

# EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE ODZIVA PIEZOELEKTRIČNIH PRETVARAČA PODVRGNUTIH IMPULSNOJ UZBUDI I PRIJEDLOG KONSTRUKCIJE NOSIVOG MEDICINSKOG UREĐAJA

---

**Barukčić, Andrea**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:190:505000>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-13**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE ODZIVA  
PIEZOELEKTRIČNIH PRETVARAČA PODVRGNUTIH  
IMPULSNOJ UZBUDI I PRIJEDLOG KONSTRUKCIJE  
NOSIVOG MEDICINSKOG UREĐAJA**

Rijeka, ožujak 2024.

Andrea Barukčić

0303069199

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET  
Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE ODZIVA  
PIEZOELEKTRIČNIH PRETVARAČA PODVRGNUTIH  
IMPULSNOJ UZBUDI I PRIJEDLOG KONSTRUKCIJE  
NOSIVOG MEDICINSKOG UREĐAJA**

Mentor: prof. dr. sc. Saša Zelenika

Komentor: dr. sc. Petar Gljušćić

Rijeka, ožujak 2024.

Andrea Barukčić

0303069199

Rijeka, 5. travnja 2023.

Zavod: **Zavod za konstruiranje u strojarstvu**  
Predmet: **Precizne konstrukcije i tehnologija mikrosustava**  
Grana: **2.16.02 mikro i nanotehnologije**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Andrea Barukčić (0303069199)**  
Studij: **Sveučilišni diplomski studij strojarstva**  
Modul: **Konstruiranje i mehatronika**

Zadatak: **Eksperimentalno ispitivanje odziva piezoelektričnih pretvarača podvrgnutih impulsnoj uzbudi i prijedlog konstrukcije nosivog medicinskog uređaja / Experimental study of the response of plucked piezoelectric energy harvesters and proposed design of a weara**

### Opis zadatka:

Na temelju dostupne literature istražiti i opisti stanje tehnike na području prikupljanja i pretvorbe niskorazinske energije iz okoliša (engl. energy harvesting). Posebnu pažnju posvetiti primjeni u nosivim tehnologijama u medicini, s naglaskom na korištenju impulsne uzbude trzanjem slobodnog kraja i mehanizmu pretvorbe frekvencije. Eksperimentalno ispitati više kombinacija optimiziranih parametara trzanja te utvrditi njihov utjecaj na odziv različitih piezoelektričnih pretvarača. Na temelju dobivenih rezultata i dostupne literature, kao i njihove kritičke analize, predložiti konstrukciju nosivog medicinskog uređaja napajanog pomoću jednog ili više piezoelektričnih pretvarača podvrgnutih impulsnoj uzbudi trzanjem, generiranoj pomoću ljudskog gibanja.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.




Zadatak uručen pristupniku: 6. travnja 2023.

Mentor:

  
Prof. dr. sc. Saša Zelenika

  
Dr. sc. Petar Gljuščić (komentor)

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

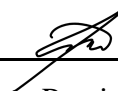
  
Izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

## IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI RADA

Ovaj diplomski rad je izrađen samostalno, koristeći znanja i vještine koje sam stekao tijekom pohađanja studija. U skladu s etičkim načelima, sve korištene izvore sam naveo u popisu literature te sam proveo samostalnu analizu prikupljenih podataka uz stručnu pomoć mentora, komentora i asistenata.

Andrea Barukčić

0303069199



---

Potpis

Rijeka, ožujak 2024.

## ZAHVALA

Želim izraziti duboku zahvalnost svom mentoru prof. dr. sc. Saši Zeleniki na izvanrednoj podršci, strpljenju i vodstvu tijekom cijelog procesa izrade ovog diplomskog rada. Vaše mentorstvo bilo je ključno u oblikovanju mog istraživanja i razvoju mojih vještina.

Također, htio bih se posebno zahvaliti komentoru dr. sc. Petru Gljuščiću na vrijednim sugestijama, pomoći i konstruktivnoj kritici koji su pruženi u ovome radu.

Zahvaljujem obitelji i prijateljima na velikoj podršci tijekom studiranja.

# SADRŽAJ

|  |    |
|--|----|
| 1. UVOD.....   | 1  |
| 2. PRETVORBA NISKORAZINSKE ENERGIJE IZ OKOLIŠA .....   | 2  |
| 2.1. Pretvorba kinetičke energije iz okoliša u električnu energiju.....                            | 2  |
| 2.1.1 Elektromagnetski princip pretvorbe.....  | 3  |
| 2.1.2 Elektrostatski princip pretvorbe.....  | 7  |
| 2.1.3 Triboelektrični princip pretvorbe.....   | 9  |
| 2.2. Pretvorba toplinske energije u električnu energiju iz okoliša.....                            | 10 |
| 2.3. Pretvorba svjetlosne energije u električnu energiju iz okoliša .....                          | 12 |
| 2.4. Pretvorba energije radiovalova u električnu energiju iz okoliša.....                          | 12 |
| 2.5. Usporedba različitih izvora prikupljanja energije iz okoliša .....                            | 13 |
| 2.6. Piezoelektrični princip prikupljanja energije iz okoliša .....                                | 14 |
| 2.6.1 Piezoelektrični učinak i piezoelektrični materijali .....                                    | 15 |
| 2.6.2 Primjena piezoelektričnog principa u piezoelektričnim pretvaračima .....                     | 17 |
| 2.7. Nosive tehnologije u medicini .....   | 19 |
| 3. UREĐAJI ZA PRIKUPLJANJE ENERGIJE POMOĆU ROTACIJSKOG GIBANJA .....                               | 21 |
| 3.1. Uređaji za prikupljanje energije na osnovu njihala .....                                      | 21 |
| 3.2. Prikupljanje energije pomoću elektromagnetskih i triboelektričnih uređaja .....               | 23 |
| 3.2.1. Uređaji za prikupljanje energije korištenjem elektromagneta .....                           | 23 |
| 3.2.2. Triboelektrični elektromagnetski hibridni generator .....                                   | 24 |
| 3.3. Uređaji za prikupljanje energije korištenjem piezoelektričnih konzolnih gredica .....         | 26 |
| 3.3.1. Uređaj za prikupljanje energije pomoću piezoelektrične gredice u dva stabilna položaja..... | 27 |
| 3.3.2. Prikupljanje energije pomoću piezoelektromagnetskog višesmjernog vibracijskog uređaja ..... | 28 |
| 3.4. Vrednovanje opisanih uređaja .....  | 29 |
| 4. EKSPERIMENTALNI POSTAV, ALATI I TEHNOLOGIJA IZRADE.....   | 33 |
| 4.1 Eksperimentalni postav za analizu različitih geometrija trzalica.....                          | 33 |
| 4.1.1 Istosmjerni izvor napajanja .....  | 34 |
| 4.1.2 Istosmjerni elektromotor s reduktorom .....  | 35 |
| 4.1.3 Osciloskop .....   | 36 |
| 4.1.4 Otporna dekada .....   | 37 |
| 4.1.5 Sklop za mehaničko trzanje .....   | 38 |
| 4.1.6 Piezoelektrična konzolna gredica .....   | 39 |
| 4.2 Programski alat Minitab .....  | 41 |
| 4.3 Aditivne tehnologije .....   | 43 |

|   |     |
|---|-----|
| 5. MJERENJE ODZIVA PIEZOELEKTRIČNIH PRETVARAČA PODVRGNUTIH<br>IMPULSNOJ UZBUDI..... | 47  |
| 5.1. Geometrija pravokutne trzalice.....  | 47  |
| 5.2. Ulazni faktori ispitivanja.....  | 48  |
| 5.3. Izrada rotora s trzalicom pomoću 3D tiska.....                                 | 50  |
| 5.4. Mjerenje odziva pomoću eksperimentalnog postava.....                           | 53  |
| 5.5. Obrada rezultata eksperimentalnih mjerenja.....                                | 53  |
| 6. UTJECAJ GEOMETRIJE TRZALICA na GENERIRANU SNAGU PIEZOELEKTRIČNE<br>KONZOLE.....  | 56  |
| 6.1. Utjecaj geometriji trzalice na generiranje snage.....                          | 56  |
| 6.2. Kvadratni regresijski model.....   | 58  |
| 6.3. Optimizacija pomoću rješavača.....   | 60  |
| 7. PRIJEDLOG KONSTRUKCIJE NOSIVOG MEDICINSKOG UREĐAJA.....                          | 64  |
| 8. ZAKLJUČAK.....   | 66  |
| LITERATURA.....   | 68  |
| LISTA SIMBOLA.....  | I   |
| POPIS SLIKA.....  | III |
| POPIS TABLICA.....  | V   |
| SAŽETAK.....  | 69  |
| ABSTRACT.....   | 70  |



# 1. UVOD

U suvremenom društvu, potreba za održivim i ekološki prihvatljivim izvorima energije postaje sve važnija. Kako se globalna svijest o ekološkim izazovima povećava, pritisak na traženje alternativa konvencionalnim izvorima energije, posebice onima koje generiraju značajan negativan utjecaj na okoliš, postaje neizbježan. Među tim izvorima ističu se baterije koje, iako su neophodne za mnoge aspekte modernog života, nose sa sobom određene ekološke izazove koji narušavaju održivost i dugoročnu ravnotežu okoliša. U skladu s time, istraživanje i razvoj tehnologija koje omogućavaju prikupljanje niskorazinske energije iz okoliša postaju ključni aspekti inovacija. Ovaj diplomski rad fokusiran je na pretvorbu različitih oblika energije, poput kinetičke, toplinske, svjetlosne i radiofrekvencijske energije, u električnu energiju s ciljem izrade optimalnih nosivih uređaja koji će pripomoći napajanju medicinskih uređaja.

U prvom dijelu rada analiziraju se različite tehnike pretvorbe kinetičke energije, posebno elektromagnetski i elektrostatski princip. Također, istražuje se pretvorba toplinske, svjetlosne i energije radiovalova, uz usporedbu alternativnih izvora prikupljanja energije iz okoliša. Rad se fokusira na piezoelektrične pretvarače, proučavajući piezoelektrični učinak i materijale te analizirajući piezoelektrične konzolne gredice. Posebna pažnja posvećena je uređajima za prikupljanje energije putem rotacijskog gibanja, uključujući elektromagnetske uređaje i triboelektrične - elektromagnetske hibridne generatore.

