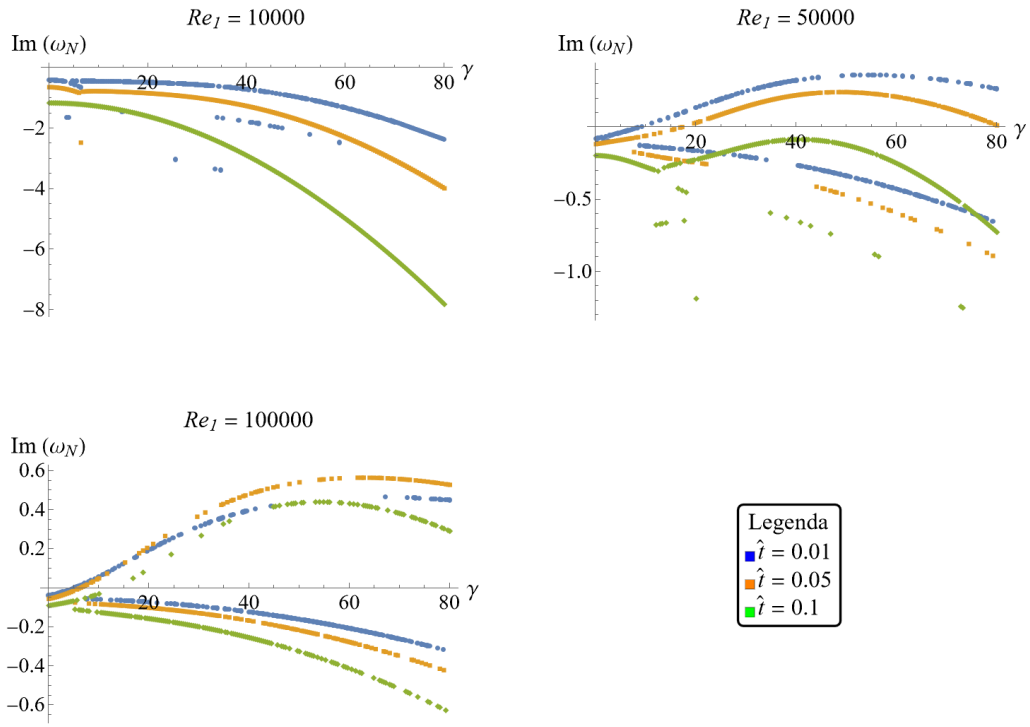
Slika 3: Stabilnost TC toka za viskoelastičen fluid $\alpha(\hat{t})$ pri različnih Re, vrti se notranji valj (Re_1) in $\beta = 0$

Pri viskoelastičnem fluidu so v nestabilnem stanju imaginarne komponente časovnih lastnih vrednosti motenj nekoliko nižje kot pri viskoznem toku, kar pomeni, da se tudi motnje zaradi elastičnosti fluida počasneje širijo. Dlje kot poteka fazna sprememba, vedno bolj je fluid viskoelastičen in posledično vedno bolj stabilen. Na nekaterih grafih na sliki 3 opazimo multistabilnost, kar se kaže v tem, da nimamo le ene krivulje pri izbranih spremenljivkah, ampak se pojavita dve ali pa jih je celo več. Pri dejanskem toku pričakujemo, da se bo ta obnašal skladno s tisto krivuljo, na kateri leži več rezultatov. Z dovedeno energijo v obliki motnje je možen preskok iz enega v drugo stanje. Pri kombinaciji parametrov, kjer sta rešitev stabilna in nestabilna veja, bo stanje pri dejanskem TC toku nestabilno, saj že majhna naključna motnja sistem potisne v to nestabilno stanje.

Na sliki 4 smo prikazali rezultate za primer rotiranja zunanjega valja pri časovno odvisni fazni spremembi. Ugotovimo, da je v vseh primerih tok stabilen in z naraščanjem vrednosti γ postaja še stabilnejši. Zelo podobne rešitve dobimo pri fazni spremembi, ki je časovno in krajevno odvisna, ko fluid osvetljujemo z zunanje strani in rotira notranji ali zunanji valj ter v primeru, ko rotira zunanji valj ob osvetljevanju z notranje strani. V primeru osvetljevanja z notranje strani in vrtenju notranjega valja dobimo rešitve na sliki 5, ki so zelo podobne tistim na sliki 3. Razlika je le, da je tok nekoliko stabilnejši med časovno odvisno fazno spremembo, saj so imaginarne komponente časovnih lastnih vrednosti v tistem primeru nekoliko manjše.



Slika 4: Stabilnost TC toka za viskoelastičen fluid $\alpha(\hat{t})$ pri različnih Re, vrti se zunanji valj (Re_2) in $\beta = 0$



Slika 5: Stabilnost TC toka za viskoelastičen fluid $\alpha(\hat{r}, \hat{t})$ pri različnih Re, sveti in vrti se notranji valj (Re_1) in $\beta = 0$

4 Zaključki

Po pregledu obstoječe literature smo izpeljali stabilnostne enačbe Taylor-Couetteovega toka viskoelastičnega fluida med fazno spremembo. Izhajali smo iz ravnotežne Orr-Sommerfeldove enačbe in kontinuitetne enačbe o ohranitvi mase. Predstavili smo operatorje ulomčnega in spremenljivega reda ter fazni prehod med viskoznim in viskoelastičnim fluidom. Napisali smo programsko kodo v programu Wolfram Mathematica, s katero za poljubne parametre in prostorske lastne vrednosti β in γ določimo imaginarne komponente časovnih lastnih vrednosti, na podlagi katerih določimo stabilnost Taylor-Couettovega toka. Program za aproksimacijo oblike motenj upošteva Besselove funkcije, lastne vrednosti pa določa z uporabo metode razcepa singularne vrednosti. Pokazali smo, da je Taylor-Couettov tok viskoelastičnega fluida med fazno spremembo bolj stabilen od toka viskoznega fluida. V primeru, ko svetimo s strani zunanjega valja, bo tok vedno stabilen, ne glede na to, ali rotira notranji ali zunanji valj. Izmed vseh analiziranih primerov se je za najbolj stabilnega izkazal tok viskoelastičnega fluida med fazno spremembo, ki je odvisna samo od časa. Ugotovili smo, da elastičen del v viskoelastičnem fluidu povečuje togost, kar stabilizira Taylor-Couettov tok.

5 Literatura

[1] G. I. Taylor, "Viii. stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders," Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, let. 223, št. 605-615, str. 289–343, 1923.

[2] B. Dubrulle, O. Dauchot, F. Daviaud, P.-Y. Longaretti, D. Richard in J.-P. Zahn, "Stability and turbulent transport in taylor–couette flow from analysis of experi- mental data," Physics of Fluids, let. 17, št. 9, str. 095103, 2005.

[3] E. IsteniČ in M. Brojan, "Fluid flow during phase transition: From viscous fluid to viscoelastic solid via variable-order calculus," Physics of Fluids, let. 35, št. 12, str. 123103, 2023.

[4] Y. Bai, N. Latrache, F. Kelai, O. Crumeyrolle in I. Mutabazi, "Viscoelastic in- stabilities of taylor–couette flows with different rotation regimes," Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, let. 381, št. 2246, str. 20220133, 2023.

[5] J. Doma˜nski, "Determination of the parameters of fluid motion in taylor-couette flow," Tech. Sc., Pap. And Rep, št. 9, 2006.

[6] A. Barletta, P. V. Brand˜ao in M. Celli, "An alternative numerical solution for the orr–sommerfeld problem," The European Physical Journal Plus, let. 139, str. 102, 2024.

RAZISKAVA UČINKOVITOSTI PISAV ZA DISLEKTIKE

Ana Stevanovski
Mentorstvo: prof. dr. Klementina Možina

Povzetek

Članek se osredotoča na učinkovitost pisav, oblikovanih za lajšanje branja dislektikom, in iskanje možnih izboljšav. Disleksija je nevrobiološka motnja, ki vpliva na fonološko procesiranje in spomin. Prizadene med 5–10 % populacije ter povzroča težave pri branju, pisanju in črkovanju. Obstajajo trije glavni tipi disleksije: fonološki, ortografski in magnocelularni, ki pojasnjujejo različne vidike motnje. V namen lajšanja težav, ki spremljajo motnjo, so bile razvite različne pisave, med njimi sta najpogosteje uporabljeni OpenDyslexic in Dyslexie. Te vključujejo značilnosti, kot so povečan prazen prostor med črkami, debelejše spodnje poteze črk in večji srednji črkovni pas, kar izboljša berljivost in zmanjša zmedo med branjem.

Mnoge študije potrjujejo, da dislektiki s prilagojeno pisavo zmanjšujejo pogostost napak in hitreje berejo. Spet druge lahko kažejo nasprotujoče si rezultate. Članek predstavi potrebo po nadaljnjih izboljšavah prilagojenih pisav in prilagoditvah tipografskih lastnosti, ki bi učinkoviteje pomagale posameznikom z disleksijo.

Uvod

Disleksija je nevrološka motnja, ki prizadene 5–10 % svetovne populacije in vpliva na sposobnost branja, pisanja in črkovanja. Pri izboljšanju berljivosti besedil igra ključno vlogo izbira primerne pisave. Priporočene klasične pisave, ki delno lajšajo branje, so Verdana, Helvetica, Tahoma in Arial, med ostalimi pa se priporoča tudi Comic Sans. Poleg teh obstajajo tudi novejše pisave, kot sta Dyslexie in OpenDyslexic, oblikovane specifično za dislektike. Rezultati raziskav o učinkovitosti teh pisav niso enotni, zato ne moremo enostavno sklepati, ali pisava lahko pomaga pri odpravljanju težav dislektikov.

Namen članka je proučiti učinkovitost pisav, prilagojenih dislektikom, in raziskati možnosti za izboljšave. V njem je bila najprej opredeljena disleksija in težave, ki jih motnja povzroča pri branju. Sledila je strokovna raziskava osnov branja, tipografije, lastnosti berljivosti in čitljivosti ter pregled smernic za izbiro klasičnih pisav in analiza pisav OpenDyslexic in Dyslexie. Upoštevane so bile tudi strokovne raziskave na temo uporabnosti tovrstnih pisav, ki podajo različne rezultate. Na podlagi analize je bila izpeljana ugotovitev, da je izbor in efektivnost pisave v večini primerov odvisna od posameznika.

1 Teoretične osnove

1.1 Disleksija

Dandanes se veliko posameznikov sooča z bralno-razumevalnimi težavami, ki so v veliko primerih znak disleksije. [1, 2]
V definiciji je »disleksija nevrobiološka motnja, ki vpliva na posameznikovo fonološko procesiranje in spomin«. [3] Je dedna napaka, ki otežuje sposobnost branja, pisanja in črkovanja. Simptomi se pri posameznikih izražajo različno. Skupna značilnost vseh je posameznikova sposobnost branja, ki je nižja od njegovega učnega nivoja in inteligenčne razvitosti. Kljub temu disleksija ne vpliva na posameznikovo inteligenco, simptome pa lahko z učenjem omilimo. [4, 5]
Znanstveniki so za razvojno disleksijo postavili tri teorije o vplivu motnje na posameznika. Prva je fonološka, poleg nje pa sta bili postavljeni še ortografska in magnocelularna teorija. [5, 6]
Motnja je bila razdeljena tudi na šest pod področij.[7, 8]

Najbolj uveljavljena je fonološka teorija, ki kot razlog izvora predpostavlja posameznikovo prizadetost fonološkega procesiranja informacij. Natančneje je to motnja pri razumevanju fonemov (zvok, ki predstavlja črko) in grafemov (črkovni simbol), kot tudi pri povezovanju fonemov z ustreznim grafemom. Fonološke veščine so ključne v procesu učenja in so sestavljene iz veščin fonološke zvesti in fonološkega procesiranja. Fonološka zavest je definirana kot ozaveščenost, da fonemi sestavljajo govorjene besede. Fonološko procesiranje zajema veščine, kot so črkovanje, rimanje in branje psevdo (neobstoječih) besed. [5, 6, 7]
Motnja se odraža s počasnim in površnim branjem ter počasnejšim razumevanjem novih besed. Ostali simptomi med drugim vključujejo težave pri črkovanju, uporabo različnih zvokov ali kretenj namesto besed, ne prepoznavanje novih besed in težave pri izgovorjavi zvokov novih ter daljših besed. Fonološka teorija vključuje podzvrsti površinske kot tudi fonološke disleksije. [6, 7, 8]

Druga predstavljena je ortografska teorija disleksije, ki izhaja iz ortografije. To je sistem pravil za zapisovanje besed v posameznem jeziku –pravila o črkovanju, uporabi ločil in velikih začetnic. Ortografske spretnosti so pridobljene predvsem med branjem in učenjem branja ter pisanja. [9, 10]
Pri dislektikih je oslabljena predvsem ortografska zavednost, kar je lastnost zapomnitve položaja črk v posamezni besedi in pretvarjanja niza črk v izgovorjene besede. Kljub temu da ortografska teorija zajema predvsem vizualni aspekt branja, temelji tudi na fonološki zavednosti. Podvrsta, ki jo lahko pripišemo tej teoriji, je dvojni primanjkljaj. [5, 6, 7, 8]

Kot zadnja predstavljena, je teorija monocelularnega deficita, ki zaenkrat še ni splošno sprejeta in potrjena. Ta trdi, da lahko napake pri dislektikih razložimo kot primanjkljaj v vizualnem monocelularnem zaznavanju. V splošnem je magnocelularni sistem del vidnega sistema, ki je odgovoren za časovno usklajevanje in sledenje gibov oči med branjem. Pri ljudeh z disleksijo je

pogosto opažena senzorična občutljivost na gibanje, na koncentracijo pa pogosto vpliva tudi vizualni hrup, kot so močne barve ali kontrastne kombinacije barv v prostoru. [5, 6, 7, 8]
Ta teorija temelji na vizualnih spretnostih posameznikov in se pogosto kaže z več simptomi. Ti so: gibanje črk med branjem, megljenje besedila, mešanje vrstnega reda črk in hitrega prepoznavanja črk, številk ter barv. V to teorijo uvrščamo podzvrsti vizualne disleksije in pogosto imenovanje. [5, 7, 8]

1.2 Branje in tipografija

Branje je primarna jezikovna spretnost in je avtomatična veščina, ki se jo je potrebno naučiti. V osnovi se mora posameznik naučiti, da so posamezni grafemi predstavljeni z fonemi in da skupina teh grafičnih elementov predstavlja besedo, ki jo preberemo. Posameznik mora brano besedo, kot je na primer »miš«, najprej ločiti v fonološke elemente [»m« – »i« – »š«], ki omogočajo razumevanje besede. Dislektikom je zaradi oslabljene fonološke in vizualne zaznave besedila težje povezovati grafeme s fonemi in prebrati besedo z razumevanjem. [2]
Grafični elementi, ki jih beremo, so črke, ločila, številke ter ostali znaki. Veda, ki se ukvarja z oblikovanjem črk, pisav in besedila, je **tipografija**. [9] Tipografija obravnava najrazličnejše oblike in vrste črk, ki jih sestavljamo v pisave. V splošnem imajo pisave veliko različnih lastnosti, ki močno vplivajo na posameznikovo hitrost in tekočnost branja. [5]

Berljivost in čitljivost sta lastnosti pisav. Berljivost se nanaša na to, kako enostavno je ločiti črke med seboj in kako hitro lahko bralec z razumevanjem prebere besedilo. Merjena je s hitrostjo branja. Je subjektivna lastnost pisave, ki se lahko razlikuje od bralca do bralca. Pri merjenju berljivosti moramo upoštevati tudi okoliščine branja in sposobnosti bralca. [9, 11]
Na čitljivost vplivajo oblika pisave (vrsta in različica), velikost srednjega črkovnega pasu, oblika in velikost serifov ipd. Navadno se tudi čitljivost meri s hitrostjo branja in pomnjenjem besedila. Definirana je kot domena besedila glede na tipografsko ponazoritev. [9, 11]

1.3 Pisave, ki pripomorejo k lažjemu branju

Izbira primerne pisave lahko močno pomaga pri bralnih težavah dislektikov. Kot najprimernejše pisave so pogosto priporočene Verdana, Helvetica, Tahoma, Arial in Comic Sans. Vse pogosteje se pojavljajo tudi različne pisave, specifično oblikovane za dislektike. Najbolj uporabljene so Dyslexie, Read Regular in OpenDyslexic. [12]

1.4 Pisave, oblikovane za dislektike

Do današnjega dne je bilo za dislektike ustvarjenih več različnih pisav. Prva je bila oblikovana leta 1930, ko je nizozemski znanstvenik Herman Snellen predstavil Snellen Font. Sledilo je mnogo drugih pisav. Podrobneje sta predstavljeni OpenDyslexic in Dyslexie. [13]

Prosto dostopno pisavo OpenDyslexic je oblikoval Abelardo Gonzalez. Tudi sam se spopada z disleksijo, pri oblikovanju pa se je zgledoval po drugih pisavah: Signika, Chalkboard SE, Baskerville, Source Sans Pro, Consolas, Averia in Comic Sans. [14, 15]

Oblikovalec Christian Boer je izdelal pisavo Dyslexie. Ta pisava ni prosto dostopna, je pa njena uporaba močno razširjena. Pisavo je oblikovalec tudi patentiral. [13, 16]

2 Rezultati

2.1 Bralne napake

V članku je obrazloženo, da je disleksija bralna motnja, ki zadeva tako vizualno kot fonološko zaznavanje besedila. V Tabeli 1 so predstavljene najpogosteje opažene težave pri branju in zaznavanju besedila. [5]

Tabela 1, primeri napak v branju pri dislektikih [5]

Težava *Primer*	***Razlaga težave***
Zamenjevanje črk *(pes – bes, d – b, p – q,…)*	Črka je zamenjana z njej podobno črko ali črko, ki leži kasneje v besedi.
Prepoznavanje sestavljenih samoglasnikov *(oče – oči)*	Kompleksen samoglasnik je sestavljen iz dveh samoglasnikov. Tako je kompleksen samoglasnik zamenjan z drugim ali dvojnim samoglasnikom.
Prepoznavanje odprtih ali zaprtih samoglasnikov *(plan – plani)*	Odprti samoglasnik je prebran kot zaprt samoglasnik ali obratno.
Izpuščanje soglasnikov *(obratno – obrato)*	Eden od soglasnikov je izpuščen/izbrisan/neprebran.
Izpuščanje *(krilo – kilo)*	Črka je med branjem izpuščena ali izbrisana.
Zamenjava *(nutela - mutela)*	Črka ali glas je zamenjan.
Ugibanje pri branju *(slika - pika)*	Beseda ni pravilno prebrana. Bralec besedo ugiba in je ne prebere.

2.2 Priporočila za izbiro pisav

Leta 2023 je organizacija British Dyslexia Association izdala priporočila za izbiro pisav, ki pripomorejo k lažjemu branju dislektikom. Priporočajo:

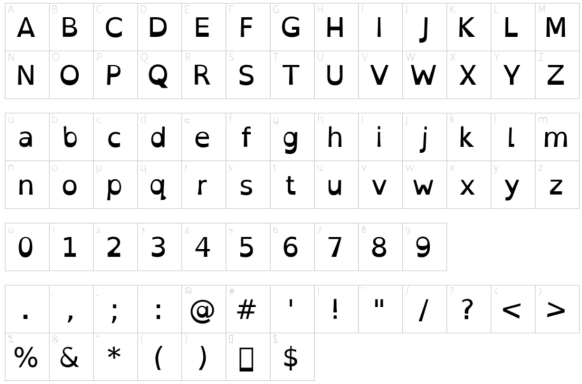
- Izbiro linearnih pisav. Kljub temu da so mnenja o tej lastnosti neusklajena, je bilo večkrat ugotovljeno, da serifne in kurzivne pisave nekoliko zmanjšujejo berljivost in hitrost sakad med branjem. [5, 12, 17]
- Velikost glavnega besedila 12–14 tipografskih enot, saj slabši bralci, dislektiki in starejši preferirajo večjo velikost besedila. [5, 12, 17]
- Povečan prazen prostor med črkami, ki povečuje čitljivost besedila. British Dyslexia Association priporoča prazen prostor med črkami do 35 % povprečne širine črke pisave, pri čemer ta ne sme biti pretirano povečan, saj lahko tudi to zmanjša čitljivost. [5, 11, 17]

- Povečan srednji črkovni pas (x-height). Ta v pisavi pripomore k lažjemu razlikovanju med črkami in pozitivno vpliva na hitrost branja. [5]
- Prazen prostor med besedami oz. presledki naj bi bili vsaj 3,5-krat večji od povprečnega praznega prostora med črkami. [5, 11, 17]
- Povečan razmik med vrsticami je priporočljiv le glede na posameznikove preference. Pravilna regulacija lahko povečuje čitljivost. Svetovano je razmerje, pri katerem je razmik za 50 % večji od velikosti pisave. [5, 17]
- Izogibanje uporabi verzalk ter slovnično ne nujnih inicialk med tekočim besedilom, saj so bolj berljive minuskule. [5, 17]
- Za hitrejše prepoznavanje črk je priporočljiva tudi uporaba velikega barvnega kontrasta med ozadjem in besedilom, saj tako oko prej prepozna črke. [17]

Ta priporočila omogočajo tudi razumevanje za nadaljnje oblikovanje in izdelavo pisav, ki jih lahko še bolje prilagodimo dislektikom in njihovim potrebam.

2.3 OpenDyslexic in Dyslexie

Pisavi OpenDyslexic in Dyslexie, ki sta prikazani na slikah 1 in 2, sta bili oblikovani v namen lajšanja razlikovanja med črkami ter zmanjševanja vizualne zasičenosti, kot tudi zmede v besedilu.



Slika 1, pisava OpenDyslexic (18)



Slika 2, pisava Dislexie (19)

Najbolj opazna značilnost, ki pisavi ločuje od ostalih, so odebeljene spodnje poteze črk. S tem so oblikovalci težo črk postavili na spodnji del in pospešili prepoznavanje orientacije črke brez dodajanja serifov. Vsaka črka je posebej oblikovana in podobne si črke niso zrcaljene. Tako je zagotovljena večja razlika med pari črk, kot so q in p, b in d ter r in n. Prilagojeno povečani so tudi prazni prostori med črkami. Posledično je v besedilu zmanjšana vizualna nasičenost in oko hitreje zazna posamezne oblike črk. Pisavi imata povečan tudi srednji črkovni pas (x-height) brez da bi bile črke zato tudi oblikovno širše. [14, 16]

Pri pisavi Dislexie so izpostavljene še nekatere druge posebnosti. Ta je oblikovana z večjimi odprtji črk. To pomeni, da je odprtje med zaključnima potezama v črki, kot je *c,* večje, kot pri običajnih pisavah. Črke z ascenderji ali descenderji so v tej potezi nekoliko podaljšane. Pri pisavi Dislexie je povečan tudi kontrast v majuskulah in ločilih. Te so oblikovane nekoliko krepkeje in

omogočajo, da sta začetek in konec stavka nekoliko prej prepoznana tudi preko kontrasta v besedilu. [14]

Dandanes je uporaba pisav za dislektike že močno razširjena. OpenDyslexic je uporabljena v spletni aplikaciji Dyslite, ki omogoči spremembo pisave na izbranem brskalniku. Pisava je lahko implementirana tudi v Kobo bralnike in na Apple naprave, nekatere založbe v tej pisavi tiskajo tudi knjige. Tudi pisava Dislexie je uporabljena v knjigah in celo učbenikih. Dandanes jo lahko namestimo na vse elektronske naprave. Njeni osnutki, celotna pisava ter knjiga, zapisana v njej, so razstavljeni v knjižnični zbirki muzejaVictoria and Albert v Londonu. Oblikovalec Christian Boer nudi tudi svetovanja pri poravnavi in oblikovanju postavitve besedila tako, da bo ta dislektikom prijaznejša. [13, 15, 16]

2.4 Analiza izvedenih raziskav

Obstaja več študij o uporabnosti pisav, namenjenim dislektikom. Nekatere so potrdile, da te pisave pripomorejo k zmanjšanju napak pri branju. [5] Spet druge pa so celoten koncept uporabnosti teh pisav označile za neefektivnega. [20] V nadaljevanju so navedene tri raziskave z različnimi zaključki.