U drugom dijelu rada predstavljeni su eksperimentalni postav, alati i tehnologije korišteni za analizu različitih geometrija trzalica piezoelektričnih pretvarača. Opisani su izvor napajanja, osciloskop, otporna dekada i sklop za mehaničko trzanje, uz dodatnu upotrebu Minitab softvera i aditivnih tehnologija. U radu se potom analizira odziv piezoelektričnih pretvarača podvrgnutih impulsnoj uzbuđi te se proučava utjecaj različitih geometrija trzalica na rotoru na generiranu snagu piezoelektričnih konzola korištenjem programskih rješavača i analizom dobivenih podataka.

Konačno, diplomski rad zaključuje s prijedlogom konstrukcije nosivog medicinskog uređaja koji koristi prikupljenu niskorazinsku energiju iz okoliša, što predstavlja primjenu stečenih saznanja u praktičnom inženjerskom kontekstu.

## **2. PRETVORBA NISKORAZINSKE ENERGIJE IZ OKOLIŠA**

Pretvorba niskorazinske energije iz okoliša je proces koji se odnosi na transformaciju raspoložive niske razine energije, poput topline, svjetlosti ili mehaničke energije, u korisnu upotrebljivu energiju. Takva vrsta pretvorbe ima široku primjenu u raznim područjima, uključujući i energetiku, industriju i svakodnevni život o čemu će više riječi biti u nastavku poglavlja.

Raspoloživa niskorazinska energija je često prisutna u našem okolišu u obliku otpadne topline koja se generira u industrijskim procesima ili metabolizmom u živim bićima, kao sunčeva svjetlost koja pada na površinu ili čak u obliku kinetičke energije vjetra, vode ili gibanju živih bića. U većini slučajeva, ta energija ostaje neiskorištenom te se gubi u okolišu [1].

Prikupljanje takve niskorazinske energije i njena pretvorba u korisnu energiju su važni iz različitih razloga. Primarno, to pomaže u povećanju energetske učinkovitosti sustava i smanjenju gubitaka energije. Umjesto da se ta energija jednostavno rasipa ili zagubi, moguće ju je pretvoriti u oblik koji može biti korišten za napajanje različitih uređaja ili procesa. Nadalje, pretvorba niskorazinske energije može biti korisna za održive energetske sustave. Integracija obnovljivih izvora energije kao što su sunčeva svjetlost, vjetar ili geotermalna energija zahtijeva različite načine pretvorbe energije kako bi se ti izvori pretvorili u upotrebljivu električnu energiju. Osim toga, moguće je iskoristiti otpadnu toplinu iz industrijskih procesa za dodatno grijanje ili za proizvodnju električne energije. Postoje različiti načini pretvorbe niskorazinske energije iz okoliša. Najčešći primjeri uključuju termoelektrične pretvarače koji pretvaraju toplinsku energiju u električnu energiju, fotonaponske ćelije koje pretvaraju sunčevu svjetlost u električnu energiju te elektro-mehanički pretvornici koji koriste kinetičku energiju vibracija ili drugih oblika gibanja za proizvodnju električne energije [2].

Uzimajući u obzir važnost energetske učinkovitosti i održivosti, pretvorba niskorazinske energije iz okoliša predstavlja značajno područje istraživanja i razvoja u mikrotehnologiji i nanotehnologiji. Inovacije u ovom području mogu dovesti do smanjenja potrošnje energije, smanjenja emisija stakleničkih plinova i stvaranja održivih izvora energije za buduće generacije. Različite vrste pretvorbe energije opisane se u nastavku ovog poglavlja.

### **2.1. Pretvorba kinetičke energije iz okoliša u električnu energiju**

Kinetička energija je oblik energije koju objekt ili čestica posjeduje zbog svog kretanja. Ako na taj objekt djeluje sila koja obavlja rad, objekt ubrzava i dobiva kinetičku energiju. Prema

tome, kinetička energija je svojstvo objekta ili čestice koja se giba, a koje ne ovisi samo o njenom kretanju, već i o masi objekta. Vrsta kretanja može biti translacija, rotacija oko osi, vibracija ili bilo koja druga kombinacija kretanja [3]. Postoje različiti konvencionalni načini pretvorbe kinetičke energije u električnu energiju, kao što su vjetroturbine i hidroelektrane, ali u svrhu ovog rada obrađeni su samo principi pretvorbe koji se koriste za pretvarače kinetičke energije i pretvarače kretanja (vibracije) tijela.

U nastavku poglavlja opisan će se osnovni principi pretvorbe kinetičke energije u električnu: elektromagnetski, elektrostatski i triboelektrični princip pretvorbe, dok će piezoelektrični princip pretvorbe biti obrađeni zasebno u sljedećem poglavlju kao glavna tema ovoga rada.

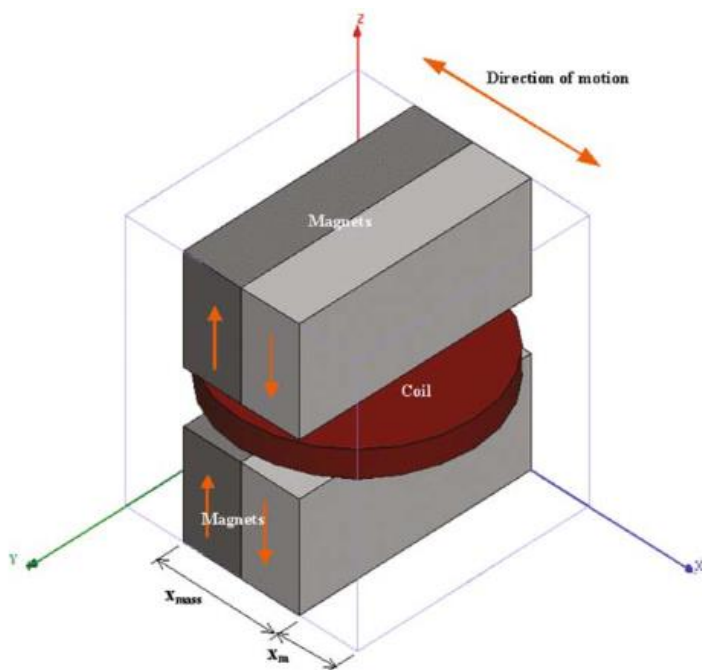
### 2.1.1 Elektromagnetski princip pretvorbe

Michael Faraday 1831. godine objavljuje članak s opisom elektromagnetske indukcije kao procesa stvaranja električne energije u električnom vodiču koji se nalazi unutar magnetskog polja. Takav vodič se obično oblikuje u zavojnicu te se struja generira ili zbog relativnog kretanja magneta i zavojnice ili zbog promjena magnetskog polja. Proizvedena električna energija ovisi o jačini magnetskog polja, brzini relativnog gibanja i broju zavoja zavojnice [4].

Važno je razumjeti kako se snaga generirana vibracijskim generatorima povezuje s njihovom veličinom, posebice kod elektromagnetskih generatora. Kako se generatori smanjuju, snaga koju mogu generirati ograničena je interakcijama između zavojnica i magneta. Vibracijski generator koristi mehaničku energiju koja se stvara kada masa prolazi određenu udaljenost i pri tome djeluje protiv prigušne sile. Kako se smanjuju dimenzije generatora, smanjuje se i masa pokretnog objekta te pomak koji prelazi, što rezultira smanjenjem raspoložive mehaničke energije. Sila prigušenja koja kontrolira kretanje generatora sastoji se od prigušenja uzrokovanog parazitnim silama i elektromagnetskim prigušenjem. Korisna električna energija koju generator može proizvesti ovisi o elektromagnetskom prigušenju, koje pak ovisi o jačini magnetskog polja, broju zavojnica, impedanciji zavojnice i impedanciji opterećenja. Ti čimbenici također ovise o veličini generatora, pa se smanjenjem dimenzija smanjuje jakost magnetskog polja i kvaliteta zavojnica, što može rezultirati smanjenom učinkovitosti proizvodnje električne energije [4, 5].

Kako bi se istražilo na koji način se snaga elektromagnetskog generatora mijenja s veličinom, analizira se primjer generatora prikazanog na Slici 2.1. Generator se sastoji od zavojnice smještene između magneta, pri čemu gornji i donji magneti imaju suprotnu polarizaciju.

Ta suprotna polarizacija stvara gradijent magnetskog polja u zavojnici u smjeru njenog kretanja, koje je ovdje prikazano kao kretanje u smjeru x-osi. Takav elektromagnetski generator može generirati vrlo velike snage s obzirom na minijaturizaciju uređaja [5].



Slika 2.1 Elektromagnetski generator [5]

Zelenika et al. [6] opisuju općenite zakonitosti koje se događaju skaliranjem sustava kod njegove minijaturizacije. Budući da se sustavi ne ponašaju jednako na mikro- i makrorazinama, neka fizikalna svojstva poprimaju potpuno drugačije karakteristike pa skaliraju različitim potencijama. Tako se duljine  $X_0$  skaliraju na manje dimenzije  $X_s$  pomoću faktora skaliranja  $S$ , za kojega vrijedi  $0 \leq S \leq 1$ . Bit će tada:

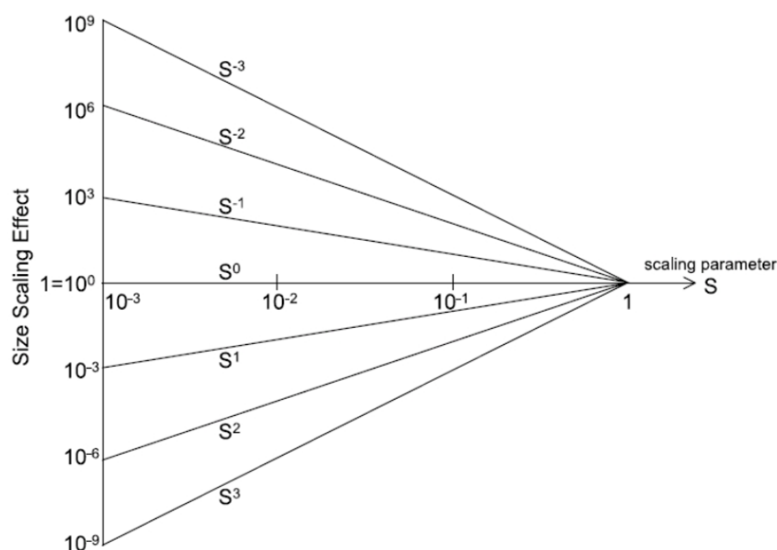
$$X_s = X_0 \cdot S \quad (2.1)$$

dok se za volumen  $V$  i površine  $A$  onda primjenjuje:

$$V_s = V_0 \cdot S^3 \quad (2.2)$$

$$A_s = A_0 \cdot S^2 \quad (2.3)$$

Na Slici 2.2 prikazana je usporedba veličine mjerila  $S$  na skaliranje.

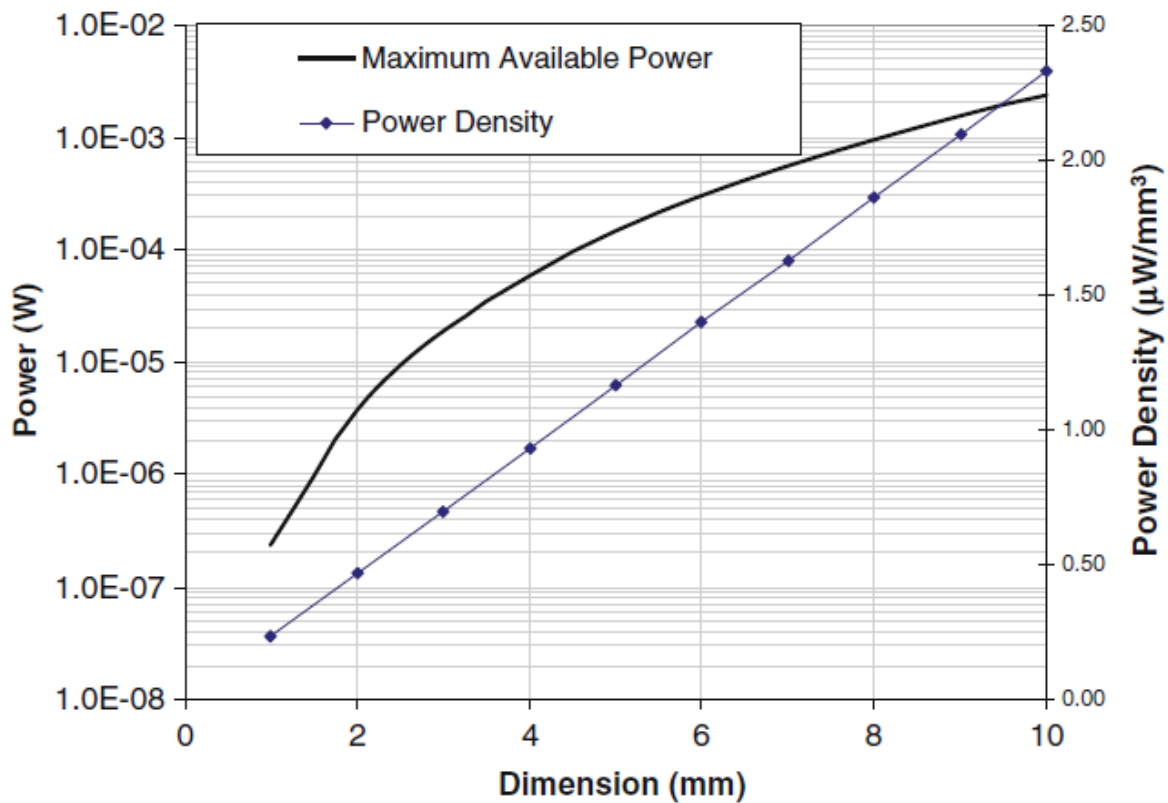


Slika 2.2 Učinak veličine mjerila  $S$  na skaliranje [6]

Uz pretpostavku da promjena induktivnosti po duljini ( $\frac{\partial L}{\partial x}$ ) ne skalira te da je istovremeno protok struje proporcionalan s presjekom vodiča ( $S^2$ ), za sve elektromagnetske sile vrijedit će jednačba 2.4:

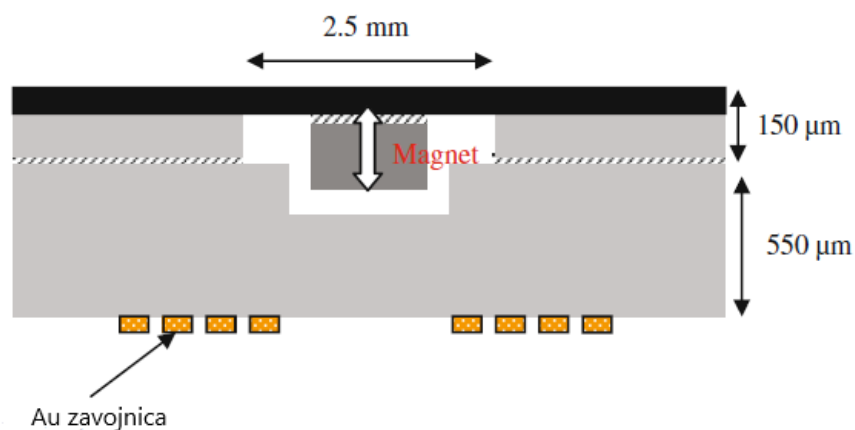
$$F_{\text{mag}} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial x} \propto S^4 \quad (2.4)$$

Stoga, povećanjem dimenzije elektromagnetskog generatora (Slika 2.1) dobiva se manja ukupna raspoloživa snaga generatora kako je to prikazano na Slici 2.3, pri čemu gustoća snage ima linearan porast. Naime, dijagram prikazuje gustoću snage od otprilike 2,3 W/mm<sup>3</sup> (2,3 mW/cm<sup>3</sup>) za uređaj koji zauzima volumen od 1 cm<sup>3</sup>. Treba imati na umu da ova analiza ne uključuje volumen opruge i kućišta, pa će stvarni generatori nužno imati još niže gustoće snage. Također, na grafikonu 2.3 su prikazane maksimalna raspoloživa snaga i gustoća snage u ovisnosti o dimenziji elektromagnetskog generatora pri ubrzanju 9.21 m/s<sup>2</sup> i frekvenciji ubrzanja od 100 Hz [5].



Slika 2.3 Grafički prikaz raspoložive snage i gustoće snage elektromagnetskog pretvornika u ovisnosti o dimenziji [5]

Među ranijim primjera mikroelektromehaničkih sustava (MEMS), odnosno minijaturnih elektromagnetskih generatora, Williams et al. [7] predstavljaju na Sveučilištu u Sheffieldu, u Velikoj Britaniji, 2001. godine poprečni presjek generatora prikazanog na Slici 2.4.



Slika 2.4 Poprečni presjek MEMS elektromagnetskog generatora predloženog 2001. godine [7]

Prikazani generator sastoji se od galijeve arsenida (GaAs) koji predstavlja gornju podlogu (engl. *wafers*), dok se donja podloga sastoji od zavojnice od tankog sloja zlata (Au) načinjene korištenjem postupka podizanja uzorka. Au zavojnica formirana je na međusobnoj udaljenosti od 5  $\mu\text{m}$  i širinom jednog zavoja od 20  $\mu\text{m}$ . Spoj dviju podloga omogućen je srebrnim epoksidom, kako bi se dobio sklop generatora. Princip rada generatora je pomicanje mase vertikalno izvan kućišta, uzrokovano vanjskim vibracijama, stvarajući tako pomak između magneta i zavojnice gdje se inducira magnetsko polje te stvara električna energija. Testirani uređaj je generirao snagu 0,3  $\mu\text{W}$  pri frekvenciji pobude vanjskih vibracija od 4,4 kHz. Izmjerena električna izlazna snaga bila je značajno niža od predviđene vrijednosti na proračunu, što se smatra posljedicom nelinearnih efekata koji proizlaze iz membrane opruge. To ukazuje na pojavu učinka tvrde opruge u kojem rezonantna frekvencija raste s povećanjem amplitude pobude. Međutim, još značajniji faktor je nisko prigušenje elektromagnetskog polja koje drastično smanjuje izlaznu snagu kako je to prikazano na Slici 2.3. Jedan od načina smanjenja prigušenja je približavanjem zavojnice i magneta. Valja tu imati na umu i da će mali broj zavoja zavojnice uvijek ograničavati postizanje visokog napona, dok bi povećanje broja zavoja rezultiralo većim otporom zavojnice i smanjenim elektromagnetskim prigušenjem. Ta pojava ističe ključni izazov u izradi MEMS elektromagnetskih generatora, pogotovo u praksi radi visokog povećanja rezonantne frekvencije i smanjenja izlazne snage zbog elektromagnetskog prigušenja [4, 7].

### 2.1.2 Elektrostatski princip pretvorbe

Osnovni dijelovi elektrostatskog sustava su izvor električne energije i električni kondenzator. Električni kondenzator ima sposobnost pohrane energije u obliku razdvojenog električnog naboja ( $Q$ ). Ta sposobnost kondenzatora naziva se električni kapacitet. Kondenzator se sastoji od dvije usporedne vodljive ploče (elektrode) koje su električno izolirane jedna od druge slojem vakuum, zraka ili nekog drugog izolacijskog materijala. Izvor električne energije (npr. baterija) predaje napon na kondenzatoru stvarajući jednake ali suprotno nabijene naboje na pločama kondenzatora. U MEMS uređajima, razmak između dvije ploče kondenzatora je reda veličine mikrometara ili nanometra, a što je površina ploče veća, to je veći i električni kapacitet [4].

Osnovna jednadžba za električni kapacitet ( $C$ ) dana je u nastavku, gdje električni kapacitet ima mjernu jedinicu farad ( $F$ ) te je razmjernan količini naboja ( $Q$ ) u kulonima ( $C$ ) i obrnuto razmjernan električnom naponu ( $U$ ) izraženog u voltima ( $V$ ) [4]:

$$C = \frac{Q[C]}{U[V]} \quad (2.5)$$

Ukoliko je spoj ploča kondenzatora paralelan, vrijedi jednačba 2.6:

$$C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \quad (2.6)$$

gdje  $\epsilon_0$ , F/m predstavlja dielektričnu permisivnost vakuumu, odnosno fizikalnu veličinu koja opisuje međudjelovanje električnih naboja [8].  $A$ , m<sup>2</sup> je površina ploče dok  $d$ , m predstavlja razmak između ploča kondenzatora.