S strani avtorja pisave Dyslexie, Christiana Boerja, je bila izdelana raziskava »Dyslexie Regular Research 2012«. V raziskavi so bile preučene bralne sposobnosti (hitrost in natančnost branja) dislekstikov ob branju besedil v pisavah Dyslexie, Arial ter Times New Roman. V raziskavi je bilo potrjeno, da je 72,2 % udeležencev hitreje bralo pisavo Dyslexie. S to pisavo se je manjše število napak pri branju pojavilo pri 73,2 % udeležencih raziskave. Ugotovljeno je bilo tudi, da pisava izboljšuje obseg sakad, kar pripomore k lažjemu branju in boljšemu razumevanju besedila. [21]

V magistrski nalogi »Special Font For Dyslexia?« je Renske de Leeuw Raz primerjal pisavi Dyslexie in Arial med osnovnošolskimi bralci z disleksijo. Ugotovil je, da v testiranju branja v pisavi Dislexsie ni prišlo do hitrejšega branja, bilo pa je nekoliko manj napak pri branju, kot se jih je pojavilo pri branju v pisavi Arial. Kljub temu so se še vedno pojavljale napake ugibanja. [5] Prav tako je bilo ugotovljeno, da zaradi nepoznavanja pisave in njenih nenavadnih oblik večina posameznikov te pisave nebi uporabila v namene javnih publikacij. [12]

Raziskava avtoric Jessice J. Wery in Jennifer A. Diliberto, predstavljena v strokovnem članku »The effect of a specialized dyslexia font, OpenDyslexic, on reading rate and accuracy«, primerja branje pri dislektičnih osnovnošolcih med pisavami Arial, Times New Roman ter OpenDislexic. Iz rezultatov je vidno, da, v primerjavi z običajnima pisavama, OpenDislexic med testiranci ni pripomogla k hitrosti branja ali zmanjšanju napak pri branju. [20]

Opisane raziskave potrjujejo razdvojena mnenja strokovnjakov o uporabnosti/učinkovitosti? pisav za dislektike. Čeprav bi po rezultatih raziskave »Dyslexie Regular Research 2012« 84,3 %

sodelujočih pisavo priporočalo ostalim, ostali dve raziskavi temu nasprotujeta. Ti raziskavi predstavita tudi rezultat, da večina sodelujočih ne bi izbrala ali uporabila prilagojenih pisav. Prevladujoč razlog za to je nenavadna in neprofesionalna oblika pisave. [5, 20, 21]

3 Zaključek

V članku je predstavljeno, da je disleksija individualna motnja branja, ki se lahko od posameznika do posameznika razlikuje. [3] Dokazane so splošne smernice za izbiro pisave, ki pripomorejo k lažjemu branju pri dislektikih. To so pisave s povečanimi razmiki med črkami, izrazitejšimi oblikami črk, daljšimi ascenderji in descenderji, višjim srednjim črkovnim pasom in pisave brez serifov ter različnih odebelitev v znakih.

Predstavljeno je, da je izbira pisave subjektivna, zato bi rešitev za bolj uporabno tipografijo, prilagojeno dislektikom, morebiti bila variabilna pisava. Posameznik bi pri taki pisavi sam lahko uravnaval različne lastnosti črk, ki bi mu ustrezale za boljšo berljivost. Prilagajanje srednjega črkovnega pasu, razlik v potezah črk, dolžine podaljškov, oblike zaključkov potez ter debeline v spodnjem delu črk, bi morebiti pripomoglo k pogostejši izbiri te pisave. Tako bi lahko hkrati omogočili tudi boljšo prilagojenosti pisave za uporabo v javne in strokovne namene.

4 Literatura

1. **Diena, Yitz.** 73 Dyslexia Statistics and Facts: How Many People Have Dyslexia? *ambitions.* [Elektronski] 28. julij 2023. [Navedeno: 26. junij 2024.] https://www.ambitionsaba.com/resources/dyslexia-statistics.
2. **Shaywitz, Sally E.** Dyslexia. *Scientific American.* 275, 1996, Izv. 5, 98 - 105.
3. **Rawson, Margaret Byrd.** Annals of Dyslexia. *many faces of dislexia.* 26, 1986, Izv. 1, 179 - 191.
4. **Moura, Octávio, Moreno, Marcelino Pereira: Joana in Simões, Mário R.** Annals of Dyslexia. *Investigating the double-deficit hypothesis of developmental dyslexia in an orthography of intermediate depth.* 1. april 2020, str. 43 - 61.
5. **Renske de Leeuw, Dr. T. van Leeuwen, Prof. Dr. W.R. Joolingen.** Special Font For Dyslexia? Twente : s.n., 2012.
6. **Elise Caccappolo-van Vliet, Miozzo, Michele in Stern, Yaakov .** Psychological Science. *Phonological Dyslexia: A Test Case for Reading Models.* september 2004, str. 583-590.
7. **Dorwart, Laura.** Different Types of Dyslexia. [Elektronski] 6. februar 2024. [Navedeno: 15. junij 2024.] https://www.verywellhealth.com/types-of-dyslexia-5214423.
8. **Neuro Health Arlington Heights.** What Are the Different Types of Dyslexia? [Elektronski] 16. maj 2021. [Navedeno: 15. junij 2024.] https://neurohealthah.com/blog/types-of-dyslexia/.
9. **Možina, Klementina.** Grafičar. *Tipografski geslovnik.* 16. junij 2008.
10. **Burt, S.** *What is orthographic processing skill and how does it relate to word identification in reading?* 4, 2006, Journal of Research in Reading, Izv. 29, str. 400 - 417.

11. **Maag, Bruno.** About Legibility and Readability. [Elektronski] Medium, 15. marec 2021. [Navedeno: 16. junij 2024.] https://medium.com/the-readability-group/about-legibility-and-readability-596fcd432a06.
12. **Rello, Luz in Baeza-Yates, Ricardo .** Good Fonts for Dyslexia. [Elektronski] chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://dyslexiahelp.umich.edu/sites/default/files/good_fonts_for_dyslexia_study.pdf.
13. **G, Felicia.** The Science Behind Dyslexia Fonts and Their Effectiveness. [Elektronski] junij 2024. [Navedeno: 24. junij 2024.] https://dyslexichelp.org/why-does-dyslexia-font-work/).
14. **OpenDyslexic.** OpenDyslexic. [Elektronski] [Navedeno: 20. Junij 2024.] https://opendyslexic.org/.
15. **Petersen, Rachael.** OpenDyslexic: the Font Designed to Make Reading Easier. [Elektronski] 22. januar 2014. [Navedeno: 24. junij 2024.] https://rising.globalvoices.org/blog/2014/01/22/opendyslexic-the-font-designed-to-make-reading-easier/.
16. **Dyslexie Font.** Dyslexie Font.com. [Elektronski] Dyslexie Font. [Navedeno: 20. junij 2024.] https://dyslexiefont.com/en/typeface/.
17. **British Dislexia Asociation.** Dyslexia Style guide. [Elektronski] 2023. [Navedeno: 20. junij 2024.] chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://cdn.bdadyslexia.org.uk/uploads/documents/Advice/style-guide/BDA-Style-Guide-2023.pdf?v=1680514568.
18. **Gonzalez, Abelardo.** 1001 fre fonts. [Elektronski] [Navedeno: 16. julij 2024.] https://www.1001freefonts.com/open-dyslexic.font.
19. **Murtagh, Aidan.** The Cursader. *New font gives dyslexics confidence.* [Elektronski] 7. november 2018. [Navedeno: 16. juli 2024.] https://rcrusadernews.com/1293/features/new-font-gives-dyslexics-confidence/.
20. **Wery, Jessica J. in Diliberto, Jennifer A. .** The effect of a specialized dyslexia font, OpenDyslexic, on reading rate and accuracy. *Annals of Dyslexia.* 7. julij 2017, str. 114 - 127.
21. **Boer, Christian.** Dyslexie Regular Research 2012. [Elektronski] 2021. [Navedeno: 24. junij 2024.] chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://dyslexiefont.com/wp-content/uploads/2024/04/Dyslexie-Regular-Research-2012.pdf.

FUNDAMENTALNE FIZIKALNE OMEJITVE KAPACITETE OPTIČNIH KOMUNIKACIJ NA OSNOVI OPTIČNIH VLAKEN

Ema Stopar

Povzetek

Optične komunikacije na osnovi optičnih vlaken so ena najpomembnejših tehnologij za prenos informacij, saj se lahko s pomočjo svetlobnega signala prenese izredno veliko informacij. So najobetavnejša komunikacijska tehnologija, s katero je mogoče zadovoljiti naraščujoče potrebe po množičnih povezavah. Osnovni sestavni deli optičnih komunikacij vključujejo oddajnik, svetlobni vir, ki je običajno laser, optično vlakno in fotodetektor. Informacije se po vlaknu prenašajo v obliki svetlobnih sunkov, fotodetektor pa jih na koncu pretvori nazaj v električni signal. Izkaže se, da svetlobni sunki po optičnih vlaknih širijo v obliki Besselovih funkcij. V članku sem se posvetila obravnavi fundamentalnih fizikalnih omejitev količine informacij na časovno enoto, ki jo je mogoče prenesti po optičnih vlaknih. Izkaže se, da jo so omejitveni faktorji predvsem pojav disperzije, izgube ter nelinearni pojavi v vlaknih. Disperzija, t.j. odvisnost hitrosti svetlobe od frekvence, povzroča podaljšanje sunkov in tako omejuje prenosno kapaciteto, izgube pa nastanejo zaradi absorpcije, sipanja in nepravilnosti v vlaknu. Zaradi disperzije uporabljamo predvsem enorodovna optična vlakna, z izgubami pa je dobro določeno katere valovne dolžine je najbolj smiselno uporabljati za prenos informacij z optičnimi komunikacijami. S pomočjo Shannonovega izreka lahko ugotovimo, da je vzrok za to, da se lahko po optičnem vlaknu prenaša velike količine informacij ravno ogromna pasovna širina spektra, ki je na voljo. Zaključila sem z opisom tehnološke metode multipleksiranja signalov, ki se je poslužujemo, da dosegamo čim večjo kapaciteto prenosa informacij, tako da se signali z rahlo različnimi valovnimi dolžinami medseboj po vlaknu prenašajo neodvisno.

1 Uvod

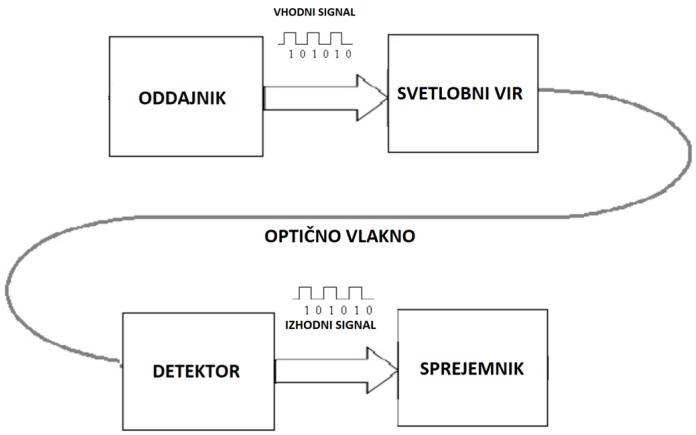
Optična komunikacija je telekomunikacijska tehnika, pri kateri se za prenos informacije uporablja svetloba. Njena glavna prednost v primerjavi s predhodnimi tehnikami (na primer koaksialnimi kabli) je, da se lahko s pomočjo svetlobnega signala prenese izredno veliko informacij. Optične komunikacije so najobetavnejša komunikacijska tehnologija, s katero je mogoče zadovoljiti naraščujoče potrebe po množičnih povezavah.

V svojem članku obravnavam optične komunikacije, ki potekajo po optičnih vlaknih, poznamo pa tudi še prostozračne optične komunikacije. V teoretičnem uvodu je predstavljeno delovanje optičnih komunikacij s svojimi sestavnimi deli in opisani načini širjenja elektromagnetnega valovanja po optičnih vlaknih, nato pa sledi obravnava različnih fizikalnih pojavov, zaradi katerih je količina informacij, ki jih lahko prenašamo na časovno enoto, navzgor omejena. S predelovanjem literature, razlago in razumevanjem zapletenih fizikalnih pojavov, ki vplivajo na delovanje optičnih vlaken, sem lahko prišla do zaključka kakšna vlakna se uporabljajo na dolgih ali kratkih razdlajah, pri katerih frekvencah svetlobe in zakaj. V zadnjem delu je predstavljena še možna tehnološka izboljšava za povečanje kapacitete prenosa informacij.

2 Teoretično ozadje

2.1 Optične komunikacije

Optične komunikacije sestavljajo komponente prikazane na sliki 1. Oddajnik električni signal zakodira v digitalno obliko in ga pošlje proti svetlobnemu viru. Ta ga pretvori v elektromagnetno valovanje, ki ga prenesemo po optičnem vlaknu do fotodetektorja, kjer se transformira nazaj v digitalno obliko. Sprejemnik ga dekodira nazaj v električni signal. [1]



Slika 1: Shema optičnih komunikacij (prirejeno po [1]).

V optičnih komunikacijah se kot svetlobni vir uporablja laserje. Laser oddaja koherentno lasersko svetlobo in je sestavljen iz optičnega resonatorja ter ojačevalnega sredstva. Oddajanje svetlobe pri laserju temelji na stimuliranem sevanju v ojačevalnem sredstvu. To je pojav, pri katerem svetloba s frekvenco, ki ustreza energiji prehoda, povzroči prehod med dvema kvantnima stanjema ojačevalnega sredstva, iz višjega v nižje stanje. Frekvenca, faza in smer dodatne stimulirano izsevane svetlobe je natanko enaka kot pri vpadni svetlobi, torej se svetloba ojači in je koherentna. Najpogosteje se kot ojačevalno sredstvo uporablja polprevodnik. Take laserje imenujemo laserske diode. Zakodirane informacije prek optičnega vlakna prenašamo v obliki

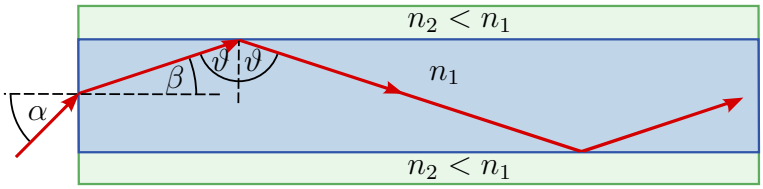
kratkih sunkov laserske svetlobe, za katere lahko tipično privzamemo, da so Gaussove oblike, do fotodetektorja. Vlogo fotodetektorja v optičnih komunikacijah opravljajo fotodiode, katerih delovanje temelji na fotoefektu. V tem članku sem se posvetila obravnavi le ene komponente optičnih komunikacij, in sicer optičnim vlaknom. [2]

2.2 Optična vlakna

Optične signale prenašamo prek optičnih vlaken. Njihovo delovanje klasično pojasnimo s totalnim odbojem na meji med dvema dielektrikoma, kot je prikazano na sliki 2. Kadar prehaja svetloba iz snovi z večjim lomnim količnikom n_1 v sredstvo z manjšim lomnim količnikom n_2, se pri vpadnih kotih ϑ, ki so večji od mejnega kota ϑ_T, totalno odbije. Za mejni kot velja lomni zakon v obliki:

$$\sin \vartheta_T = n_2/n_1. \tag{1}$$

V praksi svetlobo navadno usmerjamo po optičnih vlaknih, ki imajo cilindrično geometrijo. Plasti z večjim lomnim količnikom (n_1) rečemo sredica in okoliški snovi z lomnim količnikom $n_2 < n_1$ rečemo plašč. Žarek potuje po vlaknu, če je vpadni kot na meji med sredico in plaščem večji od mejnega kota totalnega odboja ϑ_T.



Slika 2: Shema klasične predstave razširjanja svetlobe po optičnem vlaknu [3].

Obstaja največji vpadni kot $\alpha_{\max}$, pri katerem se vpadna svetloba ujame v vlakno. Z njim povezana je numerična odprtina (apertura) vlakna NA, ki jo izračunamo kot

$$NA = \sin \alpha_{\max} = n_1 \sin \beta_{\max} = n_1 \sin(\pi/2 - \vartheta_T) = n_1 \cos \vartheta_T = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \vartheta_T}. \tag{2}$$

Upoštevajoč lomni zakon numerično odprtino zapišemo kot

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \tag{3}$$

Najpreprostejši primer optičnega vlakna je cilindrično vlakno, v katerem je lomni količnik sredice konstanten in nekoliko večji od lomnega količnika plašča. Navadno znaša razlika med lomnima količnikoma sredice in plašča le nekaj stotink, zato je numerična odprtina optičnih vodnikov $NA \lesssim 0,1$. Kot, pod katerim lahko vpada svetloba v vlakno, da se vanj ujame, je tako navadno le nekaj stopinj.

Da natančno opišemo širjenje svetlobe po vlaknih, ki imajo premer sredice od nekaj mikrometrov do nekaj deset mikrometrov, geometrijska optika ne zadošča. Rešiti moramo Maxwellove

enačbe z ustreznimi robnimi pogoji, kar je za cilindrična vlakna dokaj zapleteno. Robni pogoji so namreč sklopljeni, saj polje, ki na enem delu vlakna kaže v radialni smeri, kaže na drugem delu v tangencialni, in zato ni delitve na čiste električne in magnetne transverzalne valove. Rešujemo časovno neodvisno obliko valovne enačbe, ki jo imenujemo Helmholtzeva enačba. Za jakost električnega polja $\mathbf{E}$ jo zapišemo kot:

$$\nabla^2\mathbf{E} + n^2(r)\, k_0^2\, \mathbf{E} = 0, \tag{4}$$

pri čemer je $n(r < a) = n_1$ lomni količnik sredice in $n(r > a) = n_2$ lomni količnik plašča ter $k_0 = \omega/c_0$, kjer sta ω krožna frekvenca valovanja in c_0 hitrost svetlobe v vakuumu. Na splošno se rešitve izražajo v obliki kombinacij Besslovih funkcij. [3]

3 Fizikalna obravnava omejitev pri prenosu signala

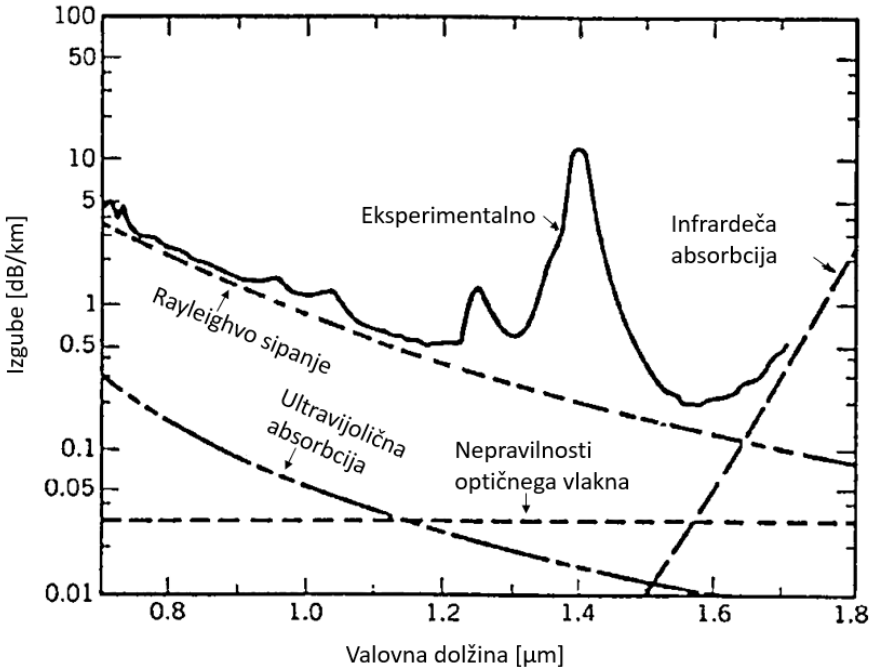
V nadaljevanju nas zanimajo fundamentalni fizikalni pojavi, ki omejujejo količino informacij, ki jo je mogoče na časovno enoto prenesti prek optičnih vlaken. Videli bomo, da jo omejujejo predvsem izgube, pojav disperzije ter nelinearni pojavi v vlaknih, nato pa bomo obravnavali tehnične rešitve, ki optične komunikacije poskušajo optimizirati.

3.1 Izgube v optičnih vlaknih

Izgube signal oslabijo in so posledica predvsem absorpcije svetlobe v vlaknu, Rayleighovega sipanja na fluktuacijah gostote in sipanja na nečistočah, kot je prikazano na sliki 3. Do izgub prihaja tudi zaradi upognjenosti vlakna, saj je v primeru, da je vlakno upognjeno, vpadni kot žarka na plašč lahko manjši od kota totalnega odboja in zato del valovanja uide v plašč vlakna, ter na stikih med vlakni.
Za merilo izgub v vlaknu vpeljemo atenuacijski koeficient, merjen v decibelih

$$A = -10 \log_{10} \frac{j(z)}{j(0)}, \tag{5}$$

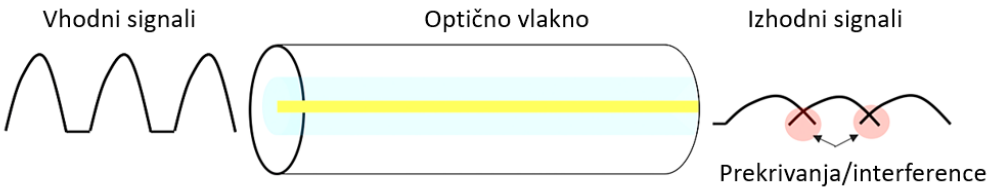
pri čemer sta $j(z)$ gostota svetlobnega toka po prepotovani razdalji z in $j(0)$ vpadna gostota svetlobnega toka.
Na sliki 3 so celotne izgube v optičnem vlaknu iz SiO_2 prikazane s krivuljo 'Eksperimentialno'. Pri kratkih valovnih dolžinah je največji prispevek na račun Rayleighovega sipanja na fluktuacijah gostote v materialu, kar hkrati tudi prispeva poglavitni del izgub v vlaknu na sploh. Ultravirolična absorbcija prikazuje absorbcijo, ki je posledica elektronskih prehodov v steklu čez energijsko režo SiO_2 v prevodni pas. Nepravilnosti optičnega vlakna povzročajo absorbcijo na nečistočah in so ob natančni izdelavi vlaken lahko tudi zanemarljive. Pri velikih valovnih dolžinah so izgube v največji meri posledica vibracijskih prehodov. Vrh celotne absorbcije pri okrog 1400 nm je posledica absorbcije na hidroksidnih ionih OH^- iz vode. Imajo namreč izrazito absorbcijo pri približno 1400 nm in še en manjši vrh pri 1250 nm.



Slika 3: Izgube v enorodovnem vlaknu v odvisnosti od valovne dolžine (prirejeno po [4]).

3.2 Disperzija

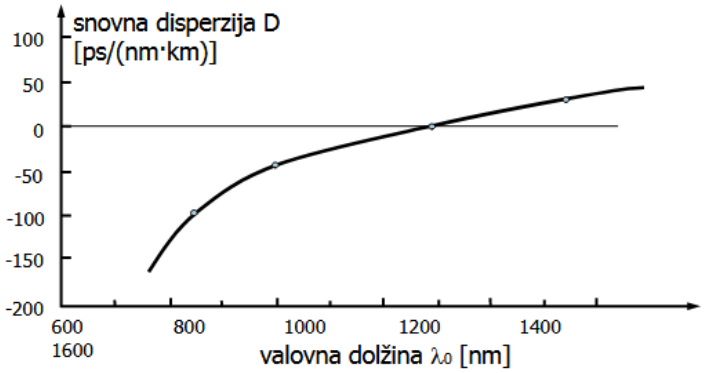
Disperzija je odvisnost hitrosti valovanja od frekvence, kar pomeni, da se kratki sunki, ki potujejo po vlaknu, podaljšajo. Posledično se oblika svetlobnih sunkov vzdolž vlakna ne ohranja, kar omejuje količino informacije, ki jo lahko prenašamo po vlaknu kot je prikazano na sliki 4. Izkaže se, da je največja količina vhodnih podatkov na časovno enoto, ki jih je možno prenesti brez napak, kar obratno sorazmerna z dolžino izhodnih sunkov svetlobe.