Ukoliko se povežu jednačbe 2.5 i 2.6, dobiva se izraz za električni napon  $U$ :

$$U = \frac{Qd}{\epsilon_0 A} \quad (2.7)$$

Energija pohranjena u kapacitetu će tada biti izražena jednačbom 2.8:

$$E_{el} = 0,5 Q \cdot U = 0,5 C \cdot U^2 = 0,5 \cdot \frac{Q^2}{C} \quad (2.8)$$

Prikupljanje energije može se ostvariti zbog elektrostatske sile između ploča i utrošenog rada, u ovisnosti o naponu ili naboju koji su u tom trenutku zadržani kao konstantna sila između ploča [4]. Jednačbe preko kojih se određuju spomenute sile i dobiva prikupljanje energije su sljedeće [4]:

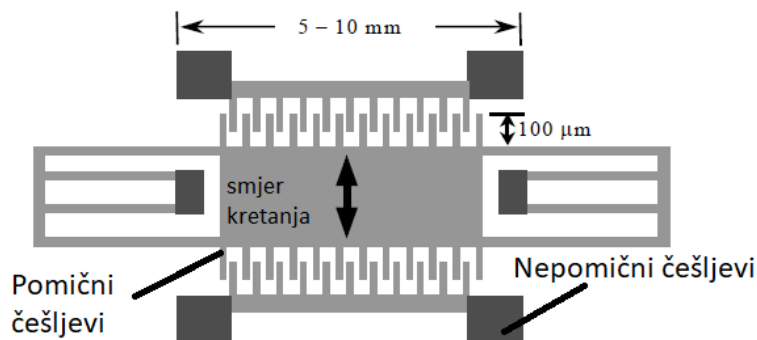
$$F_{ploča} = 0,5 \frac{Q^2 d}{\epsilon A} \quad (2.9)$$

$$F_{ploča} = 0,5 \frac{\epsilon U^2 A}{d^2} \quad (2.10)$$

Ukoliko su razmaci elektroda veći od 10 nm, napon raste linearno s razmakom pa bi za  $d > 10$  nm, skaliranje elektrostatskih sila bilo proporcionalno sa  $S^2$ . Može se primijetiti, stoga, zašto su elektrostatske sile, iako su po amplitudi male, povoljnije od magnetskih sila kada se radi o malim dimenzijama, odnosno MEMS uređajima [6].

Primjer takvog elektrostatskog generatora za prikupljanje niskorazinske energije prikazan na Slici 2.5.





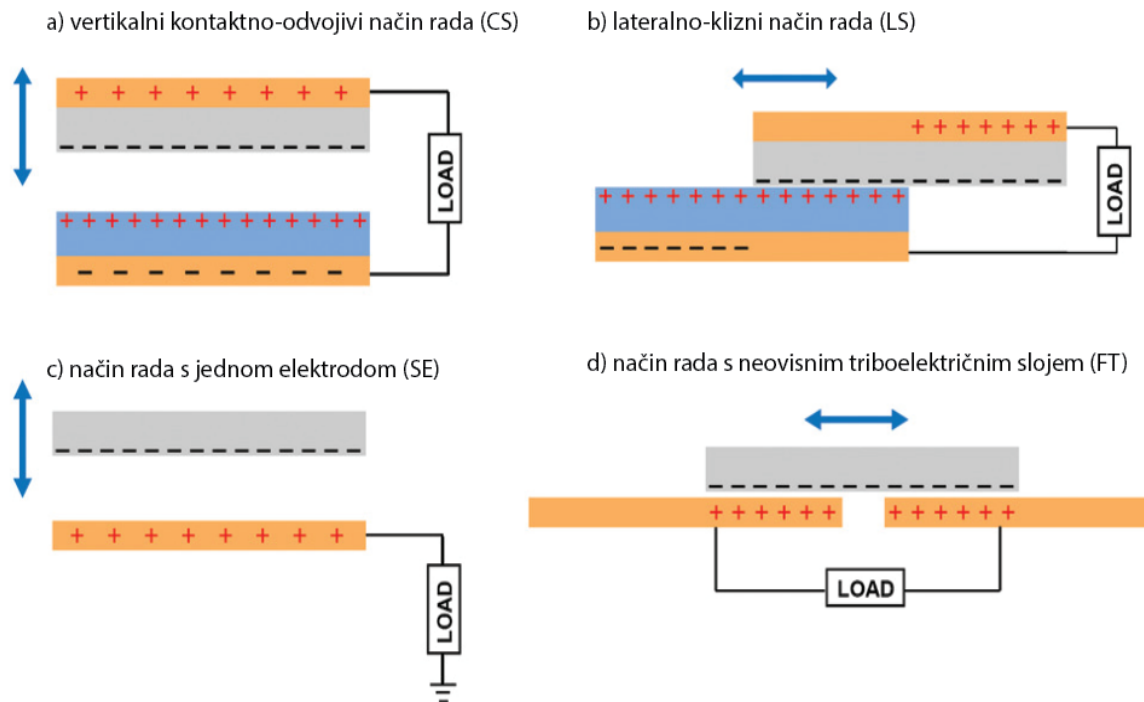
Slika 2.5 Češljasti elektrostatski generator [9]

Princip rada češljastog elektrostatskog generatora je mehaničko pomicanje tzv. pomičnih češljeva odnosno elektroda između nepomičnih češljeva gdje se stvara elektrostatska sila. U ovom slučaju, elektrostatska sila linearno je proporcionalna pomaku inercijske mase na isti način kao i mehanička opružna sila. To omogućava ravnotežu između dviju sila za sve pomake inercijske mase. MEMS češljasti generator volumena  $18 \text{ cm}^2 \times 1 \text{ cm}$  s inercijskom masom od 0,104 kg koji je izrađen elektroerozijskom obradom iz volframa u stanju je generirati snagu od  $1052 \text{ } \mu\text{W}$  pri vibracijskoj amplitudi od  $90 \text{ } \mu\text{m}$  na frekvenciji 50 Hz. To predstavlja učinkovitost od 60%, pri čemu gubitke čine gubici pretvorbe i gubici nastali pri punjenju ili pražnjenju [4, 9].

### 2.1.3 Triboelektrični princip pretvorbe

U svakodnevnom životu često je susretanje s triboelektričnim učinkom pri kojem određeni materijali postaju električno nabijeni nakon kontakta stvorenog između dva različita materijala. Iako je ovaj fenomen široko rasprostranjen, mogući su potencijalni rizici poput paljenja, eksplozija, oštećenja elektronike i drugih problema koje mogu izazvati elektrostatski naboji inducirani triboelektričnim učinkom. Polaritet i intenzitet proizvedenih naboja variraju ovisno o materijalu, hrapavosti, temperaturi, naprezanju i ostalim karakteristikama. Spajanjem triboelektričnog učinka s elektrostatskom indukcijom razvijen je triboelektrični nanogenerator TENG koji učinkovito iskorištava triboelektričnost za stvaranje statički polarizirane naboje na površinama materijala u kontaktu, dok elektrostatska indukcija pokreće pretvorbu mehaničke energije u električnu putem promjene električnog potencijala induciranog mehaničkim razdvajanjem. Postoje četiri načina rada TENG generatora, ovisno o smjeru promjene polarizacije i konfiguracije elektroda. Na Slici 2.6 prikazani su vertikalni kontakno-odvojivi (CS) način rada, lateralno-klizni (LS) način rada, način rada s jednom elektrodom (SE) i način rada s neovisnim

triboelektričnim slojem (FT). CS – TENG je korišten u 3. poglavlju gdje je opisan detaljni princip rada takvog uređaja [10].



Slika 2.6 Razlike TENG nanogenerators: a) CS – TENG način rada, b) LS – TENG način rada, c) SE – TENG način rada, d) FT – TENG način rada [10]

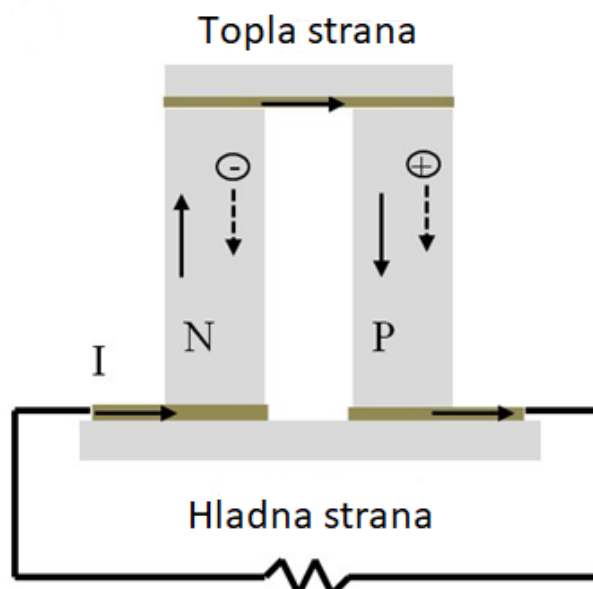
Nakon što su opisani elektromagnetski, elektrostatski i triboelektrični načini pretvorbe energije u sljedećoj cjelini će se opisati prikupljanje niskorazinske energije korištenjem toplinske energije iz okoliša.

## 2.2. Pretvorba toplinske energije u električnu energiju iz okoliša

Tijekom proteklih 40 godina, termoelektrični generatori u čvrstom stanju su pouzdano pružali energiju na udaljenim zemaljskim i izvanzemaljskim lokacijama, posebno na roveru na Marsu [11]. Jedna od ključnih prednosti termoelektričnog principa pretvorbe energije je njihova skalabilnost na male veličine, što ih čini najprikladnijom tehnologijom za pretvaranje topline u električnu energiju pri sakupljanju energije iz okoliša [5]. To su uređaji bez pokretnih dijelova, pa samim time su i tihi, pouzdani i mogu se lakoćom skalirati, što ih čini idealnim za prikupljanje niskorazinske energije. Termoelektrični učinci nastaju zbog toga što se nosioci naboja u metalima i poluvodičima mogu slobodno kretati kao molekule plina dok prenose toplinu. Kada dođe do utjecaja temperaturnog gradijenta na materijal, pokretni nosioci naboja na vrućem kraju se šire

prema hladnijem te njihovo nakupljanje na hladnijoj strani stvara elektrostatički potencijal, odnosno napon. Na taj se način postiže ravnoteža između kemijskog potencijala za difuziju i elektrostatičkog odbijanja zbog nakupljanja naboja. Ovaj fenomen, poznat kao Seebeckov efekt, temelj je termoelektrične pretvorbe otpadne toplinske energije [1, 5].

Termoelektrični generatori se sastoje od n-tipa (slobodni elektroni) i p-tipa (slobodne rupe) termoelektričnih elemenata koji su električno povezani u seriju a toplinski paralelno (Slika 2.7) [12].



Slika 2.7 Shematski prikaz termoelektričnog generatora [12]

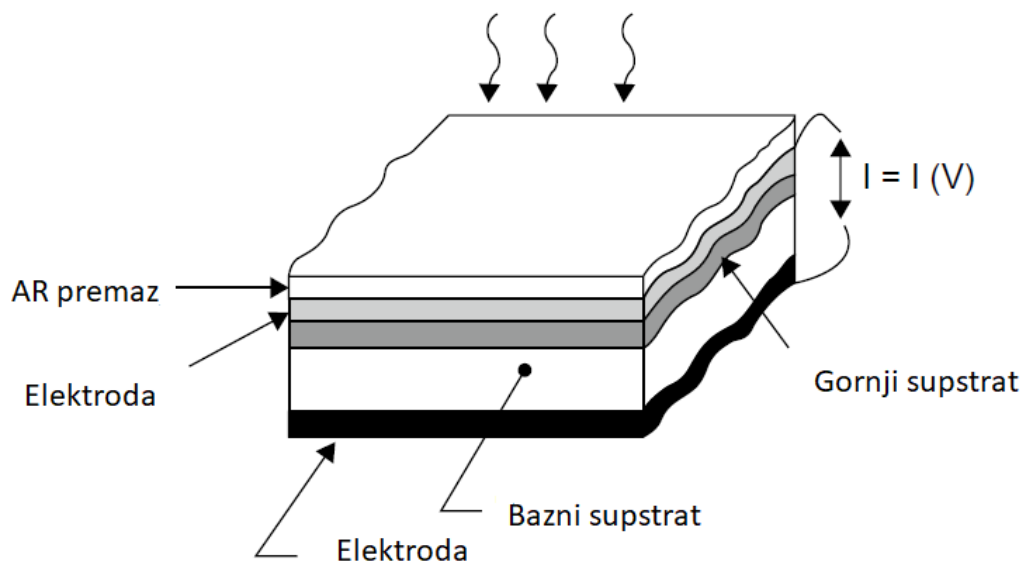
Termoelektrični faktor korisnosti materijala  $zT$  ovisi o Seebeckovom koeficijentu  $\alpha$ , apsolutnoj temperaturi  $T$ , električnoj otpornosti  $\rho$  i toplinskoj vodljivosti  $\kappa$  materijala, kako je to prikazano jednadžbom 2.11 [21]. Međutim, temperaturne razlike veće od  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  su rijetke u mikrosustavima pa stoga takvi sustavi generiraju niske vrijednosti napona i snage. S druge strane, prirodne varijacije temperature mogu pružiti relativno dobar način prikupljanja energije iz okoline.

$$zT = \frac{\alpha^2 T}{\rho \kappa} \quad (2.11)$$

Faktor korisnosti  $zT$ , koji je uglavnom određen kao prosjek vrijednosti faktora značajnosti komponenti materijala, predstavlja maksimalnu učinkovitost termoelektričnog generatora. Učinkovitost stvarnog termoelektričnog uređaja trebala bi iznositi oko 90% pretpostavljene vrijednosti zbog gubitaka izazvanih toplinskim otporom, električnim kontaktima te drugim toplinskim gubicima [5].

### 2.3. Pretvorba svjetlosne energije u električnu energiju iz okoliša

Pristup pretvorbi energije pomoću svjetlosti bio je poznat od otkrića fotonaponskog učinka od strane Becquerela [14] 1839. godine [13]. Napajanje fotonaponskih (solarnih) ćelija dolazi od sunčeve energije preko fotona koji nastaju pri ubrzavanju električki nabijenih čestica. Svaka fotonaponska ćelija se sastoji od reverzno polariziranog pn+ poluvodiča, u kojem svjetlost prolazi kroz usku n+ regiju poluvodiča. Fotoni u kojima postoji svjetlosna energija se apsorbiraju, stvarajući parove elektrona i elektronskih rupa. Stvoreno električno polje spoja odmah razdvaja svaki par, akumulirajući elektrone i rupe u n+ i p poluvodičima, uspostavljajući otvoreni krug napona. Kada je strujni krug zatvoren, odnosno povezan, akumulirani elektroni prolaze i nakupljaju se s rupama na p-strani, stvarajući fotonaponsku ćeliju koja je izravno proporcionalna intenzitetu svjetlosti [1]. Na Slici 2.8 prikazan je poprečni presjek fotonaponske ćelije koja se sastoji od dvije elektrode (katode i anode), gornjeg i baznog supstrata te anti-refleksijskog (AR) premaza koji služi za bolje upijanje sunčeve energije.



Slika 2.8 Osnovni dijelovi fotonaponske ćelije [28]

### 2.4. Pretvorba energije radiovalova u električnu energiju iz okoliša

Bežično prikupljanje energije (engl. *wireless energy harvesting*) najčešće je prisutno u obliku radiofrekvencijskog (RF) prikupljanja energije. RF energija pojavila se kao revolucionarna tehnologija s potencijalom da preoblikuje način napajanja elektroničkih uređaja i sustava koji imaju nisku potrošnju energije [15]. Povijest bežičnog prijenosa datira iz kasnih 1950-ih godina, kada je sustav za napajanje helikoptera putem mikrovalova prvi put pokazao smisao RF

prikupljanja energije u slobodnom prostoru. Otada, koncept pretvaranja energije radiovalova u električnu energiju iz okoline pruža ogroman potencijal za zamjenu baterija, odnosno napajanja u uređajima s niskom potrošnjom električne energije, osiguravajući njihovu neprekinutu funkciju [15].

Komponente sustava RF prikupljanja energije sastoje se od komponenti kao što su odašiljač i ispravilački krug. Navedene komponente služe kako bi prikupile RF energiju i pretvorile je u upotrebljivo strujno napajanje istosmjerne struje. Učinkovitost ovakvog sustava ovisi o integraciji ovih modula, pri čemu je naglašena važnost razumijevanja ponašanja elektromagnetskih valova koji su izvor prikupljanja RF energije. Naime, elektromagnetski valovi jako variraju o ovisnosti o udaljenosti, frekvenciji i provodnosti materijala. Samim time, ponašanje elektromagnetskih valova, koje će ovisiti o predajnom odašiljaču, dijeli se u dva segmenta: dalekovodno (engl. *far field*) i bliskovodno (engl. *near field*) ponašanje [15].

Elektromagnetski valovi prikladni su za različite primjene, uključujući uređaje u medicini s niskom potrošnjom energije, bežične senzorske mreže (engl. *wireless sensor networks*, WSN) i uređaje za Internet stvari (engl. *Internet of Things*, IoT). Spoj krugova RF prikupljanja energije u tehnologiju komplementarnih metal-oksida poluvodiča (engl. *Complementary Metal Oxide Semiconductor*, CMOS) otvara put prema potpuno bežičnim sustavima na čipu (engl. *System-on-Chip*). Iako je postignut značajni napredak u posljednjih nekoliko godina, postoje mogućnosti za daljnju optimizaciju tehnologije prikupljanja RF energije i njene pretvorbe u električnu energiju. To uključuje proširenje raspona korištenja operacija koje predstavljaju smanjenje gubitaka pri prijenosu, optimizaciju učinkovitosti konverzije energije i minijaturizaciju sustava. Dok se mogućnosti za napredak povećavaju, cilj je u budućnosti imati uređaje koji funkcioniraju na neprekidnom i održivom napajanju te budućnost u kojoj baterije predstavljaju zastarjelu metodu skladištenja energije [15].

## 2.5. Usporedba različitih izvora prikupljanja energije iz okoliša

Nakon što su u gornjim cjelinama opisani svi načini prikupljanja niskorazinske energije iz okoliša, u ovom će se potpoglavlju prikazati usporedba opisanih principa prikupljanja i pretvorbe u svrhu napajanja elektroničkih uređaja s ciljem zamijene konvencionalne baterije (Tablica 2.1).

Tablica 2.1 Usporedba alternativnih izvora prikupljanja energije iz okoliša  
[15]

| Oblik energije u okolišu | Raspoloživa specifična snaga   | Princip prikupljanja  | Prednosti                     | Nedostaci  |
|--------------------------|--|---|-------------------------------|--|
| <b>Kinetička</b>         | Ljudska:<br>$4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$<br>Industrijska:<br>$100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  | Piezoelektrični<br>Elektrostatski<br>Elektromagnetski<br>Tribolelektrični | Usadiv<br>Visoka učinkovitost | Ograničenje zbog svojstva materijala<br>Nedostupnost |
| <b>Svjetlosna</b>        | Zatvoreni prostor / umjetno svjetlo:<br>$10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$<br>Otvoreni prostor / prirodno svjetlo:<br>$10 \text{mW}/\text{cm}^2$ | Fotonaponski  | Visoka izlazna snaga          | Skup sustav<br>Nije usadiv                           |
| <b>Toplinska</b>         | Ljudska:<br>$30 \mu\text{W}/\text{cm}^2$<br>Industrijska:<br>$1-10 \text{mW}/\text{cm}^2$  | Termoelektrični   | Visoka snaga<br>Usadiv        | Nije uvijek dostupna<br>Zagrijava se                 |
| <b>RF</b>                | GSM:<br>$0,1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$<br>Wi-Fi:<br>$1 \text{mW}/\text{cm}^2$   | Antena  | Uvijek dostupan<br>Usadiv     | Slaba snaga<br>Učinkovitost opada s udaljenošću      |

Iz podataka u tablici može se zaključiti da najveću prednost ima kinetički oblik pretvorbe energije koji zbog svojih prednosti visoke učinkovitosti i iskorištavanju frekvencije ljudskog pokreta će se opisati u sljedećem poglavlju s naglaskom na piezoelektrični princip prikupljanja energije koji je odabran za temeljni princip prikupljanja energije u ovom radu.