Slika 4: Zaradi disperzije se sunki svetlobe, ki potujejo skozi vlakno, podaljšajo. Na izhodu iz vlakna jih zato ne zaznamo več ločeno (prirejeno po [5]).

Pri potovanju svetlobe po optičnih vlaknih sta najpomembnejši rodovna in materialna disperzija. V večrodovnih vlaknih je povsem prevladujoča rodovna disperzija, ki je posledica dejstva, da se različni rodovi po vlaknu širijo z različnimi hitrostmi. V enorodovnih vlaknih rodovne disperzije ni, zato opazimo pojav snovne disperzije, kot posledico odvisnosti lomnega količnika vlakna od valovne dolžine svetlobe. Posledično ima svetloba pri potovanju skozi steklo različne

hitrosti glede na valovno dolžino. Snovna disperzija pride tem bolj do izraza, čim širši optični spekter ima svetlobni vir. Iz grafa 5 je razvidno, da snovna disperzija SiO_2 stekla narašča z naraščanjem valovne dolžine. [6]



Slika 5: Odvisnost snovne disperzije od valovne dolžine (prirejeno po [6]).

3.3 Omejitev kapacitete vlakna zaradi šuma

Elektromagnetno valovanje, ki potuje po vlaknu, je izpostavljeno raznim šumom iz okolice. Šum se prišteje signalu, ki ga je oddajnik oddal v vlakno. Tako spremenjen signal sprejme sprejemnik, ki mu pripiše eno od možnih sporočil. Na ta način vpliv šuma omejuje količino informacij, ki jo je možno prenesti po vlaknu brez napak. [7]
Z namenom obravnave vpliva šuma na prenos informacij uvedemo količino, ki jo poimenujemo kapaciteta komunikacijskega kanala C. Ta nam pove maksimalno število bitov na časovno enoto, ki jih lahko prenesemo po komunikacijskem kanalu določene pasovne širine brez napak. Pasovna širina komunikacijskega kanala B (angl. bandwidth) nam podaja spekter frekvenc, ki se lahko prenašajo preko kanala.
Shannonov izrek določa kapaciteto frekvenčno omejenega kanala, ki je izpostavljen belemu Gaussovemu šumu iz okolice (angl. AWGN kanal kot kratica za additive white Gaussian noise channel) kot

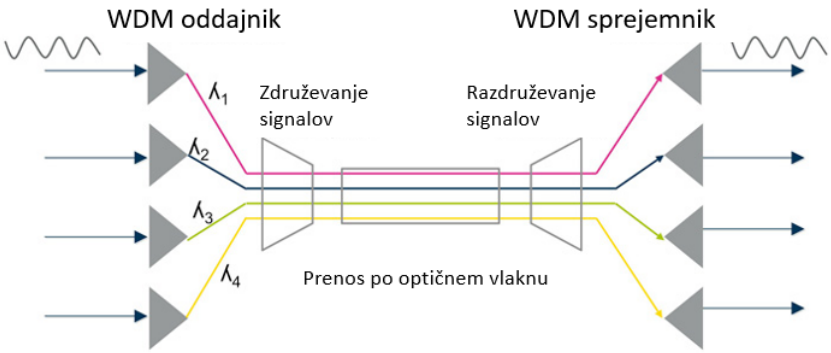
$$C = B\log_2\left(1 + \mathrm{SNR}\right), \tag{6}$$

pri čemer je B pasovna širina signala, SNR (angl. signal to noise ratio) pa podaja razmerje med amplitudo signala in šuma. [8]

4 Izboljšava zmogljivosti optičnih komunikacij

V optičnih komunikacijah velja razvrščanje oziroma multipleksiranje signalov za trenutno najpomembnejši mehanizem za izboljšanje obstoječega optičnega omrežja. Vhodne signale, ki se

medseboj razlikujejo po valovni dolžini, na začetku optičnega vlakna združimo v en kompleksnejši signal in da na koncu spet razdelimo na prvotne komponente. Shematsko je tak način prenosa podatkov prikazan na sliki 6. [9]



Slika 6: Shematski prikaz prenosa več signalov po enorodovnem vlaknu (prirejeno po [9]).

5 Rezultati

- Iz slike 3 je razvidno, da so skupne izgube najmanjše pri okoli 1550 nm, zato se to območje največ uporablja za prenos signalov na velike razdalje. Za prenos na dolge razdalje je potreben razmeroma močen signal, a ne premočen, saj lahko v vlaknu pride do nelinearnih optičnih pojavov, kar bomo videli v nadaljevanju. V praksi zato optični signal, ki potuje po čezoceanskih vlaknih, ojačujemo in s tem nadomestimo izgube, kar pa na manjših razdaljah zaradi majhnosti izgub niti ni potrebno. Teh izgub se ne bo dalo več kaj dosti zmanjšati, saj so že zdaj na meji, določeni s termičnimi fluktuacijami.
- V praksi se zaradi dejavnikov razloženih v poglavju 3.2 za dolge razdalje uporablja enorodovna vlakna, ki izkoriščajo točko ničelne disperzije, ki za SiO_2 vlakno nastopi pri 1300 nm. To je torej druga valovna dolžina svetlobe, ki se pogosto uporablja za prenos po optičnih vlaknih, poleg 1550 nm, pri kateri je absorbcija najmanjša.
- Shannonov izrek (enačba 6) podaja linearno odvisnost kapacitete kanala od pasovne širine, kar je vzrok za to, da se lahko po optičnem vlaknu prenašamo veliko večje količine podatkov, kot na primer preko radijskih omrežij, saj je pasovna širina radijskega spektra je omejena na 100 GHz, medtem ko je v optičnih komunikacijah na razpolago 100 THz.
- S pomočjo valovnodolžinskega multipleksiranja prikazanega na sliki 6 dosežemo to, da ne glede na to, da se vsi kanali sočasno prenašajo po istem vlaknu, se signali prenašajo neodvisno in se med seboj ne motijo. Tako dosežemo vzporeden prenos podatkov in hitrosti prenosa do 100 Tbit/s.

6 Zaključek

Razvoj optičnih komunikacij kot tehnologije za prenos informacij je pomenil velik preboj v modernem svetu, zaradi svojih znatno večjih zmogljivosti v primerjavi z ostalimi tehnologijami. Kot smo v članku ugotovili, obstajajo fundamentalne fizikalne omejitve za količino informacij, ki jo je mogoče v nekem času prenesti prek optičnih vlaken. Količino informacij, ki jo je možno na časovno enoto prenesti prek optičnih vlaken, omejujejo predvsem disperzija, izgube ter nelinearni pojavi v vlaknih. Tem omejitvam se z rešitvami kot je multipleksiranje signalov tudi inženirsko že vedno bolj približujemo, saj gre za tehnološko zelo razvito in aktivno področje.

7 Literatura

[1] Spletna stran: https://www.expertsmind.com/questions/with-a-block-diagram-explain-fiber-optic-communication-30166130.aspx, (ogled: 10. 2. 2024).

[2] Strnad, J., 2018. Fizika 4. del, Ljubljana: DMFA.

[3] Čopič, M. in Vilfran, M., 2020. Fotonika, Ljubljana: UL FMF.

[4] Spletna stran: https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95052294-optical-fiber-attenuation, (ogled: 14. 2. 2023).

[5] Spletna stran: https://blogs.cisco.com/sp/fiber-optics-part-3-fiber-dispersion-will-change-the-way-you-see-your-links, (ogled: 20. 2. 2023).

[6] Budin, J., 1993. Optične komunikacije, Ljubljana: UL FE.

[7] Narimanov, E. in Mitra, P., The Channel Capacity of a Fiber Optics Communication System: perturbation theory, CORE. URL: https://core.ac.uk/download/pdf/25289843.pdf, (ogled: 22. 2. 2024).

[8] Shtaif, M., Antonelli, C., Mecozzi, A., Chen X., 2022. Challenges in Estimating the Information Capacity of the Fiber-Optic Channel, PROCEEDINGS OF THE IEEE. Spletna stran: https://ieeexplore.ieee.org/document/9866733, (ogled: 27. 2. 2024).

[9] Spletna stran: https://community.fs.com/blog/fiber-optic-transmission-multiplexing-technique.html, (ogled: 16. 3. 2024).

VELIKE DEFORMACIJE PRI UPOGIBU RIBIŠKE PALICE

Filip Umer, Miha Brojan

Povzetek

Pri analizi upogiba ribiške palice se soočamo s kompleksnim deformacijskim stanjem, ki je posledica specifične funkcionalne geometrije in sil, ki delujejo med obremenitvijo. Ker se pri ribiških palicah pojavljajo velike deformacije, smo uporabili Euler-Bernoullijevo teorijo nelinearnega modela nosilca. Palico smo pri obravnavi razdelili na več segmentov, saj se sile pojavljajo v več točkah. Napetje vrvice skozi palico povzroča, da je sama momentna enačba odvisna od rešitve upogibnice. Iz tega razloga smo napisali kodo v programskem jeziku Wolfram Mathematica, ki poišče rešitev momentnih enačb in hkrati upogibnice vsakega segmenta palice. Iskanje pravilne rešitve poteka numerično in upošteva, da je najdena rešitev znotraj vnaprej določenih napak. Iz momentnih enačb palice smo pridobili maksimalne notranje napetosti. S tem programom lahko obravnavamo katerokoli palico, saj je model prilagodljiv na material, velikost, obliko in različno število segmentov. Program lahko prav tako obravnava poljubno vrednost sile napetja in smeri glede na palico, kamor je napeta vrvica. Iz različnih pogojev obremenitve dobimo tudi različne koncentracije napetosti po palici.

1 Uvod

Ribiške palice so znane po svoji zmožnosti deformacije in vzdržljivosti napetosti. Upogibnost ribiške palice je zelo pomembna lastnost, saj močno vpliva na energijo pri metu vabe in na zmožnost prenašanja ulovov [1].

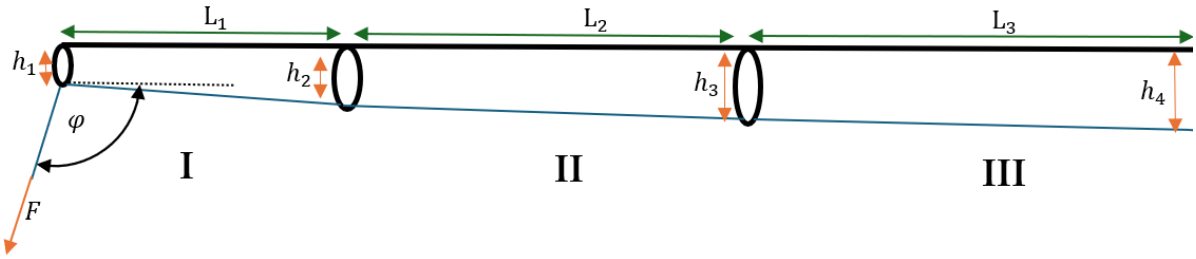
Dobro je znano, da se ribiške palice močno upognejo, zato predpostavke majhnih deformacij ne veljajo. Uporabiti je potrebno geometrijsko nelinearno teorijo, ti. teoriji 3. reda. Euler-Bernoullijeva teorija nam omogoča, da lahko pri dani zvezni obremenitvi, ki v nosilcu s spremenljivim drugim momentom prereza izračunamo deformacije močno upognjenega vitkega nosilca [2]. Cilj raziskave je obravnava upogiba in napetosti ribiške palice. Problem smo reševali z računalniškim programom, ki smo ga napisali v Wolfram Mathematici.

2 Metode dela in potek raziskave

2.1 Poenostavitve in definiranje parametrov

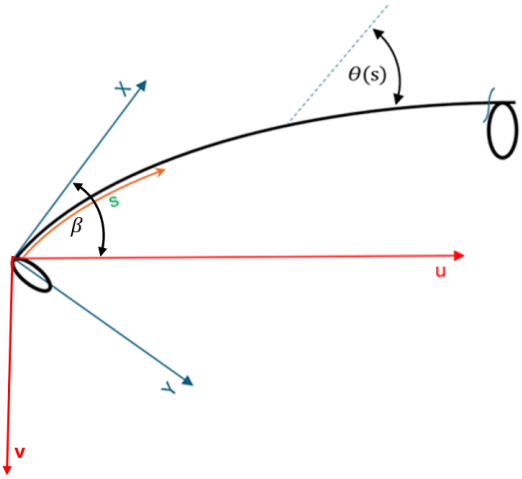
Ribiško palico razdelimo na enako število polj kot je število vodil za vrvico, saj na vsakem vodilu deluje dodatna obremenitev (slika 1). Pri obravnavi obremenitev, ki delujejo na palico, poenostavimo vsako vodilo v škripec in predpostavimo, da vrvica vedno leži na vodilu (na

spodnjem delu obročka). Smer napete vrvice na konici palice je glede na bazo (ročaj) palice vedno enak (kot φ).



Slika 1: Ribiška palica s tremi polji

Posamezno polje obravnavamo v smeri od konice proti bazi palice, saj se tako izognemo računanju reakcijskih sil za definiranje enačbe momenta. Enačbo mementa moramo po definiciji definirati v x, y koordinatnem sistemu (slika 2), a zaradi preglednosti vpeljemo rotiran koordinatni sistem u, v, v katerem zapišemo enačbo momenta in jo nato pretvorimo nazaj v x, y koordinate**.** Koordinatni sistem u, v ima u os vzporedno z bazo palice, izhodišče u, v −koordinatnega sistema pa je na konici palice. Za vsako polje uvedemo svoj koordinatni sistem x, y in u, v $(x_1, y_1, u_1, v_1, x_2, y_2, u_2, v_2 \ldots)$. Koordinatna sistema x, y in u, v povezujeta naslednji enačbi:



Slika 2: Koordinatna sistema x,y in u,v

$$u_n(s) = x_n(s)\cos(\beta_n) + y_n(s)\sin(\beta_n), \tag{1}$$

$$v_n(s) = -x_n(s)\sin(\beta_n) + y_n(s)\cos(\beta_n), \tag{2}$$

pri čemer je n število polja, kot β_n pa je enak kotu na koncu polja:

$$\beta_n = \Theta_n(L_n). \tag{3}$$

Vztrajnostni moment posameznega polja palice privzamemo kot poln prisekan stožec, definiran z enačbo:

$$I_n = \frac{\pi}{64}\left(r_n(s)\right)^4, \tag{3}$$

kjer $r(s)$ predstavlja premer palice v dani točki:

$$r_n(s) = D_{k_n} + (D_{b_n} - D_{k_n})\,\frac{s}{L_n}. \tag{4}$$

D_{k_n} je premer palice na konici polja, D_{b_n} pa na bazi.

2.2 Določanje diferencialne enačbe upogiba

Ribiško palico bomo obravnavali z Euler-Bernoulli teorijo nelinearnega modela nosilca. Na podlagi zveze $M(s) = E\ I(s)\ \theta'(s)$, diferencialno enačbo zapišemo tudi takole [2]**:**

$$M'(s)\ = E\ (I'(s)\ \theta\ '\ (s)\ +\ I(s)\ \theta\ ''(s))\ . \tag{5}$$

Zvezo med zasukom in upogibom, potrebno za izris enačbe upogibnice, nam opišeta naslednji enačbi:

$$x(s) = \int Cos(\theta(s))\ ds, \tag{6}$$

$$y(s) = \int Sin(\theta(s))\ ds. \tag{7}$$

Da lahko našo diferencialno enačbo rešimo, moramo določiti še robne pogoje:

$$\Theta_n(0) = 0, \tag{8}$$
$$M_n(0) = E\ I_n(0)\ \theta_n{}'(0)\ , \tag{9}$$
$$x_n(0) = 0, \tag{10}$$
$$y_n(0) = 0. \tag{11}$$

Prvo polje

Enačba momenta v prvem polju definiramo kot:

$$M_1(s) = F\ (\big(v_1(s) + h_1\cos(\beta_1)\big)\ \big(\cos(\alpha_1) + \cos(\varphi + \beta_2 + \cdots + \beta_n)\big) + \\ +\ (u_1(s)\ - h_1\ sin(\beta_1))\ (-sin(\alpha_1) + sin(\varphi + \beta_2\ + \cdots +\ \beta_n))), \tag{12}$$

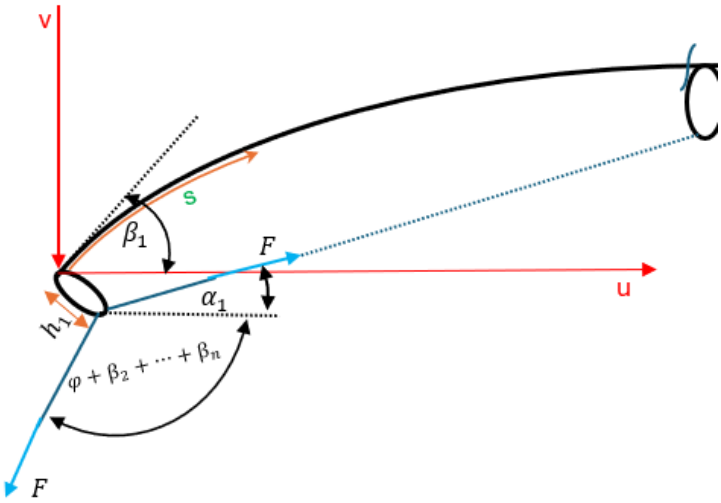
kjer je α_1 kot vrvice glede na u os, n pa število polj palice (slika 3).

Za nadaljnjo polje definiramo še reakcijske komponente F_{T1}, F_{N1}, M_{R1}:

$$F_{T1} =\ F\ (-sin(\alpha_1) + sin(\varphi + \beta_2 + \cdots + \beta_n)), \tag{13}$$

$$F_{N1} =\ F\ (-cos(\alpha_1)\ -\ cos(\varphi + \beta_2 + \cdots + \beta_n)), \tag{14}$$

$$M_{R1} = M_1(\mathrm{L}_1)\ . \tag{15}$$



Slika 3: Skica prvega polja

Ostala polja

Vsa nadaljnja polja po prvem imajo enake enačbe momentov in reakcijskih komponent, zato bomo izpeljavo omejili le na drugo polje.

Enačbo momenta v drugem polju definiramo kot:

$$\begin{aligned} M_2(s) &= F_{N1}\,(-cos(\beta_2)\,v_2(s) + sin(\beta_2)\,u_2(s)) + \\ &+ F_{T1}\,(cos(\beta_2)\,u_2(s) + sin(\beta_2)\,v_2(s)) + \\ &+ M_{R1} + \\ &+ F\,(v_2(s) + h_2\,cos(\beta_2))\,(-cos(\alpha_1+\beta_2)) + \\ &+ F\,(u_2(s) - h_2\,sin(\beta_2))\,(sin(\alpha_1+\beta_2)) + \\ &+ F\,(v_2(s) + h_2\,cos(\beta_2))(\,cos(\alpha_2)) + \\ &+ F\,(u_2(s) - h_2\,sin(\beta_2))\,(-sin(\alpha_2)), \end{aligned} \tag{16}$$

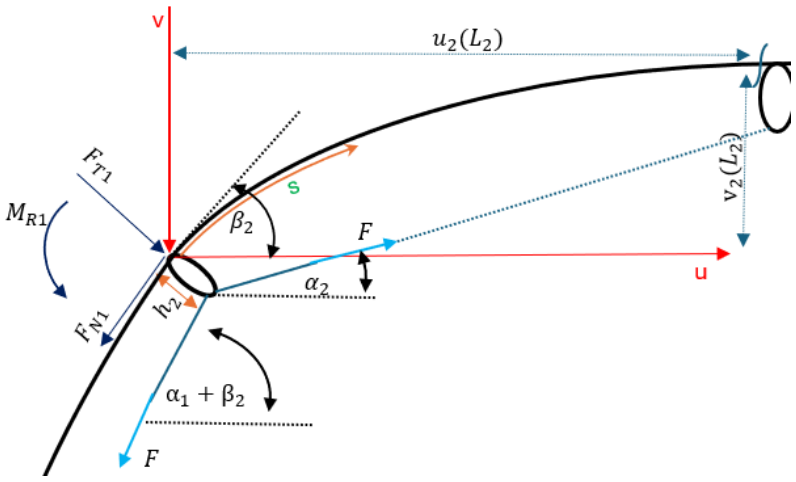
kjer je α_2 kot vrvice glede na u os (slika 4).

Za nadaljnjo polje definiramo še reakcijske komponente F_{T2}, F_{N2}, M_{R2}:

$$F_{T2} = F_{N1}\,sin(\beta_2) + F_{T1}\,cos(\beta_2) + F\,sin(\alpha_1+\beta_2) + F\,(-sin(\alpha_2)), \tag{17}$$

$$F_{N2} = F_{N1}\,cos(\beta_2) + F_{T1}sin(\beta_2) + F(-cos(\alpha_1+\beta_2)) + F\,cos(\alpha_2), \tag{18}$$

$$M_{R2} = M_2(L_2)\,. \tag{19}$$



Slika 4: Skica drugega polja

2.3 Reševanje diferencialne enačbe

Enačba momenta vsebuje rešitev diferencialne enačbe pri dani vrednosti (α in β), zato moramo α in β numerično ugibati dokler se ti ne ujemata z ω in $\theta(L)$. Koda napisana v programu Wolfram Mathematica išče rešitve enačb in preverja pogoje za ustavitev zank. $\theta(L)$ je rešitev diferencialne enačbe, ω pa za n polje določimo kot:

$$\omega_n = \arctan\left(\frac{-h_{n+1} + h_n\, Cos(\theta_n(\mathrm{L}_n)) + v_n(\mathrm{L}_n)}{u_n(\mathrm{L}_n) - h_n\, Sin(\theta_n(\mathrm{L}_n))}\right). \tag{20}$$

Pogoj za ustavitev iteracije:

$$\omega_n - \varepsilon \leqslant \alpha_n \leqslant \omega_n + \varepsilon, \tag{21}$$

$$\theta_n(\mathrm{L}_n) - \varepsilon \leqslant \beta_n \leqslant \theta_n(\mathrm{L}_n) + \varepsilon, \tag{22}$$

kjer je ε poljubna dopustna napaka med α_n in ω_n ter β_n in $\theta_n(\mathrm{L}_n)$.

Če α in β ne zadoščata pogoju za ustavitev iteracije, vrednosti popravimo in ponovimo izračun diferencialne enačbe. Prvi vhodni vrednosti α_n in β_n sta enaki tistima, ki bi ju imela palica v stanju brez obremenitve:

$$\alpha_n{}^{(1)} = arctan\left(\frac{-h_{n+1} + h_n}{\mathrm{L}_n}\right), \tag{23}$$

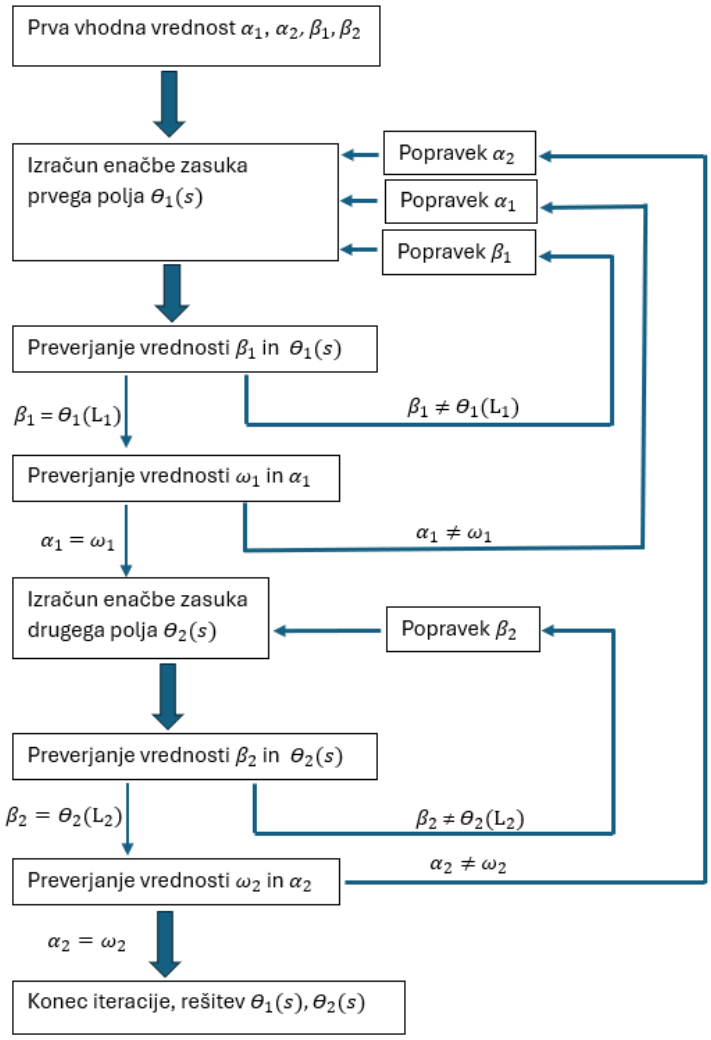
$$\beta_n{}^{(1)} = 0. \tag{24}$$

Najustreznejši popravek je bil določen z iterativnim preizkušanjem. Pri tem je bilo treba omogočiti prilagajanje začetne ocenjene vrednosti, bodisi z njenim povečevanjem bodisi z zmanjševanjem glede na predznak napake. Formuli za popravek kotov nastavimo kot:

$$\alpha^{(i+1)}{}_n = \alpha^{(i)}{}_n + 0{,}9\,(\omega^{(i)}{}_n - \alpha^{(i)}{}_n), \tag{25}$$

$$\beta^{(i+1)}{}_n = \beta^{(i)}{}_n + 0{,}9\,\left(\theta_n{}^{(i)}(\mathrm{L}_n) - \beta^{(i)}{}_n\right), \tag{26}$$

kjer indeks i označuje število iteracij.
Ko oba kota α in β ustrezata pogojem, program postopek ponovi za naslednje polje. Zaradi medsebojne povezanosti polj se mora program ob vsakem popravku kota α ali β kateregakoli polja (α_1, β_1, α_2, β_2 …) vrniti k reševanju prvega polja.
Prikaz iskanja pravilnih α_n in β_n ter rešitev diferencialnih enačb pri palici z dvema poljema je prikazana na sliki 5.



Slika 5: Shema iteracije izračuna funkciji zasukov

Iz dobljenih funkcij lahko enostavno sestavimo upogibnice vseh segmentov in ker imamo potek momenta, je mogoče priti tudi do poteka maksimalnih napetosti po dolžini palice:

$$\sigma_n = \frac{M_n(s)}{I_n(s)} \frac{\mathrm{r}_n(s)}{2}. \tag{27}$$

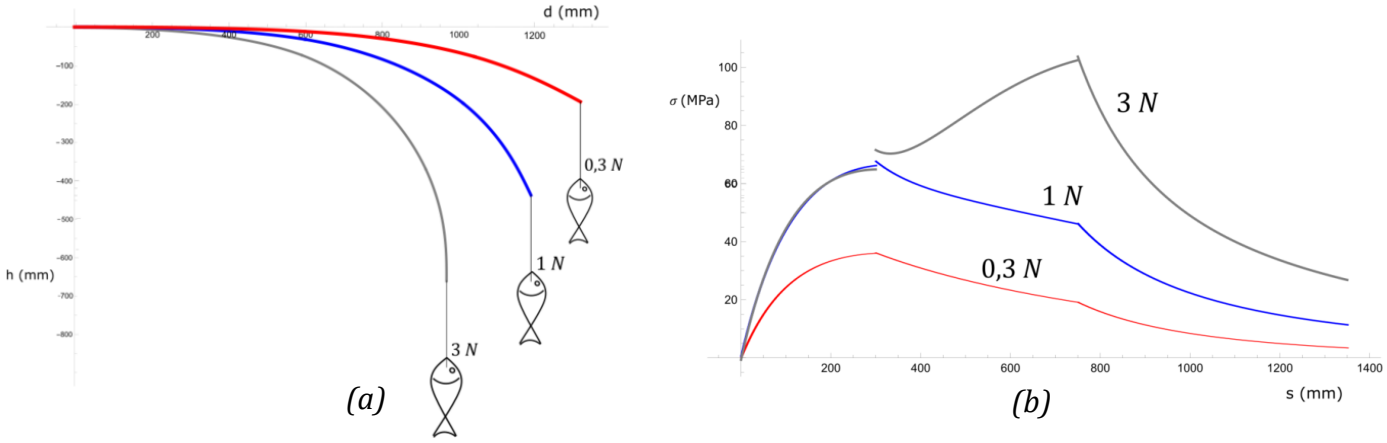
3 Rezultati

Izvedli smo simulacijo upogiba ribiške palice iz treh segmentov, pri čemer smo upoštevali geometrijske lastnosti navedene v preglednici 1:

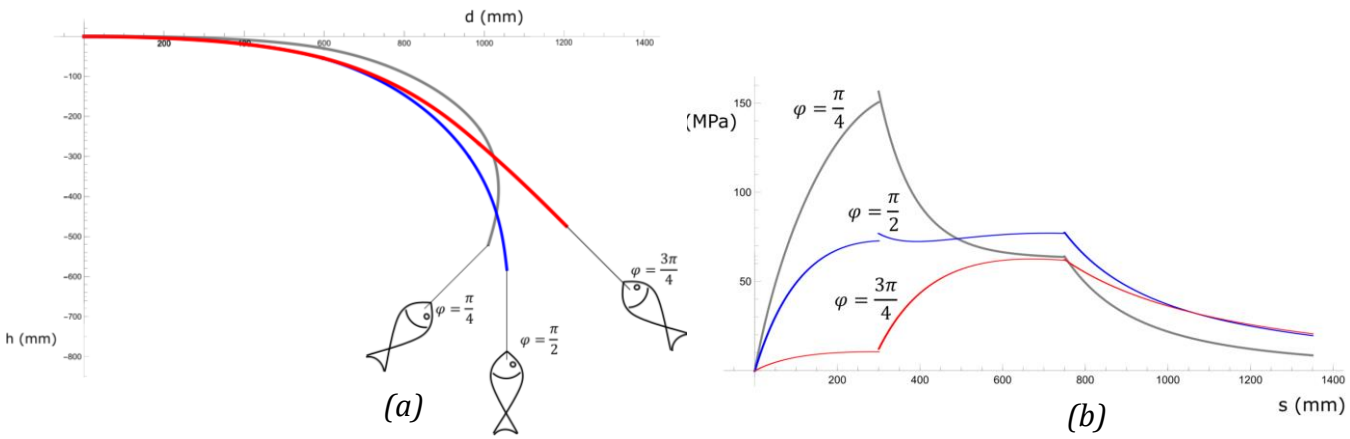
Preglednica 1: Geometrijske lastnosti simulirane ribiške palice

h_1	6 mm	L_1	300 mm	D_{k_1}	2 mm	D_{b_1}	3 mm
h_2	10 mm	L_2	450 mm	D_{k_2}	3 mm	D_{b_2}	5 mm
h_3	15 mm	L_3	600 mm	D_{k_3}	5 mm	D_{b_3}	10 mm
h_4	20 mm						

Izberemo si torej palico dolgo 1350 mm iz več polnih prisekanih stožcev. Za elastični modul E smo izbrali vrednost 25 GPa (privzeto po viru [6]), kar je tipična vrednost za steklena vlakna, material, ki se pogosto uporablja za izdelavo ribiških palic .
Na sliki 6 lahko vidimo različne upogibnice ribiške palice pri obremenitvah 0,3 N, 1 N, 3 N, pri konstantam kotu $\varphi = \frac{\pi}{2}$. Hkrati lahko grafično spremljamo največje notranje napetosti po dolžini palice v smeri od konice proti bazi. da se z večanjem bremena koncentracija napetosti pomika proti bazi palice.



Slika 6: Upogibnice (a) in napetosti (b) ribiških palic pri različnih obremenitvah



Slika 7: Upogibnice (a) in napetosti (b) ribiških palic pri različnih kotih φ

Na sliki 7 je prikazan vpliv kota napetja vrvice φ pri konstantni sili napetja F = 2 N. Manjšanje kota φ ima na porazdelitev napetosti nasproten učinek kot večanje sile pri konstantnem φ, saj glavnino napetosti pomika proti konici palice.
Program zanesljivo poišče rešitev momentne in upogibne funkcije, vendar pri visokih obremenitvah za kalkulacije potrebuje veliko časa in občasno vrne fizikalno nesmiselno rešitev.

4 Zaključki

Analizirali smo upogib ribiške palice z uporabo Euler-Bernoullijeve teorije nelinearnega modela nosilca. Ugotovili smo, da upogib ribiške palice povzroči spremembe v momenti enačbi, zaradi česar je potrebna numerična kalkulacija z iskanjem pravilne enačbe momenta in upogiba. Oblikovali smo program, ki najde primerne rešitve funkcij. Iz dobljenih rešitev izračunamo notranje napetosti v palici in tako preverimo najbolj obremenjene dele pri danih pogojih. Pri simuliranju upogiba palice lahko kontroliramo breme na vrvici in smer napetja vrvice ter tako dobimo različne koncentracijske območja napetosti pri različnih pogojih. Program pri visokih obremenitvah naleti na dolgo trajajoče kalkulacije in nezanesljive rešitve.
Možna razširitev tega problema bi bila uporaba drugačne metode iskanja rešitev funkcij, ki bi poiskala tudi pravilno, fizikalno stabilno, rešitev pri visokih obremenitvah.

5 Literatura

[1] Graig A. Spolek, Stephen R. Jefferies, Analysis of Large Deflections of Fishing Rods. Dostopno na: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-11353-0_49, ogled: 20.8.2020

[2] M. Brojan: Zapiski s predavanj Stabilnost konstrukcij, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2019

[3] M. Brojan, T. Videnič, F. Kosel: Non-prismatic Non-linearly Elastic Cantilever Beams Subjected to an End Moment, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2007

[4] M. Brojan, T. Videnič, F. Kosel: Large deflections of nonlinearly elastic non-prismatic cantilever beams made from materials obeying the generalized Ludwick constitutive law, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2009

[5] M. Brojan, T. Videnič, F. Kosel: Large deflections of non-prismatic nonlinearly elastic cantilever beams subjected to non-uniform continuous load and a concentrated load at the free end, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2012

[6] Performance Composites. Dostopno na: http://www.performance-composites.com/carbonfibre/mechanicalproperties_2.asp, ogled: 20.8.2020

EFFECT OF RADIUS OF THE AXIS ON THE VIRTUAL WEIGHT LOSS OF A MAXWELL WHEEL "ŠTUDENTSKA TEHNIŠKA KONFERENCA - ŠTeKam"

Tibor Volovšek

Summary

The observation of Virtual Weight Loss of a Maxwell wheel is an investigation in the field of classical mechanics. Maxwell wheel is a spinning disc with horizontal axis suspended on two strings which wind up or unwind when the disc rotates. When disc is released from its highest position to oscillate, a significant reduction in its apparent Weight can be detected, which is caused by the combination of dynamics of rotational and gravitational forces. The results can be used by engineers to design more efficient systems consisting of rotating components such as hydroelectric generators or wind turbines. In the experiment two Dual-Range electronic force sensors were used to record the force of the string and the radius was altered by adding Styrofoam cylinders of different radii on the axis. The results of this research show that the virtual weight loss of the spinning disc is increased with an increase in the square of radial distance. The correlation is supported theoretically and experimentally. Nevertheless the experimental values are smaller than the values calculated from the theory. This gives the experiment credibility, since the theoretical calculation does not account for the effect of the energy loss which happens during the force impulse at the bottom position.

1 Introduction

A Maxwell wheel is an experiment where the conservation of energies can be observed. The potential energy is transformed to kinetic rotational and vertical kinetic energy. In its design, the experiment is based on a spinning disc suspended with its horizontal axis on two vertical strings in such a way that they wind up or unwind around the axis as the wheel rotates as shown in *Figure 1*. When released from a highest position to oscillate, a significant reduction in its apparent Weight can be detected caused by the combination of dynamics of rotational and gravitational forces. As an enthusiast of force and motion scientific concepts, I have always been fascinated by different forms of experiments that relate to the motion of bodies under the influence of force. However, the knowledge of Maxwell's discs has fascinated me even further, particularly on the aspect of the Weight loss. Out of curiosity and the desire to gain more understanding of the possible influencing factors to the reduction in the apparent Weight, besides the rotational and gravitational force, I decided to align my physics investigation on the determination of how the radius of the axis of a spinning disk influences the virtual Weight loss of a Maxwell disc. Investigating Weight loss of Maxwell disk is an interesting phenomena which by nature itself attracted me, but the results can be applied for energy generating systems. By understanding how the different radii influence the weight loss of the rotating components by hydroelectric generators and wind turbines, engineers can design more efficient and resilient generation systems contributing to sustainable energy production which is reason enough to be motivated in investigating this phenomena.

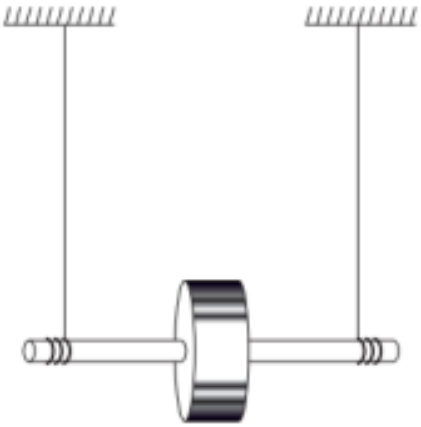


Figure 1 Maxwell wheel (https://cyberleninka.ru/article/n/on-the-motion-of-the-maxwellpendulum/pdf)

2 Research question

How will the radius of the axis of a spinning disk *(0.48, 0.63, 0.75, 0.9, 1.0, 1.2, cm*) influence the virtual weight loss (*N*) of a Maxwell disc measured with electronic force sensors?

3 Theory and hypothesys

3.1 Theory

The mechanism of Maxwell's wheel is an experiment in the conservation of energies.The Maxwell wheel is made of a disc of radius R which is set on the axis of radius r. If the wheel is brought to the highest position (maximum potential energy) by winding up the strings and letting it go there, it will move downwards under the influence of gravity, rotating faster and faster with constant acceleration. Once it reaches the bottom (maximum rotational energy), it continues to rotate due to inertia, the strings wind up, reversing the direction of winding, and it moves upwards again. (1,2) If the wheel is taken as an isolated system and the friction is neglected, the energy is conserved and the motion can be described as follows.

The position of the disk x is taken such that x= h at the highest position and *x= 0* at equilibrium. We can write the potential energy E_p at the position x as:

$$E_p = \text{m g x}$$

When the wheel falls from the height h the total energy E of the system is potential energy which is given by:

$$E = m\ g\ h$$

$m = The\ combined\ mass\ of\ the\ shaft\ and\ disc$
$g = Gravitational\ acceleration$

As the disc starts to roll downwards when free, the potential energy transforms in rotational kinetic energy Ekrdue to its rotation with angular velocity x and vertical kinetic energy Ekvdue to vertical movement with velocity v_x . The total energy of the system in position x will be equal to the summation of the three energies, such that:

$$E = E_p + E_{kv} + E_{kr} \qquad m\ g\ h = m\ g\ x + \frac{1}{2}\ m\ {v_x}^2 + \frac{1}{2}\ I\ {\omega_x}^2$$

v_x =*Linear velocity*
ω_x =*Angular speed*
I =*The moment of inertia*

At the equilibrium position *x = 0* the potential energy would be zero and linear and angular velocities have their maximum values. The initial potential energy equals the sum of the maximum rotational and linear kinetic energy.

$$E = E_{kv} + E_{kr} \qquad m\ g\ h = \frac{1}{2}\ m\ {v_0}^2 + \frac{1}{2}\ I\ {\omega_x}^2$$

Vertical velocity and rotational velocity are not independent. As shown in *Figure 2* ω_x is the angular velocity in *x*, $\underset{dx}{\rightarrow} = \underset{da}{\rightarrow} \times \underset{dr}{\rightarrow}$ and $\underset{v}{\rightarrow} = \underset{\omega}{\rightarrow} \times \underset{r}{\rightarrow}$ and $\omega = \frac{v}{r}$. To prove the experimental data, the equation has to be expressed in terms of acceleration.

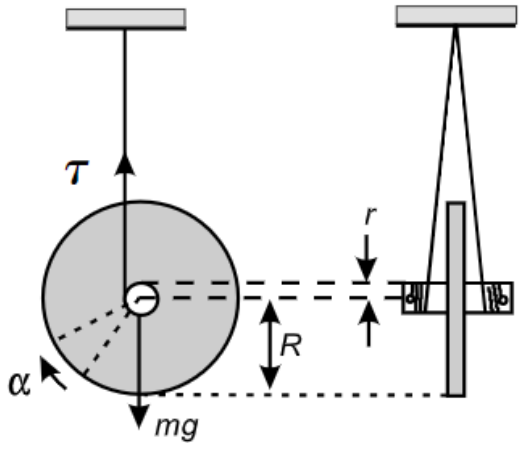


Figure 2: The Diagrammatic Set-up of the Spinning Disc System *(https://www.researchgate.net/publication/244714551 The Maxwell wheel investigated with MBL)*

Considering that total energy as the summation of the kinetic and potential energy, the equation of *E* could be expressed in the following form:

$$m\ g(h - x) = \frac{{v_x}^2}{2}\ \left(m - \frac{1}{r^2}\right)$$

$$g\ (h - x) = \frac{{v_x}^2}{2}\ \left(1 - \frac{1}{m\ r^2}\right)$$

The impact of the radius of axis on the virtual Weight of the spinning disc could be derived using the following assumed diagram.

In the diagram above, the symbols represent:

$\tau = weigth\ on\ the$ spinning disc
$R = radious\ of\ the\ disc$
$r = radious\ of\ the\ axis$
$m = massof\ the\ disc\ and\ axis$
$g = the\ gravitational\ acceleration$

The system presented above is composed of two cylinders: an axis and a disc. So will the moment of inertia be calculated as a sum of moment of inertia of the disc with radius R and moment of inertia of the axis with radius r. Since r is much smaller than R the equation can be simplified.

$$I = I_{axis} + I_{disc} = \frac{1}{2} m_{disc}\, R^2 + \frac{1}{2} m_{axis}\, r^2 \cong \frac{1}{2} m\, R^2$$

Inserting I into the function for energy, the speed of disk at the position x can be expressed.

$$g\,(h-x) = \frac{{v_x}^2}{2}\left(1 - \frac{R^2}{2\,r^2}\right) \rightarrow v_x = \sqrt{\frac{2\,g\,(h-x)}{\left(1-\frac{R^2}{2\,r^2}\right)}} = \sqrt{2\,a\,(h-x)}$$

The acceleration of the system can then be derived from this equation:

$$acceleration, a \cong \frac{g}{\left(1 - \frac{R^2}{2\,r^2}\right)} \cong g\frac{2\,r^2}{R^2}$$

Considering the dynamic motion of a system. The tension of the disk in the steady position before falling must be equal to the weight :

$Initial\ Weight\ , \tau_0 = mg$

When the disc of the system starts to fall, the tension in the string will decrease:

$String\ Tension\ \ \tau_1 = mg - ma$

And the predicted weight loss will be

$Weight\ loss, \Delta\tau = \tau_0 - \tau_1 = ma$

Inserting the expression derived previously for a we get

$$\Delta\tau = gm\frac{2\,r^2}{R^2}$$

giving the direct relationship between the Weight loss and the radius of the axis.

3.2 Hypothesis

The hypothesis of this experiment will therefore be that if we increase the radius of the axis the apparent weight loss will increase. Ideally, if the mass, gravitational acceleration and the radius of the disc are held constant, the relationship between axis and Weight loss will be given as:

$$\Delta\tau = k\,r^2\,, \quad k = \frac{2\,m\,g}{R^2}$$

The above equation indicates that the virtual weight loss will increase quadratically with the increased radius.

4 Research variables

4.1 Independant variable

The radius of the axis. The variable will be increased from 0.48 cm, 0.75 cm, 0.90 cm, 1.0 cm, 1.2 cm, 1.5 cm with the aid of the light Styrofoam cylinders.

4.2 Dependant variable

Virtual Weight loss. The tension forces will be measured when the radius of the axis is changed in the range mentioned in the independent variable section. From measured tension the weight loss will be calculated.

4.3 Controled variable

Table 1: Controlled variables

Variable	Method	Reason
mass of the whole system 688 g	choosing the cylinders added on the axes to change radii from light material with negligible mass comparing to mass of the system	changing the mass would change the moment of inertia as well as the measured tension so the relation of variables would not be comparable
the radius of the disk 6.5 cm	using the same disk for all trials	preserving constant moment of inertia
length of axis 15 cm and position of the string on the axis	not changing the length and keeping the position where rope is attached to axis constant	keeping the dynamics of the system and string winding on the axis the same and reducing the errors of moment of inertia
elasticity of string	non-elastic string	prevent fluctuations in tension forces

5 Equipement

- two Dual-Range electronic force sensors from Vernier 0.001 N (set for 50N)
- transmitter LabQuest Mini which is connected to Logger Pro on the computer
- non elastic string
- Maxwell wheal with mass 688 g 0.1 g composed of
  - a disk, radius 6.5 cm 0.01 cm, thickness 1.0 cm 0.01 cm
  - an axis, radius 0.48 cm 0.01 cm, length 15 cm 0.01 cm
- 4 cylinders with radii 0.63 cm, 0.75 cm, 0.90 cm, 1.0 cm, 1.2 cm 0.01 cm

6 Methodology

The wheel was suspended on two strings and fixed on two force meters. The force meters were hung on screws to prevent any unwanted oscillation and movement while spinning up and down. To measure the force two Dual-Range electronic force sensors from Vernier were used.They were connected to the compatible transmitter LabQuest Mini which was connected to Logger Pro on my computer also from Vernier.The force sensor records the force of each string separately, so the total tension will be given as a sum of both forces. For changing the radius of the axis the light 3 cm thick Styrofoam board was used. From the board the cylinders with different radii were cut with a high precision CNC Laser Cutting Machine. Through the middle a hole that fit the axis was made. This way 3 cm long adapters with different radii were obtained which were set on the axis of the pendulum. The experiment was made by adding and removing the cylinders.The strings were placed not exactly vertical to the axis to prevent the string winding on itself, for this would significantly change the radius of the axis and consequently influence the measurements of tension force.