## 2.6. Piezoelektrični princip prikupljanja energije iz okoliša

Piezoelektrični pretvarači koriste piezoelektrični princip za prikupljanje i pretvaranje kinetičke energije u električnu energiju, što ih čini osnovom ovoga rada pa su detaljnije odvojeni u ovom potpoglavlju. Zbog prednosti brzog odziva, visoke krutosti i preciznosti pomaka, piezoelektrični pretvarači (engl. *Piezoelectric actuators*, PEA) temeljeni na piezoelektričnom učinku postupno su postali jedan od najčešće korištenih materijala pretvarača. Osim toga, piezoelektrični pretvarači se

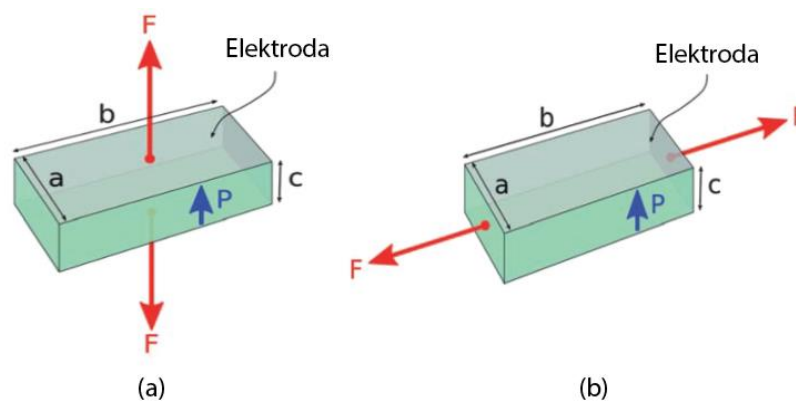
često primjenjuju kao pretvarači pri mjerenju na mikro-/nanorazini, kod mikro-elektro-mehaničkih sustava (MEMS), u proizvodnji savitljive elektronike te u biomedicinskom inženjerstvu [16].

### 2.6.1 Piezoelektrični učinak i piezoelektrični materijali

Piezoelektrični učinak, u doslovnom prijevodu, predstavlja „električnu energiju generiranu pritiskom“. Naime, to je pojava stvaranja povezanih električnih naboja na površini čvrstih tvari prilikom njihove mehaničke deformacije koja se ostvaruje pomoću mehaničkih vibracija i slično. Stoga, piezoelektrični materijali su vrlo pogodni kod minijaturiziranih sustava [17]. Svojstva piezoelektričnog materijala ovisiti će o vijeku trajanja, naprezanju i radnoj temperaturi. Radna temperatura definirana je Curievom temperaturom od približno 200 °C nakon koje se gube piezoelektrična svojstva materijala [18].

Učinkovitost prikupljanja energije je određena prema vrsti korištenog piezoelektričnog materijala. Piezoelektrični materijali prirodno se nalaze u mnogim monokristalnim materijalima, poput najčešćeg oblika kvarca. Osim monokristalnih materijala, postoje i umjetni polikristalni materijali poput keramike, polimera i kompozita. Kompoziti su spoj piezoelektričnih keramika s polimerima. Umjetni polikristalni keramički materijali, poput PZT (olovo-cirkonat-titanat), koriste se danas kao najkorišteniji materijali za izradu piezoelektričnih pretvarača [19].

Većina piezoelektričnih materijala za prikupljanje energije sadrži dobro definiranu polarizacijsku os (koja predstavlja napon), a količina prikupljene energije ovisi o smjeru vanjskog opterećenja u odnosu na tu polarizacijsku os. Za sve materijale smjer polarizacijske osi nije isti. Polarizacijska os definira smjer polarizacije kod piezoelektričnih keramika ili feroelektričnog polimera, dok je ona za neferoelektrične kristale definirana kristalnom orijentacijom. Vanjsko opterećenje (sila) može biti okomita s polarizacijskom osi ili usporedna sa smjerom polarizacijske osi, ovisno o načinu rada piezoelektričnog pretvarača prikazanog na Slici 2.9. Na Slici 2.9a prikazan je „33“ pretvarač, u kojem polarizacijska os predstavlja napon te su jednaki smjerovi vanjskog opterećenja (sile) i generiranog napona. Svi smjerovi u ravnini pod pravim kutem na polarizacijsku os su jednaki te se takvi nazivaju „31“ smjerom, što je tipično za većinu keramičkih piezoelektričnih materijala te je na Slici 2.9b generirani napon okomit na smjer djelovanja vanjskog opterećenja. Postoje i drugi mogući rasporedi, no dvije konfiguracije prikazane na Slici 2.9 pokrivaju većinu situacija piezoelektričnog prikupljanja energije iz okoliša [19, 20].



Slika 2.9 Konfiguracija piezoelektričnog pretvarača: (a) „33“ način rada, (b) „31“ način rada [19]

Osnovne piezoelektrične konstante koje određuju učinkovitost pretvorbe mehaničke energije u električnu su elektromehanički koeficijent sprezanja  $k$ , piezoelektrični koeficijent deformacije  $d$ , Youngov modul  $E$  i piezoelektrični koeficijent naprezanja  $g$ . Prvi indeks kod elektromehaničkog koeficijenta sprezanja  $k$  označava smjer električnog potencijala na elektrodama, dok drugi prikazuje smjer generirane ili primijenjene mehaničke energije. Piezoelektrični koeficijent deformacije  $d$ , koji definira polarizaciju generiranu po jedinici deformacije, za direktni piezoelektrični učinak ima oznaku prvog indeksa za smjer električnog polja, a drugog za smjer inducirane deformacije. Osim toga, Youngov modul  $E$  određuje krutost materijala, dok piezoelektrični koeficijent naprezanja  $g$  igra ključnu ulogu u generiranju električnog polja po jedinici mehaničke deformacije. Prvi indeks u koeficijentu  $g$  označava smjer električnog polja u materijalu, dok je drugi indeks smjer primijenjenog naprezanja pri direktnom učinku [21].

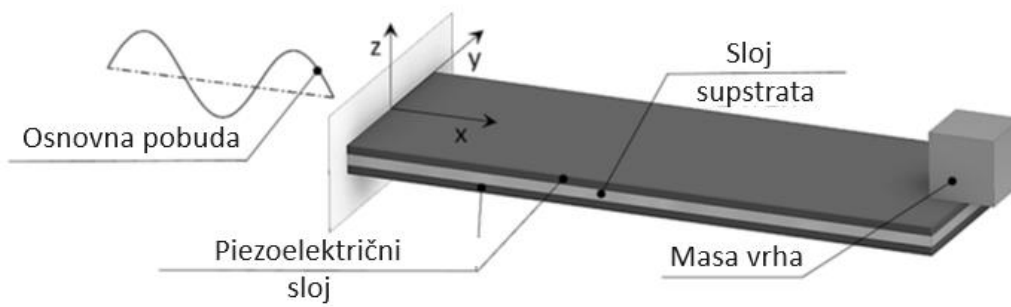
Na primjer, kod olovo-cirkonat-titanat PZT materijala će, uz iste konstrukcijske parametre, piezoelektrični koeficijent deformacije  $d_{31}$  za polarizaciju dobivenu po jedinici deformacije biti približno dva puta manji od koeficijenta  $d_{33}$  za deformaciju materijala po jedinici električnog polja [22]. PZT keramika je relativno jednostavna za proizvodnju i pokazuje snažnu vezu između mehaničkih i električnih svojstva. Ta veza im omogućuje da proizvede relativno velike sile ili pomake iz relativno malih primijenjenih napona, i obrnuto [19].

Nedostaci PZT keramike su visoki sadržaji olova koji su štetni za okoliš, pa tako i u medicinskoj primjeni, no zbog izvrsnih piezoelektričnih karakteristika su i dalje najpopularniji u izboru materijala sve dok se ne pronađu alternative koje bi mogle imati bolja piezoelektrična svojstva [22].



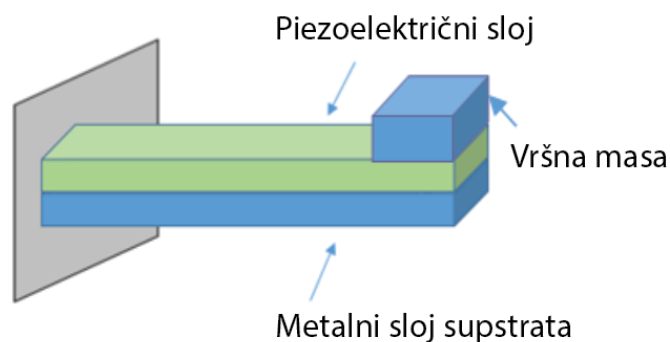
## 2.6.2 Primjena piezoelektričnog principa u piezoelektričnim pretvaračima

Generiranje napona korištenjem piezoelektričnog principa varira ovisno o konfiguraciji piezoelektričnog pretvarača. Najčešća konfiguracija su konzolno uklještene gredice koje su ujedno i najznačajnije u kontekstu ovoga rada te spadaju u kinetičku pretvorbu energije. Kinetička metoda prikupljanja energije izravno povezuje prikupljanje energije s relativnim gibanjem uklještenog kraja gredice [20]. Djelovanjem vršne mase na slobodnom kraju piezoelektrične gredice, dinamički se pobuđuje piezoelektrični pretvarač koji putem piezoelektričnog učinka stvara naboj te generira napon na površini piezoelektričnih slojeva. Na Slici 2.10 prikazan je oblik konzolne piezoelektrične gredice s vršnom masom koja služi za povećanje generirane snage te se koristi u slučajevima kada se poznaju utjecaji ostalih parametara [22].