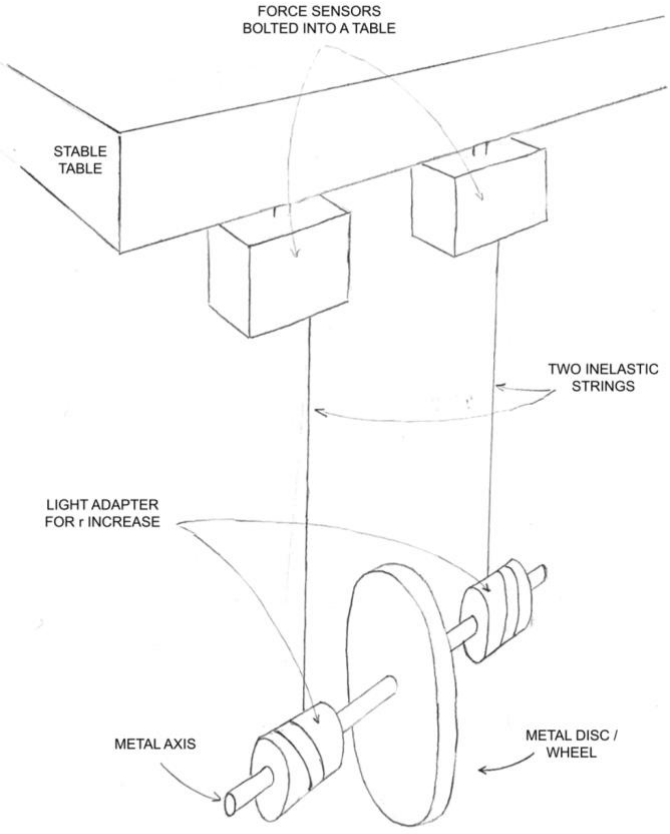


Figure 3: An Image of the Apparatus Used to Conduct the Experiment

I didn't use a scale to measure the weight loss directly, because scale is less precise and it is also harder to record the data than with electronic force sensors. Originally the wheel was meant to hang on a metal frame, but I disassembled the frame and took the disk that I hung on the forcemeters. By hanging the disc, the part of the set up where mass loss occurs, was isolated. This way there was no extra weight and estimations about the weight loss are more precise.
The experiment could be done by measuring the position of the wheel placing a sonar under the disc. This way velocity and acceleration would be calculated and the apparent weight loss derived. But this would be based on all theoretical approximations of the isolated system and would not give the real results of the actual weight loss desired.

6.1 Factors that cannot be controlled

Nevertheless the air resistance and the friction between the string and the axis cannot be prevented so the wheel will lose some energy. The estimated literature value for loss of energy is 8% with every down and upward movement. (Pecori, The Maxwell) The estimation for loss also includes the loss during force impulse.

6.2 Experimental procedure

1. The wheel was hung on dual-range force sensors that were connected to the compatible transmitter LabQuest Mini and then to the Logger Pro of the personal computer.
2. The wheal was hung in equilibrium and the initial weight 0 was measured.
3. The disc was winded up on the axis with radius 4.8 cm to the maximum height (the disc touches the table) and fixed with the thread.
4. The tread was cut to let the wheel go.
5. The force sensors were then used to measure and estimate the average force of the strings during movement.
6. Steps 3-5 were repeated then for two more trials
7. Steps 3-6 were further repeated with a radius changed to 0.63 cm, 0.75 cm, 0.90 cm, 1.00 cm and 1.20 cm, recording the results in each case. For changing the radius of the axis, the light Styrofoam cylinder of radius 0.63 cm, 0.75 cm, 0.90 cm, 1.00 cm and 1.20 cm were put on the axis

6.3 Data procedure

On the graph plotted for the measurements of the average tension force of the string during the motion the peaks of tension can be observed. This happens when the disc reaches equilibrium position. The motion is then stopped and reversed because of the string stretching. This can be explained as a collision which happens in a short time. (Pecori, The Maxwell) The translational kinetic energy of the wheel is transformed to elastic energy of the string which is stored in the stretched string. Afterwards it is transformed again in the translational kinetic energy of the upward motion.The force impulse equals the change of momentum and is measured as a change of the string's tension $\tau - \tau_0$ in the short period of time which is seen as a peak on the graph. For obtaining the raw data the average forces before and after the first peak were taken.This means that only the motion of the fist swing rolling down before the peak and up again after the peak was considered because in the investigation the dependence of the weight loss of the wheel only when in motion is observed.

7 Raw data

$$\boldsymbol{Initial\ Weight, \tau_0 = 6.749\ \pm\ 0.001\ N}$$

Table 2: Measured Average Weight on the strings

Radius of the Axis $r \pm\ 0.01\ cm$	**Measured Weight of the Spinning Disc** τ_1 ±0.001 N		
	Trial 1	**Trial 2**	**Trial 3**
0.48	6.677	6.676	6.677
0.63	6.628	6.626	6.630
0.75	6.571	6.570	6.573
0.90	6.494	6.491	6.498
1.00	6.449	6.437	6.436
1.20	6.291	6.303	6.298

8 Processed data

Table 3: Calculated Weight loss of a Spinning Disc

Radius of the Axis $r \pm\ 0.01\ cm$	**Calculated Weight loss** $\Delta\tau$ ±0.01 N		
	Trial 1	**Trial 2**	**Trial 3**
0.48	0.072	0.073	0.072
0.63	0.121	0.123	0.119
0.75	0.178	0.179	0.176
0.90	0.255	0.258	0.251
1.00	0.300	0.312	0.313
1.20	0.458	0.446	0.451

The raw data obtained and collected in *Table 2* above were first used to compute virtual weight losses at the different radial distances of the axis, using the derived formula from the background section. For sample calculation, using data corresponding to 0.48cm Trial 1.

$$Virtual\ Weight\ of\ the\ spinning\ disc, \Delta\tau = 6.749 - 6.677\ = 0.072\ N$$

The data collected in the processed data table above were then used to compute the average virtual weights of the spinning disc and the corresponding uncertainties using the following general formulas:

$$Average\ Weight\ loss, \qquad \Delta\tau_{Average} = \frac{\Sigma\ \Delta\tau}{Number\ of\ trials}$$

$$Uncertainty\ of\ Weight\ loss, \qquad \Delta\tau_{Uncert.} = \frac{\Delta\tau_{Max} - \Delta\tau_{Min}}{2\ \Delta\tau_{Average}}$$

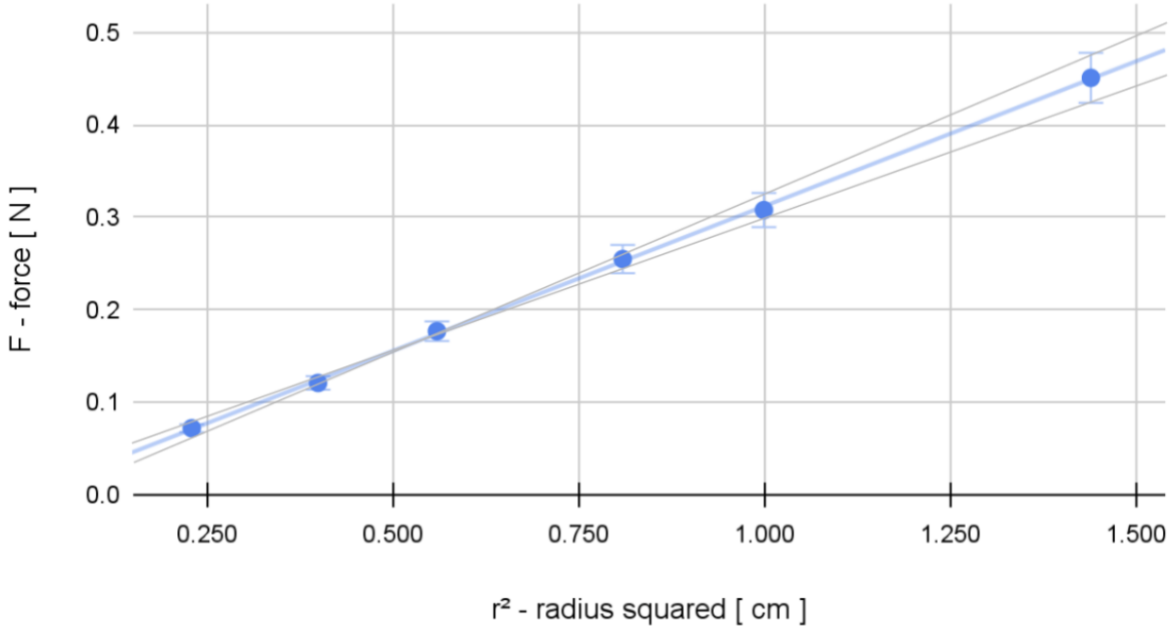
The next analytical process of data was to compare the measured data with the calculated ones. The general formula from the theoretical sections was first used to determine the theoretical values.

Table 4: Theoretical and Experimental Virtual Weight Losses

Squared radius $r^2\ cm^2$	**Average Weight loss** $\Delta\tau_{Average}/N$	
	Experimental	**Theoretical**
0.230	0.072 ± 0.007	0.0730
0.400	0.121 ± 0.033	0.1230
0.560	0.177 ± 0.011	0.1800
0.810	0.255 ± 0.031	0.2590
1.000	0.308 ± 0.042	0.3190
1.440	0.451 ± 0.027	0.4600

The piece of resulting data was then used to create a line graph to depict the relationship that exists between the pair of variables in this investigation.To obtain the direct proportional graph the Average Weight loss against squared radius was plotted.

Figure 4: Graph of Virtual Weight loss in N against Squared Radius of the axis in cm



The line graph obtained above indicates that the virtual weight loss of the spinning disc is increased with an increase in the square of radial distance in a relationship of the positive slope of 0.3179. From this it can be concluded that with increasing radial distance virtual weight loss will increase quadratically. Comparing the values of the slope with the constant theoretical value of the constant derived in introduction $k = \frac{2mg}{R^2} =$ 0.3194 high similarity can be observed. This shows the close relation of theory to the experiment and adds to the credibility of this investigation. Furthermore, the strong correlation between dependent and independent variables has been defined by a square regression constant of 0.9988, indicating that 99.98 % of increases in virtual weight losses of the spinning discs could be explained through the variation in the radius of the axis.

9 Conclusion and evaluation

R The investigation was designed and purposed to determine how the radius of the axis of a spinning disk influences the virtual weight loss of a Maxwell disc. In developing the investigation, it had been hypothesized that the virtual Weight loss on the spinning disc would increase with an increase in the radius of the axis. Upon collecting the data and analyzing through the scientific and statistical functions, it was found that the virtual weight loss of the spinning disc increased with an increase in the radial distance in a quadratic relationship of the highest degree of 0.3172 (positive slope), such that 99.98 % of increases in virtual weight losses of the spinning discs could be explained through the variation in the radius of the axis. Hence, the hypothesis was supported.

As already mentioned the experiment shows great correlation between dependent and independent variables. Which is undoubtedly one of the strengths of this experiment. The others are:

- Apparatus used:
  - In this experiment apparatus with small uncertainties was used. Force sensor is not only precise but also allows gathering large amounts of data in a relatively small timeframe (100 samples per second).
  - Using a CNC machine to cut the adaptors to increase the radius proved to be a great decision. Very precisely cut and smooth adaptors greatly contributed to reducing the systematic error.

- Setup and method:
    - Isolating the object where virtual weight loss occurs by hanging the pendulum directly on force sensors decreases the overall mass of the system and enables the usage of more precise force sensors for smaller forces.
    - Taking the average force for both movements (down and back up) is the reason the energy loss during the force impulse is accounted for in the experiment.
    - Fixing the pendulum in top position and then releasing it by cutting the string greatly eliminated the random/human error that would occur when released.

By comparing theoretical and experimental data it can be seen that another strength of this experiment is that results include the effect of the energy loss during force impulse at the bottom position which changes the direction of motion. In other words the linear kinetic energy is momentarily transformed to elastic energy of the string and then back to kinetic energy in the other direction. During this transition some energy is lost. Taking the average force for both movements (down and back up) is the reason the energy loss during the force impulse is accounted for in the experiment.
By comparing the experimental and theoretical values it can be seen that the theoretical are larger. This is because in theory the pendulum moves faster than it actually does (due to energy loss) which results that expected virtual weight loss is greater than it is in reality. Similar conclusion is also suggested by literature which states that energy lost per cycle (down and back up) is around 8%. (Pecori, The Maxwell)
In this sense the experimental values are better than theoretical, because the theoretical reasoning did not account for the energy loss during the force impulse. This is also supported by the data.

Comparing the systematic uncertainties of the experiment with absolute uncertainty it can be concluded that the random error is the main limitation of this experiment. Most significant cause is winding of string on the axis. When the string is winded on the axis it can never be absolutely the same. This may cause small oscillation and unwanted movement of the wheel and cause energy loss. Probably the most significant random error. To be certain further calculations are required. This can be improved by further increasing the angle between string and axis of the pendulum. This would assure that string would wind with greater gaps between each wind. However, at large angles the stability of the pendulum when in motion decreases. Or by increasing the number of trials to 5 or 7.

If given more, the calculation of the force impulse and estimation of the energy loss during it would be an interesting extension of the investigation. The pulse is the integral of the tension force over time, and can be calculated as the area under the peak on the plotted graph, which would give an estimation of transformation of energy in the elastic energy. The investigation could be extended to explore the impact of other variables on the virtual weight loss, including the mass of the disc, or the radius of the disc for a more comprehensive scientific analysis.

10 Works cited

- Gebze technical university, VERSITY. *Objective: Deriving Principle of Conservation of Energy and Conversion between Kinetic and Potential Energy*. https://www.gtu.edu.tr/Files/UserFiles/90/2019LabManuals/M4_ENG.pdf. Accessed 6 Dec. 2023.
- Whitney, J.H. & Co. “MAXWELL’S WHEEL.” *3B Scientific*, 9 May 2003, www.3bscientific.com/PhysicsExperiments/UE1040320_EN.pdf. Accessed 6 Jan. 2024.
- Pecori, Barbara, and Giacomo Torzo. “The Maxwell Wheel Investigated with MBL.” *Research Gate* , Sept. 1998, www.researchgate.net/publication/243714551_The_Maxwell_wheel_investigated_with_MBL. Accessed 3 Jan. 2024.
- Chakrabarti, Surajit, Rajesh B. Khaparde, and Ali Mohammed H. Kachwala. "Experimental study of the coefficient of rolling friction of the axle of a Maxwell's wheel on a soft horizontal surface." *European Journal of Physics* 41.3 (2020): 035803.
- Abdulkhodiev, Akbarjon. "On The Motion of the Maxwell Pendulum." *Science and innovation* 1.A7 (2022): 168-172.

ODNOS MED KONSTRUKCIJSKO ZASNOVO IN ARHITEKTURNIM IZRAZOM PALIČNIH KONSTRUKCIJ

Nejc Vrbovšek, David Koren

Povzetek

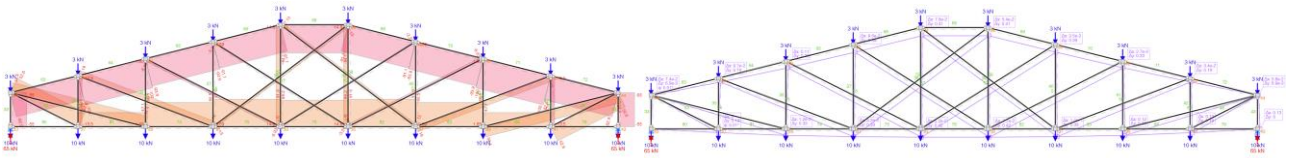
Funkcionalnost in estetika sta dva pogleda na konstrukcijo, ki se že od nekdaj prepletata in sta prisotna v vseh tipologijah struktur. Sploh v sodobni arhitekturi konstrukcijska zasnova pogosto presega zgolj tehnične zahteve in postane ključni element estetskega izraza zgrajenih struktur. Članek raziskuje to povezavo na primerih paličij, enih od najpomembnejših konstrukcijskih sistemov, ki igrajo osrednjo vlogo pri oblikovanju arhitekturnega izraza in vrednot, saj s svojo zasnovo omogočajo sinergijo med funkcionalnostjo in estetiko. V splošnem so paličja najpogosteje uporabljena pri konstrukciji mostov, stolpov in strešnih konstrukcij, kjer so ključnega pomena stabilnost, učinkovitost, racionalnost in optimalna izkoriščenost uporabljenega materiala. Namen članka je prikazati soodvisnost inženirske in arhitekturne perspektive, na primerih izbranih paličij. V raziskavi smo obravnavali izbrana paličja uporabljena kot horizontalne (mostovi, strešne konstrukcije) in vertikalne (stolpi) strukture. V uvodnem delu članka so najprej predstavljene osnovne lastnosti paličij z vidika prenosa obtežbe, kar tudi ilustriramo z analizo enostavnega paličja izvedeno s preprostim prostodostopnim računalniškim programom za analizo 2D konstrukcij. Nato so podrobneje predstavljeni izbrani primeri paličji in metode dela, kjer smo definirali in izbrali 4 tehnične in 4 arhitekturne parametre, ki smo jih za vsako obravnavano paličje kvantitativno ocenili in njihovo celovito vrednotenje grafično prikazali z diagrami. Na koncu članek podaja nekaj ključnih ugotovitev, ki izhajajo iz izvedene raziskave.

1 Uvod

V velikem delu našega grajenega okolja je konstrukcija pogosto skrita ali neopazna, kar pomeni, da se je v vsakdanjem življenju le redko zavedamo. Tudi, če je ta izpostavljena, kot na primer pogosto pri paličjih, je redko prepoznana kot ključni element, ki prispeva k ustvarjanju arhitekture, njene kakovosti in vznemirjanja. Po besedah arhitekturnega teoretika Petra Collinsa je konstrukcijski izraz še vedno eden najmočnejših idealov moderne dobe ali celo zamisel, ki ponuja najbolj obetavne možnosti za prihodnji razvoj sodobne arhitekturne misli [1].

Paličja so konstrukcijski sistemi, sestavljeni iz vitkih, linijskih elementov – palic, katerih krajišča so med seboj povezana v členkastih spojih in skupaj tvorijo večje nosilne strukture. Ob izpolnitvi določenih pogojev in predpostavk so posamezne palice izpostavljene le osnim (nateznim ali tlačnim) napetostim in njihov statični račun postane razmeroma enostaven. V splošnem so paličja zelo primerna za prenos manjših obtežb preko večjih razponov, zaradi

njihove togosti, pa se pod obtežbo povesijo manj kot polni nosilci z ekvivalentno težo. Njihova minimalna poraba materiala pripomore tudi k zmanjšanju stroškov in teže konstrukcij. Kljub temu pa zavzamejo več prostora kot polni nosilci in so zaradi stroškov izdelave pogosto dražja izbira. Potrebno pa je upoštevati tudi, da lahko različne obtežbe povzročajo v palicah enkrat tlačne, drugič natezne sile. Posebej je potrebno paziti pri potujočih bremenih, ki lahko v istem konstrukcijskem elementu povzročijo zdaj tlak zdaj nateg, odvisno od položaja obtežbe [2].
Na poenostavljeni zasnovi Železnega mosta čez Savo (ki ga tudi podrobneje analiziramo v glavni analizi članka), kjer smo zreducirali število polj, so na Sliki 1 prikazane napetosti in deformacije, dobljene s pomočjo računalniškega programa za analizo in simulacijo različnih inženirskih rešitev, STRIAN [3]. Prikazani rezultati so bili pridobljeni ob predpostavljeni simetrično razporejeni vertikalni točkovni obtežbi pri čemer so bile na zgornjem pasu točkovne sile le 30% tistih na spodnjem pasu.



Slika 1: Tlačne napetosti v rdeči in natezne napetosti v oranžni barvi (levo) ter deformacije (desno), ob vertikalni obremenitvi na poenostavljenem primeru Železnega mosta čez Savo.

V članku poskušamo na primerih paličij dokazati, da lahko konstrukcija, ko je premišljeno oblikovana in izpostavljena, deluje kot ključen arhitekturni element, ki ne le zagotavlja stabilnosti in nosilnosti, temveč tudi pomembno prispeva k estetski vrednosti in prostorski izkušnji zgrajene strukture. V nadaljevanju članka so podrobneje predstavljeni izbrani primeri, metode dela, analizo z rezultati in ključne ugotovitve, ki izhajajo iz naše raziskave. Analiza je bila izvedena z razdelitvijo opazovanih parametrov v dve skupini: tehnični in arhitekturni parametri. Vsak parameter (skupno 8) smo ocenili z oceno od 0 do 5 in rezultate pokazali grafično z radialnimi diagrami. Na koncu smo na podlagi dobljenih rezultatov in z njihovo primerjavo podali zaključne ugotovitve.

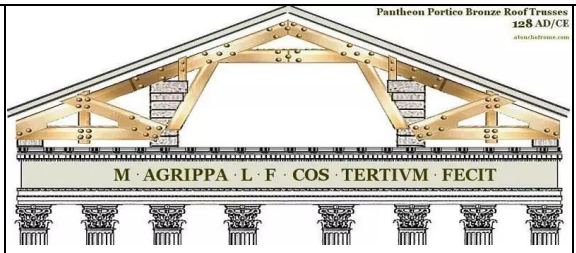
2 Materiali, metode dela in potek raziskave

2.1 Predstavitev obravnavanih primerov

Pri izbiri paličij smo želeli v analizo vključiti čimbolj raznolike primere, od paličij uporabljenih v mostovih, strešnih konstrukcijah in v vertikalnih konstrukcijah. Primeri spadajo v različna časovna obdobja in so narejeni iz različnih materialov, kot so jeklo, železo, bron in umetne mase. Z analizo smo tako želeli zavzeti čim širše področje uporabe gradnje s paličji in na primerih pokazati odnos med konstrukcijo in arhitekturno zasnovo.

Tabela 1: Izbrani primeri paličij uporabljenih v študiji.

Oznaka paličja	**Ime konstrukcije, avtor in letnica izgradnje**	**Slika**	**Kratek opis**
A	Forth Bridge, Škotska, Sir John Fowler in Sir Benjamin Baker, 1890.	 [11]	Ikoničen primer jeklenega mostu, ki temelji na načelu konzolne konstrukcije. Dve konzoli sta povezani z visečim razponom na sredini [4].
B	Eifflov stolp, Francija, Gustave Eiffel, 1889.	 [12]	324 m visoka kovano-železna struktura, zasnovana kot stolp s štirimi stebri iz rešetkastega železa, ki so na dnu ločni, na vrhu združeni in v rednih intervalih povezani med seboj z dodatnimi kovinskimi nosilci [5].
C	Faust Street Bridge, ZDA, King Iron Bridge Company, 1887.	 [13]	Most iz kovanega železa, sestavljen iz dveh glavnih razponov, ki skupaj merita okoli 195 m. V času izgradnje je veljal kot velik tehnološki napredek, še danes pa stoji kot dragocen primer trajnostne infrastrukture, ki kljubuje času [6].
D	Železni most na Savi, Slovenija, avtor ni znan, 1894.	 [7]	Parabolična zasnova jeklenega mostu brez vmesne podpore se z zeleno barvo zliva z okolico [7].

E	Panteon, Italija, Apolodor iz Damaska, 125-127 n. št.	 [14]	152-tonska bronasta struktura, ki je držala streho nad Panteonom več kot 1500 let, zgrajena dolgo preden so bile zgrajene prve kovinske strukture železne dobe. Sestavljena iz 3 paličij, ki so bila v vzdolžni smeri povezana s slemenskimi nosilci [8].
F	Pontresina, Švica, podjetje Fiberline, 1997.	 [15]	Primer inovativnega inženirstva (peš)mostov, ki uporablja napredne kompozitne materiale. Prednost gradnje z vlakni ojačane plastike (FRP) je nizka teža, kar je mostu omogočalo lahko namestitev v težavnih pogojih švicarskih Alp. Kljub inovativni zasnovi je most po dveh letih podlegel vremenskim vplivom in danes namesto njega stoji nova jeklena verzija [9].

2.2 Metode analize in obravnavani parametri

V raziskavi smo kot glavno raziskovalno metodo uporabili deskriptivno metodo s preučevanjem različnih konstrukcij, ki vsebujejo paličja. Delno sta bili uporabljeni tudi zgodovinska in eksperimentalna raziskovalna metoda. Dane podatke smo zbrali in jih predstavili v tabeli, nato pa vsako obravnavano paličje kvantitativno ovrednotili po izbranih (tehničnih in arhitekturnih) parametrih. Sam sistem dvo-perspektivnega vrednotenja, uporabljen v naši analizi je bil povzet po doktorski disertaciji B. Azinovića [10] in razdeljen na: i) tehnične parametre, ki obsegajo nosilnost, tehnološko zahtevnost, ekonomičnost in trajnost, ter ii) arhitekturne parametre, ki obsegajo skladnost s kontekstom, trajnostnost, estetiko in kulturno ter zgodovinsko vrednost. V Tabeli 2 in 3 so prikazane vrednosti posameznih parametrov z opisi oz. kriteriji, ki smo jih upoštevali za analizo paličij, na katerih temeljijo ugotovitve te študije.