Slika 2.10 Piezoelektrična bimorfna konzolna gredica [23]

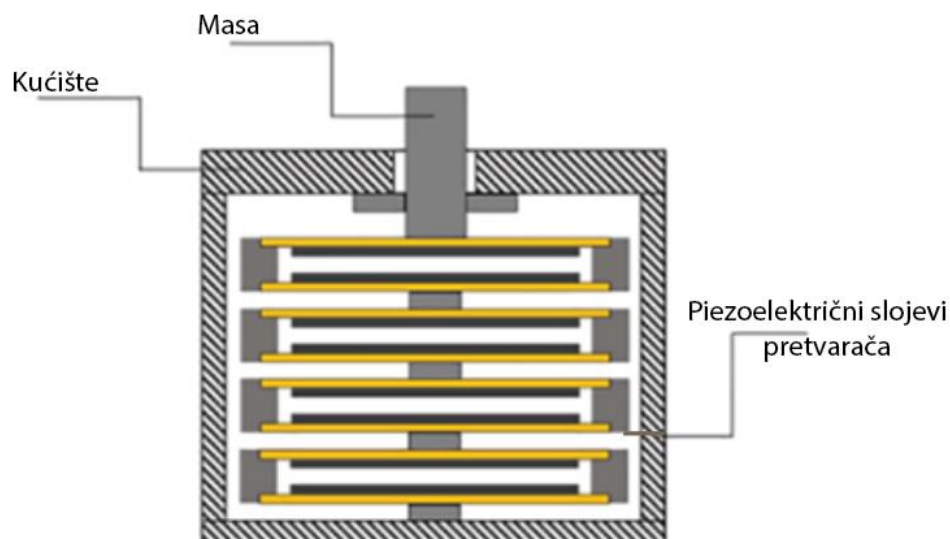
Izvedba konzolne gredice na Slici 2.9 također prikazuje oblik bimorfne konstrukcije piezoelektrične gredice koja se sastoji od dva piezoelektrična sloja, između kojih se nalazi metalni sloj supstrata. Osnovne dijelove bimorfne konstrukcije moguće je povezati u seriju ili paralelu električnog kruga ovisno da li se spajaju s unutrašnje ili vanjske strane piezoelektričnog sloja [22]. Uz bimorfne, prisutne su i unimorfne piezoelektrične konzolne gredice koje su prikazane na Slici 2.11.



Slika 2.11 Piezoelektrična unimorfna konzolna gredica [21]

Unimorfna konstrukcija piezoelektrične gredice sastoji se od jednog piezoelektričnog sloja, metalnog sloja supstrata te vršne mase. Princip rada ovisi prema načinu rada „31 pretvarača“, gdje je piezoelektrični sloj postavljen između elektroda, te „33“ načina rada gdje se uzorak između elektroda nalazi na piezoelektričnom sloju. Kao i kod prethodnog potpoglavlja, „33“ način rada zbog tankog piezoelektričnog sloja generira veće napone i najpovoljniji je za korištenje [22]. Općenito, konzolne konstrukcije su vrlo pogodne zbog njihove niske rezonantne frekvencije. Rezonantna frekvencija je specifična frekvencija pri kojoj se pojavljuje rezonancija, tj. titranje fizikalnog sustava pobuđenog nekom vanjskom silom kojoj se frekvencija podudara s vlastitom frekvencijom sustava pri maksimalnoj amplitudi [24].

Postoji i slojevita konstrukcija piezoelektričnih pretvarača koja predstavlja inercijsku metodu prikupljanja energije, a temelji se na otporu ubrzanja mase gredice. Stvara se pritom sila u sustavu masa – opruga gdje se piezoelektrična gredica potiskuje i pomiče te se koristi za prikupljanje energije pomoću vibracija. Pomicanjem piezoelektrične gredice u sustavu se stvara vibracija iz koje se generira električna energija. Amplitudna vibracija u rezonanciji može biti značajno veća od amplitude pomaka gredice (baze) [20]. Shematski prikaz slojevite konfiguracije piezoelektričnog pretvarača prikazan je na Slici 2.12.



*Slika 2.12 Slojevita konstrukcija piezoelektričnog pretvarača [25]*

Prednost ove konstrukcije naspram piezoelektrične konzole je povećana generirana snaga „33“, no ona zahtijeva i velike mase odnosno tlačne sile zbog krutosti piezoelektričnih slojeva pa će ispitivanja u okviru ovoga rada biti vršena korištenjem piezoelektrične konzole.

Slijedom obrađenih oblika pretvorbi energija, u sljedećem poglavlju su opisane primjene prikupljanja energije u nosivim tehnologijama u medicini.



U ovom poglavlju opisani su i uspoređeni različiti načini prikupljanja energije koji se mogu iskoristavati za pokretanje nosivih uređaja. Posebno je istaknut piezoelektrični način prikupljanja energije koji je temelj ovog rada, dok u sljedećem poglavlju je opisano i vrednovano 5 različitih uređaja za prikupljanje energije rotacijskim gibanjem koji bi mogli napajati biomedicinske senzore. Analizom tih izvedbi će se potvrditi koji princip rada daje najveću izlaznu snagu uređaja s ciljem unaprijeđenja i izrade nove konstrukcije u nosivim tehnologijama medicinskog uređaja.

### **3. UREĐAJI ZA PRIKUPLJANJE ENERGIJE POMOĆU ROTACIJSKOG GIBANJA**

Novi fokus u razvoju tehnologije i istraživanja predstavljaju uređaji koji u budućnosti ne bi koristili uobičajenu elektrokemijsku bateriju. Na osnovu toga, u ovom poglavlju bit će opisano nekoliko različitih rješenja prikupljanja energije iz okoliša opisanih u recentnoj literaturi [24, 27, 28] kojima bi se mogla zamijeniti elektrokemijska baterija u medicinskim uređajima. U svim sljedećim primjerima osnovni princip rada je stvaranje kinetičke energije pomoću rotacijskog gibanja. Danas, rotacijsko gibanje se naširoko koristi u različitim sektorima uključujući kotače vozila, pogonske sustave, vjetroturbine, obnovljive izvore energije, ručne satove te ostale primjene. Prema definiciji, rotacijsko gibanje je gibanje krutog tijela pri kojemu se svi njegovi dijelovi gibaju po kružnim putanjama oko točke ili osi zajedničkom kutnom brzinom [29].

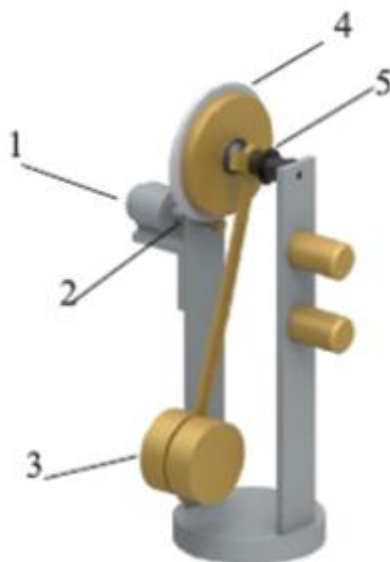
REH uređaji (engl. *rotational energy harvesting*) su uređaji koji koriste rotacijsko gibanje za prikupljanje kinetičke energije. U medicini su vrlo povoljni zbog napajanja nosivih uređaja korištenjem kinetičke uzbuđe ostvarive ljudskim pokretom. Uglavnom se REH uređaji dijele u dvije skupine: uređaji s neuravnoteženim ili pokretnim masama i uređaji temeljeni na konzolnim gredicama. Prva kategorija se odnosi na uređaje s REH njihovom ili pokretanim neuravnoteženom masom, dok druga kategorija koristi konzolne gredice s magnetima i/ili se koriste piezoelektrični slojevi koji generiraju napon pomoću piezoelektričnog učinka. Uglavnom se ove kategorije oslanjaju na djelovanje gravitacijske sile u kombinaciji s drugim uzbudama poput magnetske sile, centripetalne ili rotacijske oscilacije [27, 24].

U ovome poglavlju će biti opisano pet različitih koncepata uređaja za prikupljanje energije pomoću rotacijskog gibanja te će se pomoću metode vrednovanja odrediti koji princip uređaja je najbolji za daljnji nastavak istraživanja nosivih medicinskih uređaja.

#### **3.1. Uređaji za prikupljanje energije na osnovu njihala**

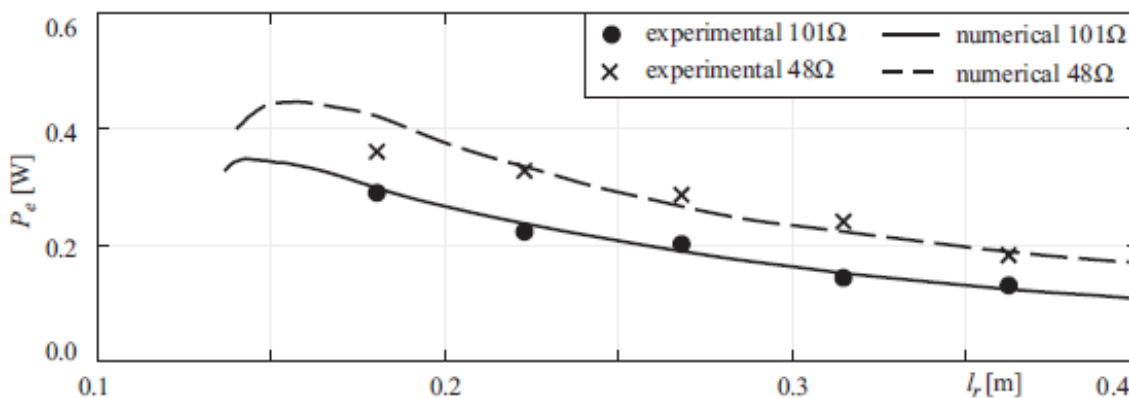
REH uređaji koji imaju mogućnost dobivanja energije pomoću njihala, spadaju u sustave kod kojih, zbog gravitacijske sile, dolazi do njihanja oko ravnotežnog položaja. Jedinica koju pokreće njihalo je rotacijsko gibanje njihala koji simulira stvaranje frekvencije ljudskim pokretom (kinetičku uzbuđu). Prema Slici 3.1, REH uređaj s njihovom se sastoji od glavine (5), osovine

vratila njihala i diskova s utezima (3), zamašnjaka sa sustavima zupčanika (4), male precizne spojke (2) i električnog generatora (1) [28].