Tabela 2: Tehnični parametri upoštevani v analizi in njihovo vrednotenje.

Ocena	Nosilnost – T1	Tehnološka zahtevnost* – T2	Ekonomičnost – T3	Trajnost – T4
1	Primerno le za lahke obremenitve.	Uporaba standardnih tehnologij z malo tehničnimi izzivi.	Relativno draga zasnova glede na rezultate, omejeni prihranki v materialih.	Zahteva po pogostih vzdrževalnih posegih.
2	Sprejemljivo za standardne obremenitve.	Zahteva nekaj naprednih tehnologij in tehničnih znanj.	Sprejemljiva zasnova glede na stroške izdelave.	Običajna življenjska doba.
3	Obvladuje večino obremenitev.	Uporaba naprednih tehnologij in inovacij.	Stroškovno učinkovito, optimizirana poraba materialov.	Redko zahteva vzdrževanje.
4	Primerno za visoke obremenitve.	Kompleksni tehnološki postopki, z visoko ravnjo tehničnih znanj.	Zasnova in izgradnja z minimalnimi stroški.	Dolga življenjska doba, brez večjih težav.
5	Izjemna nosilnost, brez vidnih deformacij tudi pri ekstremnih obremenitvah.	Vrhunec tehnološke inovacije in zapletenosti, z zahtevo po specializiranem znanju.	Izjemno učinkovita raba virov.	Izjemna trajnost.

* Tehnološka zahtevnost se ocenjuje na podlagi zahtevnosti konstrukcije v času izgradnje in je odvisna od časa njenega nastanka.

Tabela 3: Arhitekturni parametri upoštevani v analizi in njihovo vrednotenje.

Ocena	Skladnost s kontekstom* – A1	Trajnostnost – A2	Estetika – A3	Kulturna in zgodovinska vrednost – A4
1	Popolno neskladje, povzroča vizualno motnjo v prostoru.	Uporabljeni materiali imajo velik ogljični odtis, majhen del trajnostnih virov.	Osnovna funkcionalna zasnova, ki ne prispeva k estetiki prostora.	Nizka kulturna in zgodovinska vrednost.

2	Slaba skladnost, obstaja neka napetost med paličjem in okolico.	Proizvodnja in uporaba imata še vedno pomemben vpliv na okolje.	Vizualno sprejemljivo, vendar brez posebnih estetskih značilnosti.	Določena povezava z lokalno zgodovino in kulturo.
3	Relativno dobra vključitev v okolje, ne moti skladnosti prostora.	Večina materialov prihaja iz trajnostnih virov.	Vizualno privlačno, dobro se vključuje v okolico.	Pomembno za lokalno kulturo in zgodovino.
4	Dobro ujemanje z okolico, paličje prispeva k vizualni harmoniji prostora.	Izdelava iz obnovljivih virov, energetsko učinkovito.	Elegantno in harmonično, skrbno izbrani materiali in oblike.	Ključen del kulturne dediščine, močna povezava z identiteto kraja.
5	Brezhibna vključitev v okolje, ustvarja vtis celovitosti in usklajenosti.	Popolnoma trajnostno, s popolno zmožnostjo recikliranja.	Arhitekturna umetnina, ki izstopa po svoji lepoti in integraciji v svoje okolje.	Nenadomestljiv del nacionalne ali svetovne kulturne dediščine.

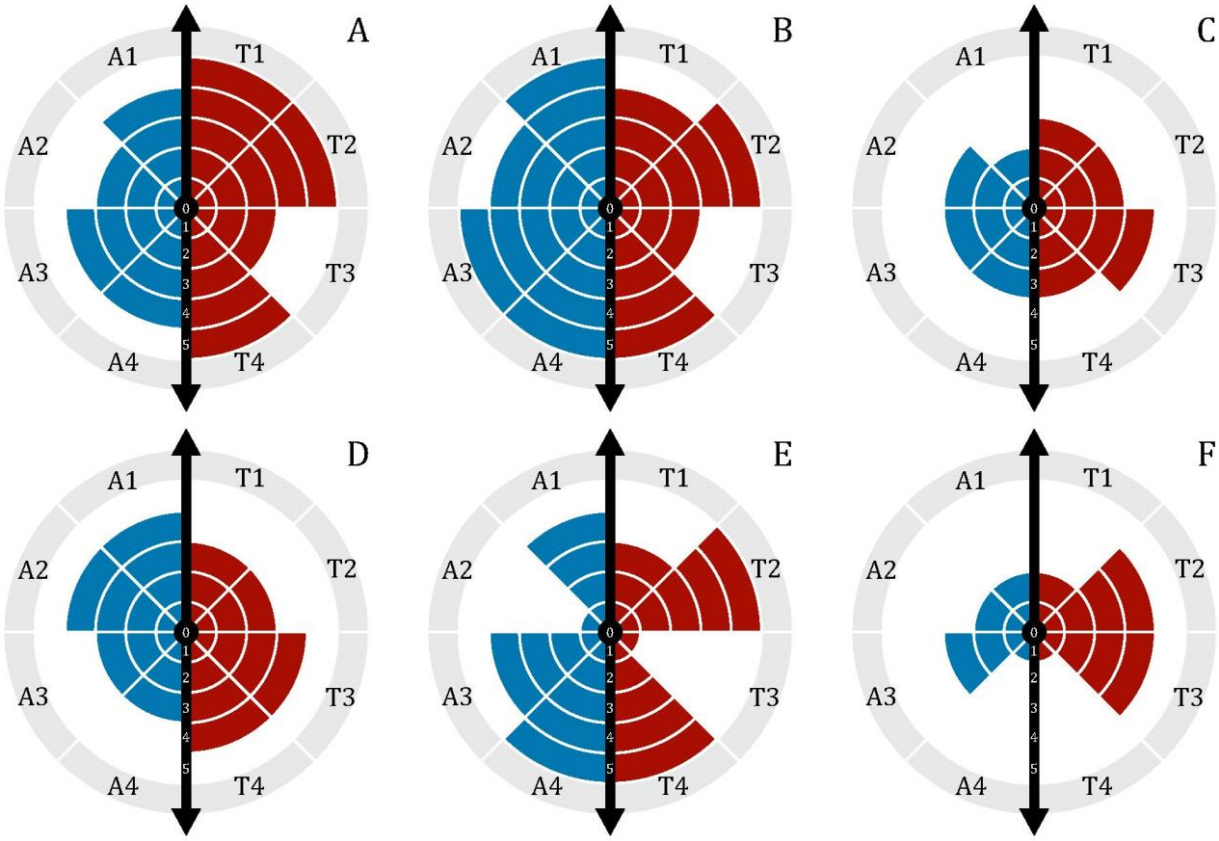
* Skladnost s kontekstom vključuje skladnost s prostorskim in zgodovinskim kontekstom konstrukcije.

3 Rezultati

Rezultati analize so prikazani na Sliki 2, v obliki radialnih diagramov, podobnih kot v [10]. Iz diagramov lahko vidimo raznolikost izbora paličij, ki smo ga želeli doseči z vključitvijo različnih konstrukcij, kot so mostovi, strešne in pa vertikalne konstrukcije.

Glede na opravljeno analizo in izvedeno vrednotenje smo med seboj primerjali različna paličja in opazovali (ne)skladnost med analiziranimi tehničnimi in arhitekturnimi parametri. V danem primeru se je izkazalo, da paličja, ki dosegajo višje ocene v arhitekturnih parametrih, dosegajo tudi višje ocene v tehničnih parametrih, in obratno. Če primerjamo med sabo paličje A in paličje E, lahko pri obeh primerih opazimo visoke vrednosti v parametrih T2 (tehnološka zahtevnost) in T4 (trajnost), ker sta tako Forth Bridge, kot Panteon oba veljala kot izjemna inženirska dosežka svojega časa in sta zaradi svoje dobre zasnove imela dolgo življenjsko dobo. To je vplivalo tudi na njuno zgodovinsko vrednost, zato sta dosegla visoke ocene tudi v tej kategoriji. Oba primera pa imata slabše ocene v kategoriji trajnostnosti, ker v času njune izgradnje vpliv na okolje ni imel velike vrednosti, ali pa niso razpolagali z ustrezno tehnologijo in materiali. Opazen kontrast pa je med paličjema C (Faust Street Bridge) in E (Panteon), kjer je paličje C doseglo večinoma povprečne vrednosti v vseh kategorijah, kar lahko pripišemo dejstvu, da je

paličje C primer klasičnega paličnega mostu, zgrajenega med industrijsko revolucijo, paličje E pa zaradi svoje lokacije in materialnosti izstopa, kot nenavaden primer uporabe paličij. Zaradi tega dosega visoke ocene v kategorijah, kot so kulturna in zgodovinska pomembnost, trajnost in tehnološka zahtevnost, zelo slabe ocene pa v kategorijah trajnostnost in ekonomičnost.
Dobljeni rezultati sovpadajo z izhodiščno tezo raziskave in kažejo na pomembnost povezave med konstrukcijskim pogledom na objekte in njihovim arhitekturnim izrazom, vendar bi bilo za splošnejši in definitiven odgovor analizo potrebno izvesti z večjim številom izbranih paličij, ob ostrejših kriterijih za njihov izbor in pri širšem naboru opazovanih parametrov, tako na tehničnem kot arhitekturnem polu uporabljenega sistema vrednotenja.



Slika 2: Prikaz rezultatov analize izbranih paličij z arhitekturne (Ai) in tehnične (Ti) perspektive.

4 Zaključki

Ali je lahko stabilnost v paličnih konstrukcijah dosežena z minimalno uporabo materiala, obenem pa so ta oblikovana tako, da imajo visoko estetsko vrednost? Rezultati analize kažejo, da uspešna zasnova paličij združuje funkcionalnost in estetiko, kar prispeva k njihovi dolgoročni trajnosti in kulturno-zgodovinski vrednosti. Ugotovitve članka poudarjajo, da je estetska privlačnost paličij pogosto neločljivo povezana z njihovo konstrukcijsko učinkovitostjo. To velja tako za znane strukture, kot so Forth Bridge ali Eifflov stolp, kot za manj

znane primere. Razumevanje in vrednotenje ne le paličij, ampak konstrukcij na splošno, je v sodobni arhitekturi ključnega pomena za ustvarjanje struktur, ki niso le trdne in funkcionalne, ampak tudi kulturno in estetsko pomembne.

Predstavljena raziskava je bila izvedena ob relativno majhnem in omejenem naboru paličij in v omejenem metodološkem obsegu. Zato raziskava odpira veliko možnosti za nadaljnje delo. Obsežnejši, bolj sistematični in celovit nabor analiziranih konstrukcij, nadgradnja uporabljenega sistema vrednotenja (npr. uteževanje opazovanih parametrov, uporaba tako kvantitativne kot kvalitativne presoje) ter kompleksnejše medsebojne primerjave so le nekatere možnosti za izboljšave. S tem bi dobili še bolj celovit vpogled v povezavo med konstrukcijsko zasnovo in arhitekturnim izrazom grajenih struktur, ki je sploh v današnjem svetu, ki v strukturah išče optimalne rešitve in simbolno vrednost, vedno bolj pomembna.

5 Literatura

[1] A. W. Charleson, Structure as Architecture: A Source Book for Architects and Structural ENgineers, Architectural Press, Oxford, pp. 1-2, 2005.

[2] V. Kilar, Statika I z osnovami trdnosti in projektiranja: učbenik za študente arhitekture, Razširjena, dopolnjena izd., Fakulteta za arhitekturo, Ljubljana, 2014.

[3] STRIAN, aplikacija za analizo konstrukcij, https://structural-analyser.com/ (21.8.2024)

[4] A. Metcalfe, Public Domain Review, The Forth Bridge Building an Icon, 2015, https://publicdomainreview.org/essay/the-forth-bridge-building-an-icon/ (17.8.2024)

[5] La Tour Eiffel, Origins and Construction of The Eiffel Tower, https://www.toureiffel.paris/en/the-monument/history (17.8.2024)

[6] R. W. Passfield, The Turcot Riveted Arch-Truss Bridge: ''As Rigid and Unyielding as a Stone Arch'', IA. The Journal of the Society for Industrial Archeology, JSTOR, vol. 23, no. 2, pp. 21-47, 1997.

[7] KTRC Radeče, Železni most na Savi, https://visitradece.si/znamenitosti/arhitekturna_dediscina/58/zelezni_most_na_savi/ (18.8.2024)

[8] D. Heinzelmann, M. Heinzelmann, W. Lorenz, The Metal Roof Truss of the Pantheon's Portico in Rome – 152 Tonnes of Bronze, Construction History 33, JSTOR, no. 2, pp. 1–22, 2018

[9] Structurae, Pontresina Footbridge, 2002, https://structurae.net/en/structures/pontresina-footbridge (19.8.2024)

[10] B. Azinović, Vpliv sklenjenega toplotnoizolacijskega ovoja na potresno odpornost energijsko učinkovitih stavb : doktorska disertacija, Fakulteta za arhitekturo, Ljubljana, 2016.

[11] https://www.countrylife.co.uk/architecture/the-forth-bridge-a-masterpiece-thats-1-5-miles-long-360ft-high-made-of-54000-tonnes-of-steel-and-all-set-on-granite-piers-sunk-90ft-deep-235547 (21.8.2024)

[12] https://www.livescience.com/29391-eiffel-tower.html (17.8.2024)

[13] https://www.flickr.com/photos/cmhpictures/3837739778 (18.8.2024)

[14] https://www.atouchofrome.com/pantheon-explained-page-2.html (18.8.2024)

[15] https://www.researchgate.net/publication/306031102_Determination_of_Elastic_Constants_of_Pultruded_Fibre_Reinforced_Polymer_Closed_Sections_-_Experimental_Campaign (19.8.2024)

UPORABA OPTIČNIH SATELITSKIH POSNETKOV ZA HITRO OCENO ŠKODE VETROLOMOV

Matej Zupan

Povzetek

Dandanes smo vse pogosteje priča ekstremnim vremenskim pojavom, kot so požari, poplave, suša in neurja. Drastične podnebne spremembe ključno vplivajo na stanje zemeljskega površja, ki je človekov življenjski prostor in vir surovin. Vetrolom kot posledica klimatskih sprememb je eden izmed pojavov, ki najpogosteje povzroči škodo na infrastrukturi ter kmetijskih in gozdnih zemljiščih. Na gozdnih zemljiščih lahko že enkraten ekstremni vremenski pojav povzroči velikansko škodo. Povzročeno škodo in obseg tovrstnih dogodkov lahko učinkovito analiziramo s podatki satelitskega daljinskega zaznavanja. Najpogosteje se v ta namen uporabljajo optični, radarski ali lidarski satelitski posnetki zemeljskega površja, s katerimi je mogoče doseči izjemno natančno ter hitro oceno škode. Raziskovali smo uporabnost metode detekcije sprememb za analizo škode obsežnejšega vetroloma dne 19. 7. 2023, ki je na območju alpskih dolin Krma, Kot in Radovna v Triglavskem narodnem parku za seboj pustil ogromno škodo. V raziskavi smo uporabili visokoločljive satelitske posnetke Sentinel-2 in PlanetScope. Zaznane spremembe smo vrednotili z ročno zajetimi referenčnimi podatki na podlagi digitalnega ortofoto posnetka Slovenije iz leta 2023. Z državnimi podatki o lesni zalogi smo razvili koncept ocenjevanja prostornine poškodovanega lesa in rezultate preverili z vzorcem in-situ, terensko pridobljenih podatkov o dejanskem obsegu sanitarne sečnje po vetrolomu, ki jih je zagotovil Zavod za gozdove Slovenije. Z metodo detekcije sprememb smo dosegli ujemanje poškodovanih površin 77 % za posnetke Sentinel-2 in 81 % za posnetke PlanetScope. Prav tako se je za uspešnega izkazal tudi nov koncept ocenjevanja prostornine lesa, saj so izračunane prostornine od dejanskih meritev povprečno odstopale 7 % za posnetke Sentinel-2 in 5 % za posnetke PlanetScope.

1 Uvod

V raziskavi smo z metodo detekcije sprememb (*angl. Change Detection*) z veččasovnimi visokoločljivimi optičnimi satelitskimi posnetki analizirali in vrednotili škodo na gozdnih zemljiščih, ki jo je za seboj pustil vetrolom 19. 7. 2023 na območju alpskih dolin Krma, Kot in Radovna v Triglavskem narodnem parku. Prizadeta območja so bila zelo neznačilno razpršena, študijsko območje pa zelo razgibano, velikega obsega in ponekod nedostopno. Po prvih ocenah je bilo v neurju poškodovanega več kot 60.000 m^3 drevja [2].

Za analizo smo uporabili prosto dostopne posnetke Sentinel-2 (S2) s prostorsko ločljivostjo 10 m ter posnetke PlanetScope (PS) s prostorsko ločljivostjo 3 m, ki so v omejeni obliki brezplačno dostopni za raziskovalne namene. Kot referenčni podatek za vrednotenje

pravilnosti zaznanih območij smo uporabili digitalni ortofoto posnetek (DOF) zajet leta 2023 po ujmi, s prostorsko ločljivostjo 50 cm, ki je omogočal kontrolo kakovosti dobljenih rezultatov. Za vrednotenje preračunanih volumnov lesa smo uporabili sloj gozdnih sestojev iz leta 2021, ki ga je zagotovil Gozdarski inštitut Slovenije, ter podatke o dejanskem obsegu sanitarne sečnje za vzorec zemljiških parcel, kjer je bilo spravilo lesa že v celoti zaključeno. Te podatke je zagotovil Zavod za gozdove Slovenije (ZGS).

Zadali smo si naslednje cilje:

- doseči hitro, finančno učinkovito in hkrati kakovostno oceno obsega povzročene škode;
- razviti model preračuna volumna poškodovanega lesa iz zaznanih površin;
- izpopolniti in čim bolj avtomatizirati postopek.

1.1 Teoretično ozadje

Za zaznavanje vetrolomov se izmed virov daljinskega zaznavanja najpogosteje uporabljajo optični [4, 5] in radarski posnetki pridobljeni iz letal ali satelitov [6], možno pa je uporabiti tudi podatke laserskega skeniranja [7], vendar se ti zaradi zahtevnejše obdelave in predvsem cenovne dostopnosti uporabljajo redkeje. Prednost radarskih posnetkov je predvsem v neodvisnosti posnetkov od dnevne svetlobe in vremenskih pojavov kot so oblaki [6], največji prednosti optičnih posnetkov pa predstavljata visoka ločljivost, ki omogoča podrobno interpretacijo, in cenovna dostopnost [4].

Vetrolom lahko analiziramo na podlagi časovne vrste zaporedno zajetih satelitskih posnetkov ali pa na podlagi dveh posnetkov, zajetih pred in po dogodku, kar omogoča prepoznavanje sprememb na območju v izbranem časovnem obdobju. Najpogosteje se detekcija sprememb iz optičnih satelitskih posnetkov zaznava glede na spreminjanje vrednosti normaliziranega diferencialnega vegetacijskega indeksa (NDVI). NDVI je kazalnik zdravstvenega stanja oz. aktivnosti rastlinskega pokrova na površju Zemlje [8].

Pri izboru posnetkov je pomembna predvsem zmogljivost snemalnega sistema, ki je opredeljena z razmerjem med prostorsko, spektralno, radiometrično in časovno ločljivostjo. Najpomembnejšo vlogo pri detekciji sprememb imata prostorska ločljivost – to je najmanjša razdalja med opazovanima objektoma na površini Zemlje, ki ju satelit še lahko loči kot dve točki – in časovna ločljivost, ki pove koliko časa preteče med dvema zaporednima zajemoma istega dela površja [3].

Iz področja analiziranja in ocenjevanja škode vetrolomov so dostopne številne študije, v katerih so uporabili podatke optičnih satelitskih posnetkov [4], [5], radarskih satelitskih posnetkov [6] in študije, kjer so kombinirali različne produkte daljinskega zaznavanja. V večini raziskav se točnost zaznanih površin poškodovanega drevja giblje okoli 80 %. Iz dostopne literature je možno zaključiti, da je tematika zelo aktualna, saj se je daljinsko zaznavanje za detekcijo škode

vetrolomov začelo uporabljati šele v zadnjih dveh desetletjih, raziskave pa so pokazale na zanesljivost in uporabnost tovrstnih metod.

Ker smo menili, da površine kot rezultat analize za gozdarsko stroko ne predstavljajo najbolj uporabnega rezultata, smo raziskali še možnosti preračuna rezultatov površin v volumne. Na tem področju se kot osnova za vrednotenje uporabljajo predvsem podatki popisov lesne zaloge. Ta se običajno opravlja terensko z izmero višine in obsega/premera debla drevesa, preko izmerjenih podatkov pa se lahko preračunata volumen in lesna zaloga. Tako popisovanje vzame veliko časa, izvaja pa se vsakih nekaj let po razdeljenih območjih. V tujih raziskavah smo opazili, da velik potencial na tem področju predstavlja lasersko skeniranje [7], s katerim vse omenjene podatke pridobimo posredno iz gostega oblaka točk, pridobljenega s skeniranjem. Ta metoda je zaenkrat še zelo redko uporabljena, saj je strošek zajema visok, prav tako pa se operira z veliko količino podatkov in posledično zahtevno obdelavo.

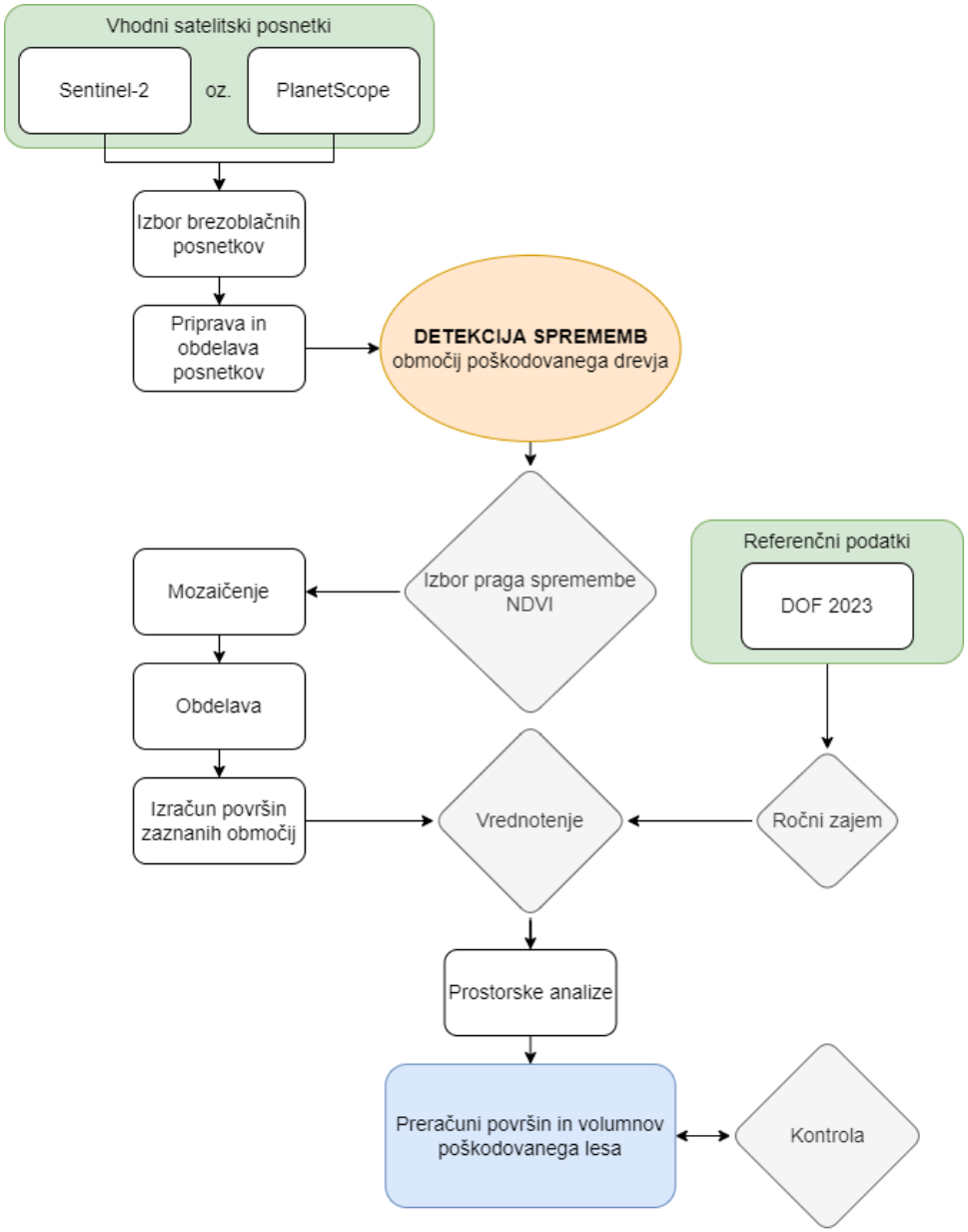
2 Metode dela in potek raziskave

Eksperimentalno delo smo izvajali v licenčnem programu ArcGIS Pro (v. 3.0.0) v kombinaciji z odprtokodnim programom QGIS (v. 3.26.3). V programu ArcGIS Pro smo izvedli postopek detekcije sprememb z vtičnikom Change detection [9], nadaljnje analize in izračuni pa so izvedeni v programu QGIS.

2.1 Potek eksperimentalnega dela

Eksperimentalno delo je potekalo v več korakih, ki so prikazani na sliki 1. Začeli smo s pregledom dostopnih optičnih satelitskih posnetkov. V tem koraku smo se spopadli z največjim izzivom, saj smo ugotovili, da se zaradi razgibanosti reliefa na območju pogosto zadržujejo oblaki, kar otežuje pridobitev primernih optičnih satelitskih posnetkov. Ker smo želeli doseči čim boljše rezultate, smo se odločili za mozaičenje več satelitskih posnetkov zajetih v različnih dneh, s čimer smo odstranili oblačnost in druge šume posnetkov. Izbrane posnetke smo prenesli in naredili predobdelavo (izdelava kompozitov, optični popravki itd.). Sledila je detekcija sprememb z empirično določenim pragom vrednosti NDVI, ki kaže na spremembo iz posnetkov pred in po dogodku. Dobljene rastrske sloje posnetkov S2 in PS smo posamezno mozaičili in dobljena rastra pretvorili v vektorska sloja zaznanih sprememb. Na podlagi vektorskih slojev smo izračunali površine zaznanih območij podrtega drevja in jih primerjali s površinami, ki smo jih ročno zajeli iz DOF-a 2023.

Po uspešni analizi poškodovanih površin smo se lotili iskanja načina, kako iz podatkov o površinah podrtih dreves pridobimo podatke o volumnih poškodovanega drevja na zaznanih območjih. V preračun smo vključili podatke o zaznanih površinah podrtega drevja na čistih smrekovih sestojih, kjer ima vsak sestoj izraženo povprečno lesno zalogo v m^3/ha. Volumne smo preračunali glede na zemljiške parcele, ki predstavljajo enolično, homogeno enoto za medsebojno primerjavo s podatki odločb o obsegu sanitarne sečnje na zemljiških parcelah po vetrolomu.



Slika 1: Shematski prikaz postopka za detekcijo, analizo in ovrednotenje škode vetroloma.

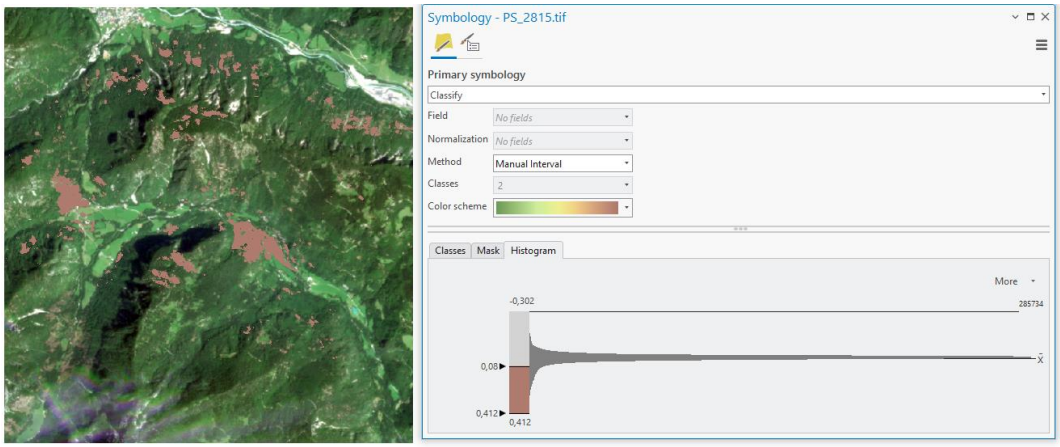
2.2 Detekcija sprememb glede na spremembo vrednosti indeksa NDVI

Spremembe na gozdnih zemljiščih smo zaznavali glede na spreminjanje vrednosti indeksa NDVI. V koraku detekcije sprememb smo določili, da se na podlagi vrednosti indeksa za posnetek pred in po vetrolomu izračuna sprememba vrednosti, ki se zapiše v nov raster. NDVI se izračuna se po enačbi 1 (Tucker 1979; Rouse et al. 1973).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

(NIR -bližnji infrardeči spektralni pas, RED – rdeči spektralni pas)

V tem koraku smo empirično določili prag (*angl. threshold*), ki določa mejno vrednost spremembe indeksa (Δ NDVI). Slednja pove, kaj na posnetku je in kaj ni sprememba (po vetrolomu). Pri določanju praga smo si pomagali s histogramom rastrskega posnetka sprememb in primerjavo zaznanih območij z detekcijo sprememb ter ročno zaznanih območij na ortofotu (slika 2). Prag detekcije vetroloma je predstavljala Δ NDVI med 0,05 in 0,1.



Slika 2: Določanje praga spremembe vrednosti NDVI s pomočjo histograma.

Po analizi obsega zaznanih območij smo posamezno mozaičili posnetke S2 oz. PS. Rastrske podatke smo vektorizirali in raztopili meje zaznanih območij, da je bilo s podatki lažje operirati. Sledile so prostorske analize.

2.3 Koncept preračuna volumna iz zaznane površine

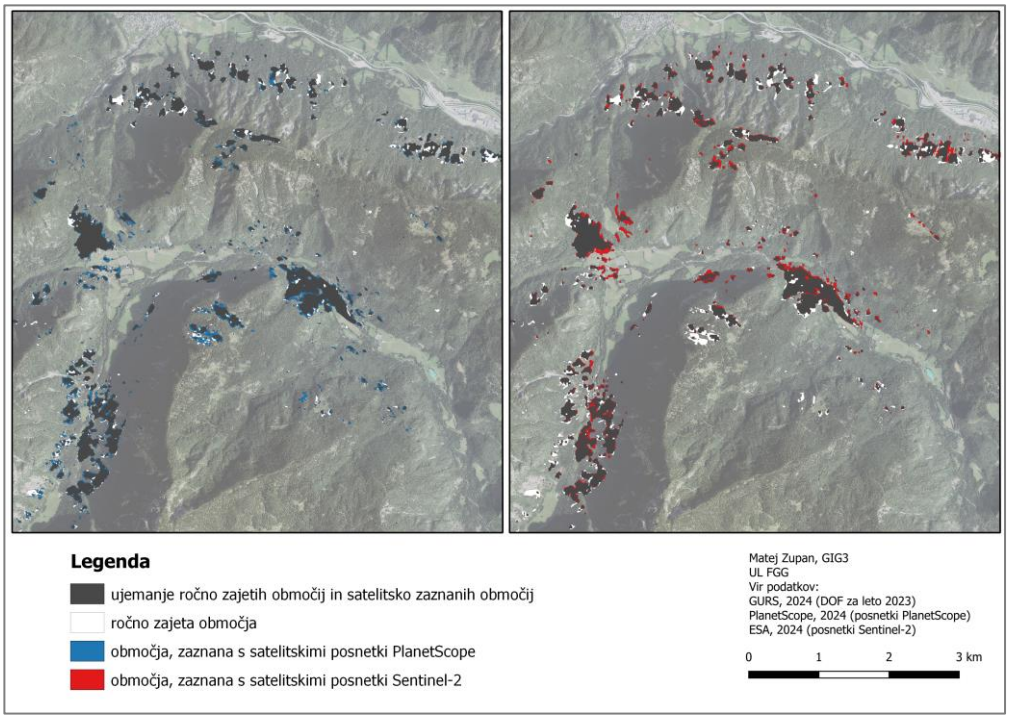
Med raziskavo smo razvili koncept preračuna zaznanih površin podrtega drevja na homogenih smrekovih sestojih v volumen lesa. To smo dosegli s preseki slojev zaznanih območij, gozdnih sestojev ter zemljiških parcel. Volumen smo preračunali po enačbi 2.

$$volumen\ lesa\ [m^3] = \ površina\ [ha] \cdot lesna\ zaloga\ \left[\frac{m^3}{ha}\right] \qquad (2)$$

Preračunane volumne smo primerjali s podatki odločb sanitarne sečnje po vetrolomu.

3 Rezultati

Prvi rezultat so predstavljale površine zaznanih območij podrtega drevja. S posnetki S2 smo zaznali vetrolom v obsegu 226,2 ha, s posnetki PS pa 226,3 ha. Primerjali smo prostorsko (slika 3) in numerično ujemanje površin z referenčnimi podatki iz posnetka DOF (tabela 1). Iz slike 3 je razvidno, da se podatki na večjem delu študijskega območja ujemajo. Z zelo visokoločljivimi posnetki PS s prostorsko ločljivostjo 3 m, smo na območju zaznali tudi nekatera prizadeta območja, ki jih nismo zaznali s posnetki S2 in ročnim zajemom referenčnih podatkov na ortofotu. S posnetki S2 smo zaradi nekoliko nižje prostorske ločljivosti (10 m) zaznali širši rob prizadetih območij.



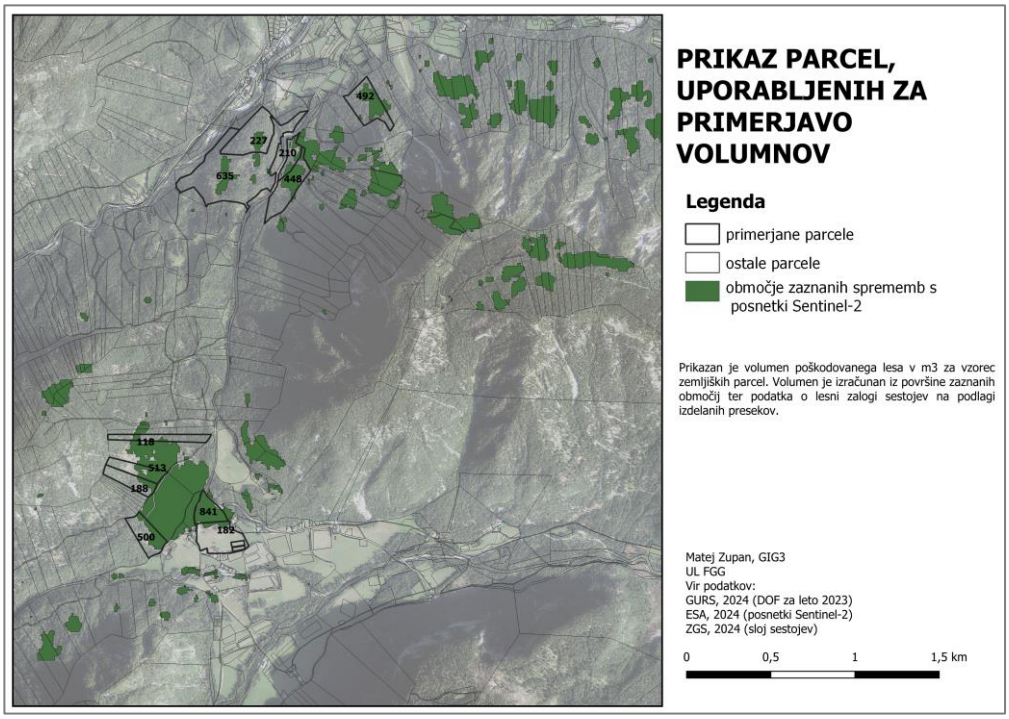
Slika 3: Prikaz ujemanja zaznanih območij poškodovanega drevja z območji, zajetimi na digitalnem ortofotu.

Naredili smo statistiko ujemanja in neujemanja zaznanih površin s posameznimi optičnimi satelitskimi posnetki S2 in PS v primerjavi z referenčnimi površinami, zajetimi iz ortofota. Pod neujemanja spadata precenjenost (delež površin, ki smo jih zaznani s posnetki, vendar jih nismo zajeli na ortofotu) in podcenjenost (delež površin, ki smo jih zajeli na ortofotu, vendar jih nismo zaznali s posnetki). Kot je razvidno iz tabele 1, se zaznane površine z referenčnimi ujemajo v približno 80 %, območja ujemanj z referenčnimi površinami pa se medsebojno ujemajo kar v 95 %, kar kaže na zanesljivost in točnost uporabljene metode.

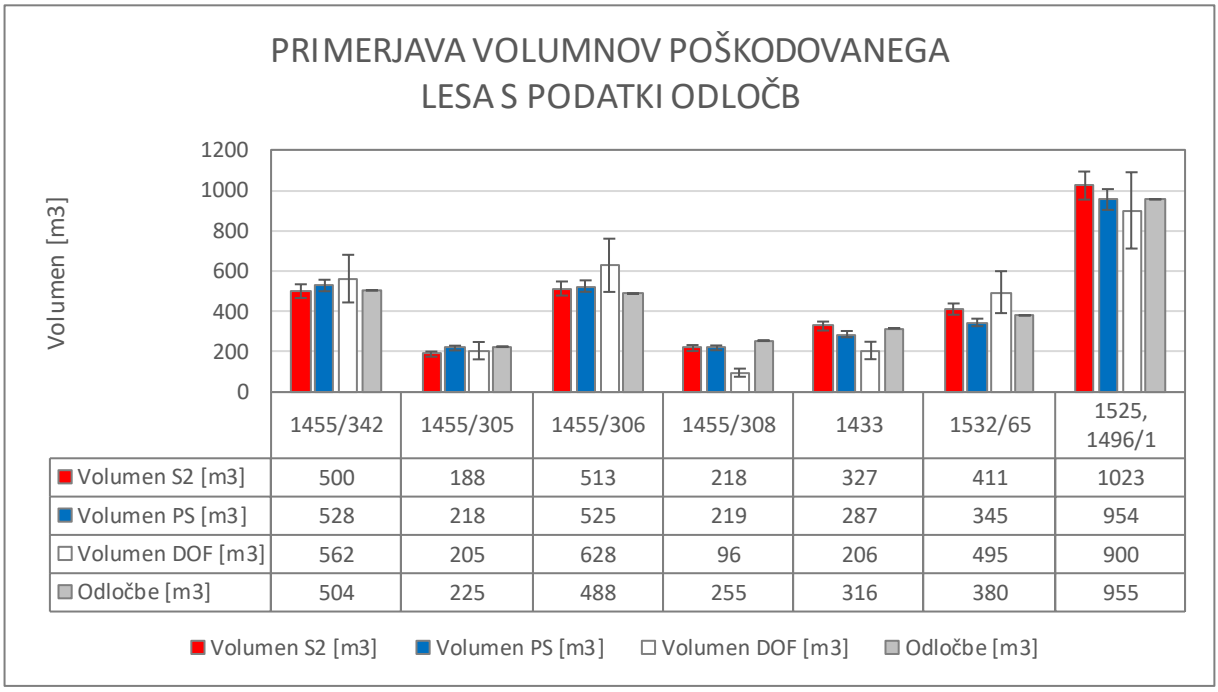
Tabela 1: Numerični prikaz ujemanja zaznanih površin.

Podatek	**Sentinel-2**	**PlanetScope**
Referenčna površina ortofoto [ha]	252,5	252,5
Zaznana površina [ha]	226,2	226,3
Ujemanje [ha]	174,7	183,1
Ujemanje [%]	**77,2**	**80,9**
Precenjenost [%]	22,8	19,1
Podcenjenost [%]	30,8	27,5
Ujemanje S2-PS [ha]	174,5	

Podoben trend ujemanja je razviden iz primerjave preračunanih volumnov s podatki o obsegu sanitarne sečnje po vetrolomu (slika 4 in graf 1). Primerjali smo vzorec parcel s homogenimi smrekovimi sestoji, kjer je bila sanitarna sečnja že v celoti zaključena. Za podatke DOF smo preračunali, da je poškodovanega lesa za približno 80.000 m^3, za S2 približno 69.000 m^3 in za PS 72.000 m^3, kar se dobro ujema s prvimi uradnimi ocenami škode [2].



Slika 4: Prikaz parcel, ki smo jih uporabili za primerjavo preračunanih volumnov s podatki o obsegu sanitarnega spravila lesa.



	1455/342	1455/305	1455/306	1455/308	1433	1532/65	1525, 1496/1
Volumen S2 [m3]	500	188	513	218	327	411	1023
Volumen PS [m3]	528	218	525	219	287	345	954
Volumen DOF [m3]	562	205	628	96	206	495	900
Odločbe [m3]	504	225	488	255	316	380	955

Graf 1: Numerična primerjava preračunanih volumnov s podatki odločb.

Iz grafa 1 je razvidno, da se preračunani volumni v veliki meri ujemajo s podatki odločb. Povprečno odstopanje volumnov, preračunanih iz posnetkov S2, je 7 %, za posnetke PS pa 5 %. Do večjih odstopanj pride v primeru, ko so poškodovana posamezna drevesa znotraj gozdov, kar je težje zaznati iz satelitskih posnetkov. Izziv predstavlja tudi časovna zastarelost podatkov

terenskega popisa gozdnih sestojev, katerega cikel je deset let. V tem obdobju se lahko na istem območju marsikaj spremeni (npr. posledica sečnje zaradi prisotnosti lubadarja), kar vpliva na dejanski podatek o lesni zalogi. Vpliv spremembe lahko zmanjšamo z upoštevanjem podatkov evidentiranih sanitarnih sečenj v ustreznem časovnem obdobju.

4 Zaključki

Na podlagi analiz smo ugotovili, da je metoda, izdelana na podlagi obdelave optičnih satelitskih posnetkov, zanesljiva, ugodna, točna in predvsem hitra za pridobitev prve ocene škode po vetrolomu. Dokazali smo, da je metodo detekcije sprememb z uporabo optičnih satelitskih posnetkov možno uporabiti tudi za zahtevnejša območja z razgibanim reliefom in pogosto prisotnostjo oblakov in hkrati doseči zelo dobre rezultate. Delež ujemanja zaznanih površin z referenčnimi območji je za zelo visokoločljive posnetke PS 4 % višji kot za visokoločljive posnetke S2. Možno je zaključiti, da so posnetki obeh satelitskih sistemov uporabni in prinašajo primerljive rezultate, prednost posnetkov PS je predvsem v časovni ločljivosti, saj imamo v istem časovnem obdobju na voljo več posnetkov, kot jih ponuja S2. Numerični rezultati analiz so primerljivi z rezultati obstoječih študij kljub neidealnosti našega študijskega območja. Razvit koncept za preračun volumnov podrtega lesa na homogenih smrekovih sestojih se je izkazal za zanesljivo in točno metodo ocene škode, ki je učinkovita in uporabna za gozdarsko stroko. Postopek smo v veliki meri uspeli avtomatizirati in izpopolniti tako, da glede na vložen čas in delo dobimo optimalne rezultate.

5 Literatura

[1] Zavod za gozdove Slovenije, “Neurje najbolj prizadelo gozdove na Gorenjskem”, 2023.

[2] K. Oštir, Daljinsko zaznavanje, Inštitut za antropološke in prostorske študije ZRC SAZU, 2006.

[3] M. Dalponte, S. Marzini, T. Solano-Correa, G. Tonon, L. Vescovo in D. Gianelle, “Mapping forest windthrows using high spatial resolution multispectral satellite images”, 2020.

[4] F. Wang in Y. J. Xu, “Comparison of remote sensing change detection techniques for assessing hurricane damage to forest”, 2009.

[5] M. Rüetschi, D. Small in L. T. Waser, “Rapid Detection of Windthrows Using Sentinel-1 C-Band SAR Data”, 2019.

[6] C. Chiao, O. Chegwidden in J. Hamman, “Using LiDAR to estimate forest biomass”, 2022.

[7] Agencija RS za kmetijske trge in razvoj podeželja, “Uporaba satelitov v kmetijstvu – NDVI indeks”, 2021.

[8] Esri, “Change detection in ArcGIS Pro”, dostopno na: https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/image-analyst/change-detection-in-arcgis-pro.htm, 2024.

Trajnostni razvoj interneta stvari: analiza ogljičnega odtisa LoRaWAN omrežij na področju Slovenije

Martin Žust, Jernej Hribar

Povzetek

V tem članku analiziramo vpliv različnih parametrov na porabo energije (E) in ogljični odtis (CF) LoRaWAN sistemov v Sloveniji. Upoštevamo parametre, kot so razširitveni faktor (SF), pasovna širina (BW), velikost paketov (PL) in ogljična intenziteta (CI). Naše ugotovitve kažejo, da lahko razumevanje odnosa med temi parametri ter skupno porabo energije in ogljičnim odtisom bistveno pripomore k načrtovanju in postavljanju učinkovitih LoRaWAN omrežij v Sloveniji. Z numerično analizo pokažemo, da so LoRaWAN sistemi na splošno izrazito okolju prijazni in imajo le majhen ogljični odtis.

1 Uvod

Svetovnemu gospodarstvu ne uspeva izpolniti dogovora s Pariškega sporazuma iz leta 2015, ki cilja na ohranjanje temperature pod 1,5°C nad predindustrijsko dobo. Ameriška Agencija za varstvo okolja poroča, da so največji viri ogljičnih izpustov transport, industrija, energetika in kmetijstvo [1]. Ti sektorji uporabljajo telekomunikacijske tehnologije, kot so LoRaWAN, LTE-M, NB-IoT, Sigfox, Weightless ter mnoge druge. Z ustrezno uporabo le teh lahko zmanjšajo svoj vpliv na okolje. Na primer, v transportu brezžične tehnologije omogočajo sledenje vozilom in optimizacijo poti za zmanjšanje porabe goriva, v kmetijstvu pa spremljanje vlažnosti tal in vremenskih razmer za bolj učinkovito rabo virov. Telekomunikacijski sistemi sicer zmanjšajo ogljični odtis aplikacij z optimizacijo virov in učinkovitostjo, vendar je ogljični odtis samih telekomunikacijskih sistemov redko upoštevan ali določen. V tem članku analiziramo ta vpliv na primeru enega senzorja v LoRaWAN omrežju, če bi bil napajan iz slovenskega elektrodistribucijskega omrežja.

LoRaWAN brezžični protokol je energetsko učinkovit in podpira prilagodljive hitrosti prenosa podatkov, kar ga naredi idealnega za pametno kmetijstvo in industrijo prihodnosti [2]. LoRaWAN omogoča komunikacijo na dolge razdalje z nizko porabo energije ter povezavo številnih naprav v istem omrežju, kar ga naredi primernega za uporabo v pametnih mestih, kmetijstvu, industriji in drugih sektorjih. Kljub prednostim ima LoRaWAN svoje omejitve, opisane v [3], zaradi česar je pomembno razumeti parametre, kot so energijska poraba in življenjska doba [4],

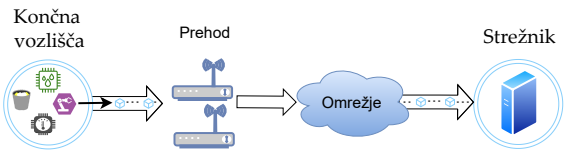
za določitev ogljičnega odtisa. Naš prispevek združuje razumevanje LoRaWAN sistema in znanje o ogljičnem odtisu, predstavljeno v [5].
V tem članku analiziramo vpliv različnih parametrov LoRaWAN omrežja na porabljeno energijo (E) in ogljični odtis (CF), saj tudi sama LoRaWAN omrežja porabljajo energijo, čeprav pogosto zmanjšujejo skupni vpliv na okolje. Z obravnavo arhitekture LoRaWAN omrežij in formule za izračun porabljene energije v poglavju 2 ter predstavitvijo koncepta ogljičnega odtisa in njegovega izračuna, bomo pridobili potrebno osnovo za numerične analize, ki nam bodo omogočile preučiti možnosti za minimiziranje porabe energije. Naša analiza vključuje preučevanje ogljičnega odtisa (CF) glede na velikost paketov (PL) pri različnih razširitvenih faktorjih (SF) in pasovnih širinah (BW), ter oceno največjega števila paketov (N), ki jih lahko v določenem mesecu pošljemo brez prekoračitve določene zgornje meje ogljičnega odtisa (CF_{max}).

2 Model sistema

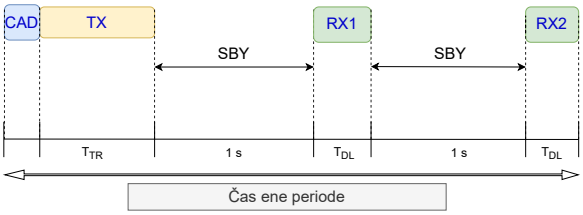
2.1 Arhitektura LoRaWAN sistema

LoRaWAN arhitektura, prikazana na sliki 1, je zgrajena iz končnih vozlišč, prehodov, omrežja in strežnikov. Topologija LoRaWAN sistema je oblikovana v obliki zvezda-zvezda, kar pomeni, da je na vsak prehod vezano večje število končnih vozlišč, na vsak strežnik pa večje število prehodov. Končna vozlišča so običajno naprave, kot so senzorji in aktuatorji. Prehod zbira posodobitvene pakete, tipično iz velikega števila (lahko tudi več sto) končnih vozlišč, in jih posreduje naprej v omrežje. Posodobitveni paketi, npr. meritve ki jih opravljajo senzorji, se skozi omrežje posredujejo do strežnika, ki na koncu obdeluje pakete.
V tem članku se omejimo na LoRaWAN razreda A s stalno napetostjo $U = 3,3\ V$[1]. Naprave, ki uporabljajo razred A, so energijsko najbolj učinkovite, vendar so primerne le za aplikacije, ki večinoma le oddajajo pakete in jih ne sprejemajo. Komunikacija v LoRaWAN omrežjih poteka na dveh nivojih. Med senzorji oziroma končnimi vozišči in prehodi je ustvarjena brezžična povezava. Preko te povezave si končno vozlišče in prehod izmenjujeta informacije v obeh smereh. Prehod je nato povezan na žično omrežje, ki vodi do strežnika. V tem članku se omejimo zgolj na povezavo med senzorjem in prehodom, podobno kot avtorji v [4].
Poglejmo si sedaj, kaj se skozi čas dogaja na povezavi med senzorjem in prehodom iz perspektive senzorja, ki je naprava razreda A. Ta dinamika pa je prikazana tudi na sliki 2. Pred oddajo paketa se naprava postavi v stanje preverjanja kanala CAD (angl. *channel activity detection*). V tem stanju naprava preveri ali je povezava do prehoda prosta in lahko preko nje pošlje paket.

[1]Senzorje in aktuatorje v LoRaWAN tehnologiji delimo na tri tipe: naprave razreda A, B in C. Vse naprave morajo imeti implementirane lastnosti naprav razreda A, medtem ko sta razreda B in C zgolj razširitev osnovnih funkcij razreda A. Na primer, naprave, ki pogosto prejemajo pakete s strani prehoda ali izvajajo funkcijo aktuatorja, ki opravlja določene naloge v prostoru, so tipično naprave razreda B ali C.



Slika 1: Arhitektura LoRaWAN omrežja



Slika 2: Časovnica ene periode

Čas, ki ga naprava preživi v stanju CAD, je odvisen od razširitvenega faktorja SF. SF je parameter sistema, ki zavzame celoštevilske vrednosti v množici $\{7, 8, 9, 10, 11, 12\}$. T_{CAD} je vse večji z naraščanjem SF. Točne vrednosti najdemo v [4].
Če je povezava prosta, v naslednjem koraku naprava v času T_{TR} pošlje paket proti prehodu. To stanje imenujemo stanje prenosa paketa, ki ga označimo s TX. Čas T_{TR} je odvisen od parametrov omrežja, njegova tipična vrednost pa je nekje $200ms$. Njegovo vrednost lahko izračunamo tudi s pomočjo spletnega kalkulatorja [6]. Čas T_{TR} podrobneje obravanavamo v razdelku 2.2. Ko je prenos paketa do prehoda zaključen, naprava odpre dve kratki časovni okni $RX1$ in $RX2$ za prejem posodobitvenih paketov iz strani prehoda, kjer vsak od njiju traja $T_{DL} = 50ms$ časa. Po uspešnem prenosu paketa do prehoda in prvim časom za prejem paketa iz strani prehoda imamo dva časovna okna ene sekunde, ki ju označimo s $SBY1$ in $SBY2$, ko sistem miruje. S koncem drugega od obeh časovnih oken za prejem paketov iz strani prehoda $RX2$, se naprava vrne v stanje preverjanja kanala CAD in cikel se ponovi.

2.2 Poraba energije

LoRaWAN tehnologija sicer na eni relaciji med senzorjem in prehodom porabi izredno malo energije, vendar je tipično na en prehod vezano ogromno senzorjev, kar hitro poveča skupno porabljeno energijo, hkrati pa tudi ogljični odtis. Zato je ključnega pomena natančno poznati vpliv različnih parametrov LoRaWAN sistema, kot so razširitveni faktor SF, pasovna širina BW, velikost paketov PL in moč delovanja naprave ob prenosu P_{TX}, na končno porabljeno energijo E in ogljični odtis CF.
Analizirali bomo porabo energije senzorja za prenos paketa od senzorja, ki je razreda A, do prehoda. Za izračun energije potrebujemo dolžino časovnih intervalov in energijski tok v napravi, ko je ta v določenem stanju. Napetost pa je, kot že omenjeno, konstantno $3,3V$. Ta stanja so, kot smo pojasnili v podrazdelku 2.1 stanje preverjanja kanala CAD, stanje pošiljanja paketa TX, stanje pripravljenosti SBY in stanje prejemanja paketa iz strani prehoda RX.
Uvedimo formulo za čas prenosa paketa do prehoda T_{TR} upoštevajoč članek [4]. T_{TR} je odvisen od časa simbola, ki se izračuna po formuli:

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \tag{1}$$

V formuli za čas simbola T_s nastopata konstanti SF in BW. SF imenujemo razširitveni faktor (angl. *spreading factor*), ki lahko zavzame vrednosti v množici $\{7, 8, 9, 10, 11, 12\}$. BW pa imenujemo pasovna širina (angl. *bandwidth*). Pasovna širina lahko zavzame vrednosti 125 kHz, 250 kHz ali 500 kHz. S pomočjo časa simbola T_s čas pošiljanja paketa proti prehodu T_{TR} nato izračunamo po formuli:

$$T_{TR} = (n_{pr} + 4,25 + n_{PL}) \cdot T_s \tag{2}$$

Pri tem je n_{pr} uvodno programirano število simbolov, n_{PL} pa predstavlja število simbolov v podatkovnem delu. Slednjega se izračuna po formuli $n_{PL} = 8 + \max\left(\left\lceil \frac{8 \cdot PL - 4 \cdot SF + 28 + 16}{4 \cdot (SF - 2 \cdot DE)} \right\rceil \cdot 7, 0\right)$, kjer je PL velikost paketov, DE pa indeks, ki je enak 0 za SF enak 7, 8, 9 in 10 ter 1 za SF enak 11 in 12. Za izračun časa T_{TR} pa obstaja tudi spletni kalkulator [6].
Električni tok, ki teče v napravi v času pošiljanja paketa, je I_{TX} in je odvisen od moči prenašanja paketa P_{TX}, ki tipično zavzame vrednosti $7dBm$, $13dBm$, $17dBm$ ali $20dBm$. Vrednosti I_{TX} v odvisnosti od P_{TX} so prikazane v tabeli 1.

Tabela 1: I_{TX} v odvisnosti od P_{TX}.

$P_{TX}(dBm)$	7	13	17	20
$I_{TX}(mA)$	18	28	90	125

Čas T_{CAD}, ki ga naprava preživi v stanju preverjanja kanala CAD, je odvisen od razširitvenega faktorja, kot smo omenili že v razdelku 2.1 (za natančnejše vrednosti glej [4]). Tok pa, ki teče v napravi v času, ko je paket v stanju preverjanja aktivnosti kanala CAD, je $I_{CAD} = 8mA$. Po uvedbi teh parametrov lahko energijo porabljeno za pošiljanje paketa proti prehodu izračunamo po formuli:

$$E_{TX} = U \cdot \left(T_{CAD} \cdot I_{CAD} + T_{TR} \cdot I_{TX}\right)$$

Podobno izpelejmo energijo porabljeno v drugi fazi, ko želimo prenesti sporočilo v obratni smeri. Energija porabljena v stanju mirovanja SBY se izračuna po formuli $E_{SBY} = 2 \cdot U \cdot I_{SBY}$, kjer $I_{SBY} = 1,4mA$ predstavlja tok, ki teče v napravi v tem času, število 2 pa imamo zaradi tega, ker stanji mirovanja skupaj trajata 2 sekundi.
Nadalje je naprava še dvakrat v fazi RX, ko je odprta za sprejem paketov. Čas, ki ga naprava preživi v stanju RX je $2 \cdot T_{DL} = 100ms$. V tem času v napravi teče tok $I_{RX} = 10,8mA$. Tako je energijski prispevek naprave v stanju RX enak $E_{RX} = U \cdot (2 \cdot T_{DL} \cdot I_{RX})$.
Skupno energijo porabljeno v napravi razreda A v eni časovni periodi (angl. *frame*) označimo z E_f in jo iz vseh prejšnjih ugotovitev izračunamo po formuli:

$$E_f = E_{TX} + U \cdot (2I_{SBY} + 2T_{DL}I_{RX}) = U \cdot (T_{CAD}I_{CAD} + T_{TR}I_{TX} + 2I_{SBY} + 2T_{DL}I_{RX}) \tag{3}$$

Zgornjo formulo lahko poenostavimo tako, da vanjo vstavimo vse fiksne vrednosti, ki niso odvisne od parametrov sistema. Tako lahko dobimo boljši pregled nad formulo. Poenostavitev se izraža sledeče:

$$E_f = 3,3V \cdot (T_{CAD} \cdot 8mA + T_{TR} \cdot I_{TX}) + 12,8mJ \tag{4}$$

Celotno porabljeno energijo v senzorju, ki je naprava razreda A, označimo z E in je enaka produktu števila period N in energije porabljene v eni časovni periodi E_f, torej $E = N \cdot E_f$.

2.3 Ogljični odtis

Ogljični odtis CF telekomunikacijskega sistema je merjen v gCO_2eq. Torej nekako merimo maso ogljikovega dioksida, ki ga proizvedemo (več v [5]). Ogljični odtis je neposredno odvisen od porabljene energije E, ki smo jo definirali v prejšnjem podrazdelku. Porabljena energija v sistemu skozi čas raste, saj se število poslanih paketov N skozi čas veča. Zato lahko uvedemo funkcijo $E(t)$, ki predstavlja porabljeno energijo do časa t. Odvod te funkcije $E'(t)$ imenujemo moč $P(t)$.
Drugi faktor, ki prispeva k ogljičnemu odtisu pa je funkcija ogljične intenzitete $CI(t)$. Ta nam pove, kako ogljično intenzivna je energija, ki jo uporabljamo ob času t, t.j. kakšen je ogljični odtis, če porabimo $1kWh$ energije. Tako je enota za ogljično intenziteto CI enaka $\frac{gCO_2eq}{kWh}$. Ogljična intenziteta se spreminja glede na to, kakšen energijski vir uporabljamo. Kateri energijski viri imajo visoko in kateri nizko ogljično intenziteto, si lahko pogledamo v članku [5]. Po tem, ko imamo definirano ogljično intenziteto $CI(t)$, lahko definiramo ogljični odtis sistema do časa t, $CF(t)$, kot:

$$CF(t) = \int_0^t P(t) \cdot CI(t)dt \tag{5}$$

V primeru, da je ogljična intenziteta $CI(t)$ na nekem časovnem intervalu $[0, \tau]$ konstantna, torej $CI(t) = CI$, se formula za izračun ogljičnega odtisa $CF(t)$ poenostavi v:

$$CF(t) = CI \int_0^t P(t)dt = CI \cdot E(t), \tag{6}$$

pri čemer je $E(t)$ energija porabljena do časa t. V razdelku 2.2 je predstavljena energijska poraba v senzorju, ki ga opazujemo. V nadaljevanju članka predpostavimo, da je ogljična intenziteta kontantna na nekem časovnem intervalu (leto, mesec ipd.). Tako lahko za izračun ogljičnega odtisa CF uporabimo kar formulo 6, kar bomo storili v naslednjem razdelku 3.

3 Numerični rezultati

3.1 Analiza ogljičnega odtisa pri različnih SF, BW in P_{TX}

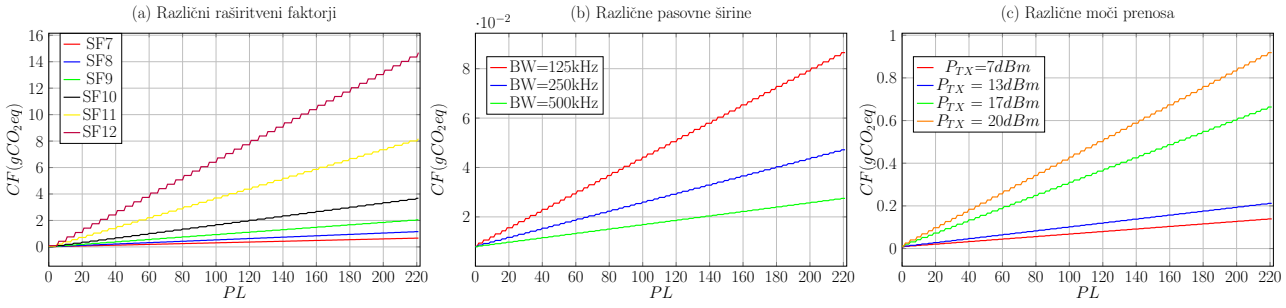
V tem podrazdelku obravnavamo ogljični odtis v LoRaWAN napravi razreda A za posamezne razširitvne faktorje SF in pasovne širine BW. Vemo, da razširitveni faktorji SF zavzamejo vrednosti v množici {7, 8, 9, 10, 11, 12} in pasovne širine BW v množici {125 kHz, 250 kHz, 500 kHz}. V vseh treh naslednjih analizah je ogljični odtis izračunan za 8760 prenosov paketov, kar je enako približno 30 dnem, ko je naprava polno obremenjena, kar pomeni, da je aktivna 1% časa. Po drugi strani pa število 8760 enako številu ur v letu s 365 dnevi. To pomeni, da v naslednjih treh simulacijah računamo ogljični odtis naprave v enem letu, če odda en paket vsako uro. Hkrati v računu uporabimo povprečno ogljično intenziteto CI v Sloveniji v letih 2021, 2022 in 2023. Ta je bila enaka $250,10 \frac{gCO_2eq}{kWh}$.

Najprej fiksiramo pasovno širino $BW = 125kHz$. Sedaj bomo pogledali, kako se glede na velikost prenašanih paketov PL spreminja porabljena energija. To bomo storili za vsak razširitveni faktor SF posebej in vse izrisali v en graf. Rezultat te analize je prikazan na sliki 3(a).

Iz slike 3(a) vidimo, da je ogljični odtis približno linearno odvisen od velikosti paketov, ki jih prenašamo. Graf sicer ni ravna premica ampak zelo gosta stopnjičasta krivulja. Razlog za to se skriva v tem, da v formuli za porabljeno energijo nastopa funkcija zaokroževanja navzgor. Tako imamo za vsak naslednji za ena večji n_{PL} novo stopnico. Poleg trenda približno linearne rasti ogljičnega odtisa glede na velikost paketov iz slike 3(a) opazimo tudi razlike v ogljičnem odtisu med posameznimi razširitvenimi faktorji SF. Večji kot je razširitveni faktor bolj strma je stopnjičasta krivulja.

Sedaj naredimo še drugo analizo, kjer fiksiramo razširitveni faktor $SF = 7$. Spet nas zanima, kako se spreminja ogljični odtis CF glede na velikosti paketov PL, ki jih prenašamo. To opazovanje naredimo za vse tri pasovne širine BW, torej 125 kHz, 250 kHz in 500 kHz. Dobimo rezulate, ki so prikazani na sliki 3(b).

V razdelku 2 smo spoznali, kako na porabljeno energijo vpliva moč delovanja naprave pri prenašanju paketov proti prehodu. To moč označimo z P_{TX}. Videli smo, da vpliva na tok, ki teče v napravi v času prenašanja paketov I_{TX}. Številska odvisnost je prikazana v tabeli 1. V



Slika 3: Analiza ogljičnega odtisa

tem podrazdelku pa si bomo pogledali, kakšne grafe porabljene energije v odvisnsoti od velikosti paketov dobimo pri različnih P_{TX}. Za P_{TX} vzamemo vse štiri možne vrednosti, torej $7dBm$, $13dBm$, $17dBm$ in $20dBm$. Za vsako od teh vrednosti narišemo svoj graf porabljene energije v odvisnsoti od velikosti paketov. V vseh štirih primerih vzamemo SF enak 7 in BW enak $125kHz$. Vsi štirje grafi so v istem koordinatnem sistemu prikazani na sliki 3(c).

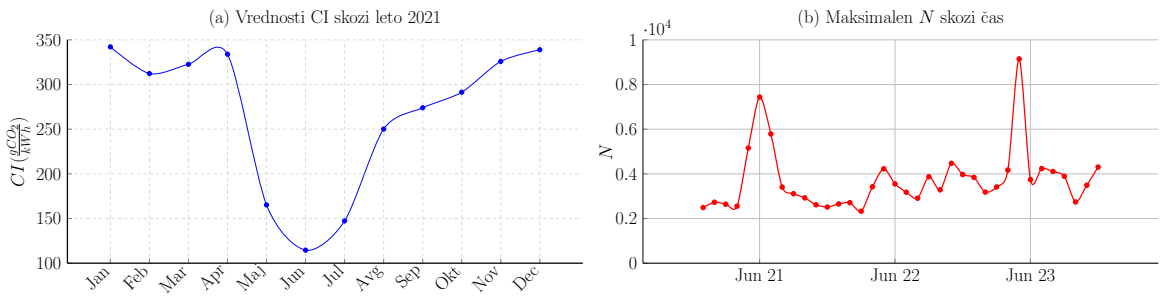
3.2 Število paketov N glede na maksimalen ogljični odtis CF

Na sliki 4(a) vidimo, kako se je skozi leto 2021 v Sloveniji spreminjala ogljična intenziteta. Podatki o ogljični intenziteti v Sloveniji in drugih območjih so prosto dostopni na spletni strani [7]. S poudarjenimi točkami so označene povprečne vrednosti po posameznih mesecih. Opazimo izrazit padec v zgodnjih poletnih mesecih. Pojav gre verjetno pripisati povečani proizvodnji hidroenergije zaradi povečanja rečnih tokov. Hidroenergija pa spada med energijske vire z nizko ogljično intenzteto (več v članku [5]). Imejmo LoRaWAN sistem z razširitvenim faktorjem SF enakim 7 in pasovno širino BW enako 125 kHz. Senzor prehodu pošilja pakete velikosti 100 bajtov. Postavimo zgornjo mejo mesečnega ogljičnega odtisa za ta sistem. To vrednost označimo s $CF_{\max}$ in je enaka $0,121gCO_2eq$. To je pribljižna ocena ogljičnega odtisa enega metra vožnje z avtomobilom.

Za leta 2021, 2022 in 2023 bomo določili, kolikšno število paketov N lahko vsak mesec prenesemo od senzorja do prehoda. Pri tem bomo upoštevali povprečno ogljično intenziteto CI, ki smo jo tisti mesec imeli v Sloveniji (podatke smo dobili na [7]). Rezultati so prikazani na sliki 4(b).

Slika 4(b) prikazuje, kolikšno je maksimalno število paketov, ki jih lahko posamezni mesec v letih 2021, 2022 in 2023 pošljemo od senzorja do strežnika, da ne presežemo zgornje meje ogljičnega odtisa $0,121gCO_2eq$. Vidimo, da lahko pošljemo nekje med 2000 in 10000 paketi, odvisno od trenutne ogljične intenzitete.

V prejšnjem podrazdelku 3.1 smo omenili, da naprava potrebuje najmanj 35 dni, da prenese 10.000 paketov. Sklepamo lahko torej, da ena sama naprava razreda A v enem mesecu ne more preseči maksimalnega ogljičnega odtisa $CF_{\max}$, kar priča o izredni okoljski prijaznosti LoRaWAN sistemov, posebej če jih pimerjamo z avtomobili.



Slika 4: Analiza maksimalnega števila paketov

4 Zaključki

Ugotovili smo, da je analiza energijske porabe in ogljičnega odtisa v LoRaWAN omrežjih odvisna predvsem od razširitvenega faktorja SF, pasovne širine BW, in velikosti paketov PL. Porabljena energija E in ogljični odtis CF sta približno eksponentno odvisna od SF, medtem ko sta E in BW obratno sorazmerna. Analiza odvisnosti ogljičnega odtisa CF od velikosti paketov PL za različne parametre je pokazala stopničaste krivulje. Prav tako smo ocenili, koliko paketov lahko oddamo mesečno, da ne presežemo ogljičnega odtisa CF_{max}, ki znaša $0,121\ gCO_2eq$.
Rezultati bodo v prihodnje omogočili načrtovalcem LoRaWAN omrežij v Sloveniji izdelavo podrobnejših načrtov glede ogljičnega odtisa CF, ki postaja ključna metrika omrežij prihodnosti. Čeprav je ogljični odtis enega senzorja majhen, lahko veliko število senzorjev in prehodov v omrežju bistveno prispeva k ogljičnemu odtisu, zato je skrbno načrtovanje nujno.

5 Literatura

[1] U.S. Environmental Protection Agency, uradna spletna stran, dostopno na: *https://www.epa.gov/*.

[2] J. de Carvalho Silva, et al.: "LoRaWAN—A Low Power WAN Protocol for Internet of Things: A Review and Opportunities", 2017 2nd International multidisciplinary conference on computer and energy science (SpliTech), IEEE, 2017.

[3] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui, T. Watteyne: "Understanding the limits of LoRaWAN", IEEE Communications magazine, IEEE, 2017

[4] M. Costa, T. Farrell, L. Doyle: "On Energy Efficiency and Lifetime in Low Power Wide Area Network for the Internet of Things.", IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN), IEEE, 2017.

[5] D. Trihinas, et al.: "Towards Energy Consumption and Carbon Footprint Testing for AI-driven IoT Services", 2022 IEEE International Conference on Cloud Engineering (IC2E).

[6] The Things Network, Airtime Calculator, dostopno na: *https://www.thethingsnetwork.org/airtime-calculator*.

[7] Electricity Map, Electricity Map-Slovenia, dostopno na: *https://app.electricitymaps.com/zone/SI*.