Slika 3.1 Model REH uređaja s njihalom [28]

Zamašnjak sa sustavom prijenosa spojen je direktno na osovinu njihala pomoću mehanizma slobodnog hoda. Glavina s mehanizmom hoda prenosi gibanje njihala na sustav zupčanika, koji je povezan preko spojke na generator gdje pritom pretvara mehaničku energiju u električnu. Cilj optimizacije ovakvog uređaja je pronalazak optimalne duljine njihala za koju je moguće dobiti najbolje karakteristike snage s obzirom na otpor koji pruža priključeno trošilo. Eksperimentalnim i numeričkim ispitivanjem na slici 3.2 prikazana je dobivena maksimalna efektivna snaga u odnosu na duljinu njihala [28].



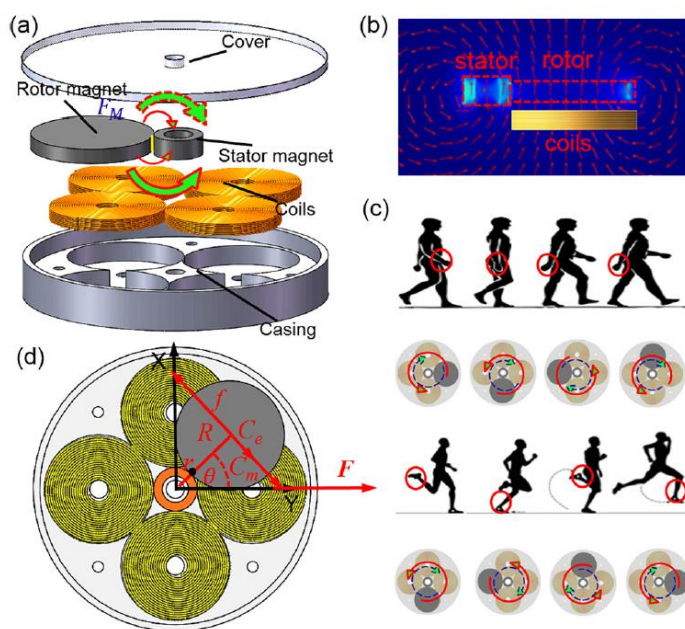
Slika 3.2 Efektivna snaga  $P_e$  u odnosu na duljinu njihala  $l_r$  [28]

### 3.2. Prikupljanje energije pomoću elektromagnetskih i triboelektričnih uređaja

U ovom poglavlju navedena su dva primjera prikupljanja energije na uređajima koji pomoću vrlo malih frekvencija, dobivenih ljudskim gibanjem, mogu ostvariti relativno velike izlazne snage s ciljem napajanja nosivih medicinskih uređaja.

#### 3.2.1. Uređaji za prikupljanje energije korištenjem elektromagneta

Općenito, problemi koji se javljaju kod elektromagneta su nedostatak rezonancije koja opada s vremenom. Da bi se poboljšale vrijednosti dobivenih parametara odnosno snage, Liu i suradnici [24] su razvili uređaj prikazan na Slici 3.3.



Slika 3.3 Uređaj za prikupljanje energije pomoću elektromagneta [24]

Uređaj prikazan na Slici 3.3 sastoji se od cilindričnog statora i rotora, kućišta te zavojnice pomoću koje se generira napon. Stator i rotor su izrađeni od magnetna sa svrhom rotacijskog gibanja rotora oko statora te njihove magnetske privlačnosti, odnosno kako bi se postigao efekt magnetnog uležištenja. Matematički modeli i eksperimentalna istraživanja [24] prikazuju da predloženi REH uređaj u ovoj izvedbi može prikupiti energiju iz niskih frekvencija ljudskog pokreta (0-10 Hz) te je osjetljiv na dinamičku uzbuđu u više smjerova, što rezultira uspješnošću savladavanja problema



rezonancije. Karakteristike prototipa ovog REH uređaja prikazane su na Slici 3.4 te u Tablici 3.1 [24].

Tablica 3.1. Karakteristike REH uređaja s elektromagnetima [24]

| Opis uređaja     | Vrijednost | Mjerna jedinica |
|------------------|------------|-----------------|
| Masa kućišta     | 1,5        | kg              |
| Masa rotora      | 0,1        | kg              |
| Polumjer rotora  | 12,5       | mm              |
| Polumjer statora | 5          | mm              |
| Broj zavojnica   | 500        |                 |
| Frekvencija rada | 8          | Hz              |
| Snaga            | 10,4       | mW              |



a)



b)

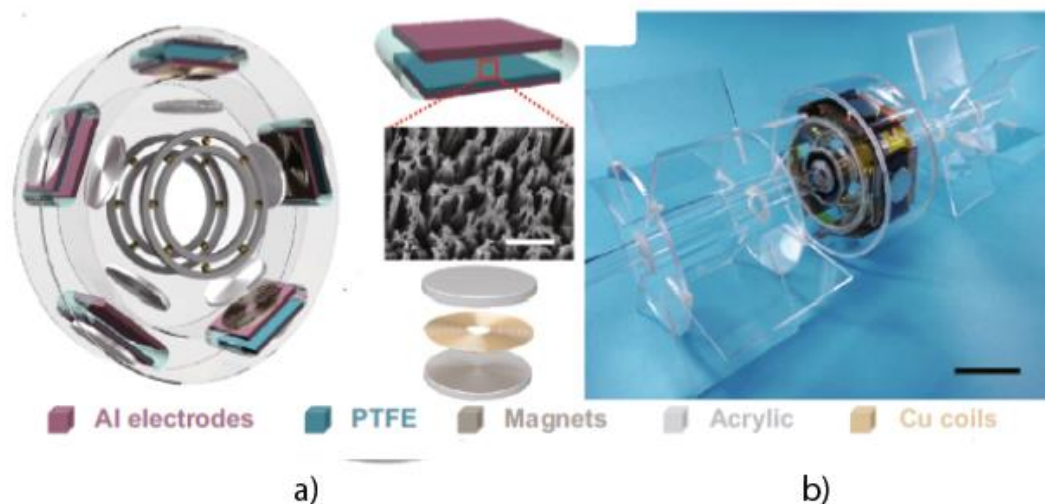
Slika 3.4 Prototip REH uređaja s elektromagnetima: (a) korištenje na ruci; (b) korištenje na nozi [24]

### 3.2.2. Triboelektrični elektromagnetski hibridni generator

Hibridni generator sastoji se od triboelektričnog nanogeneratorsa (CS – TENG) i rotirajućeg samostojećeg elektromagnetskog generatora (RF – EMG) sa svrhom prikupljanja energije protoka vode. Primjena ovakvog hibridnog generatora je punjenje komercijalnih kondenzatora koji pohranjuju energiju za napajanje elektroničkog termometra. Drugim riječima, olakšano je održavanje ovakvog sustava jer nije potrebno mijenjati baterije koje bi se koristile za napajanje

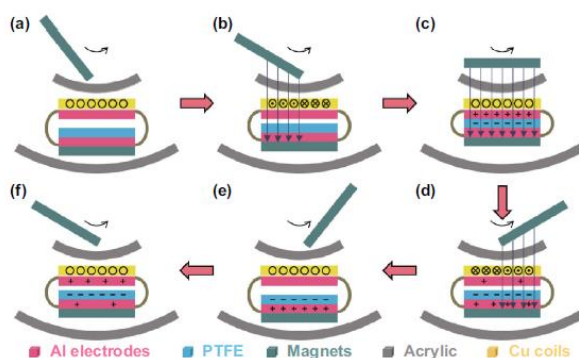


termometra i kondenzatora. CS – TENG se sastoji od dva triboelektrična sloja u kontaktu koji su izrađeni od nanožica veličine 200 nm te se povremeno odvajaju tijekom procesa rotacije. Time je postignuto poboljšanje naspram prethodnih modela koji su uglavnom radili isključivo na principu klizanja (engl. *sliding*). Hibridni generator prikazan je na Slici 3.5 [30].



Slika 3.5 Triboelektrični – elektromagnetski hibridni generator: (a) detalj generatora, (b) kompletan uređaj [30]

Za dobivanje CS – TENG sloja koristi se površina aluminijске folije koja je prekrivena politetrafluoretilen (PTFE) filmom. Nanostrukture su proizvedene na površini PTFE filma suhim jetkanjem, odnosno korištenjem kemijske reaktivne plazme za uklanjanje materijala. Prema utjecaju vanjskih čimbenika, u ovom slučaju protoku vode, rotor se počinje okretati pokrećući magnete. Zatim se povremeno PTFE film dodiruje i odvaja od aluminijске folije. Radi lakšeg opisa, rotirajući magnet će predstavljati gornji magnet, dok će se na stacionarni magnet referirati kao donji magnet. U početku, gornji magnet je potpuno udaljen od donjeg te rezultira slabim magnetskim poljem prikazanog na Slici 3.6a [30].



Slika 3.6 Princip rada CS – TENG [7]

Daljnjom rotacijom gornjeg magneta, dvije površine se približavaju jedna drugoj, no i dalje nema prijenosa naboja (Slika 3.6b). Kada je gornji magnet poravnat s donjim magnetom, privlačna sila između njih počinje aktivirati CS – TENG, što dovodi PTFE film u kontakt s aluminijskom folijom te se prijenos naboja javlja na kontaktnim točkama, kao što je prikazano na Slici 3.6c. PTFE je triboelektrično negativniji od aluminijske (Al), pa elektroni prelaze s Al u PTFE stvarajući pozitivni naboj na Al i negativni na PTFE. Nadalje, kako se gornji magnet postupno udaljava, ponovo se stvara udaljenost između PTFE i Al (Slika 3.6d) te nastaje protok elektrona od donje do gornje elektrode odnosno električni potencijal. Zatim, CS – TENG vraća u početno stanje svoj oblik i negativni naboji su gotovo u potpunosti neutralizirani induktivnim pozitivnim nabojima prikazanim na Slici 3.6e. Kada se sljedeći magnet približi CS – TENG jedinici, dva se triboelektrična sloja ponovo približavaju i preneseni naboji teku natrag na površinu tvoreći obrnutu struju prikazanu na Slici 3.6f. Nadalje se postupak ponavlja do koraka na Slici 3.6c, čime završava jedan ciklus proizvodnje električne energije. Očito je da s ovakvim sustavom rotacijski magnet, osim što aktivira CS – TENG razdvajanjem i spajanjem magneta, također pokreće i RF – EMG kroz promjenu magnetskog toka u zavojnici.

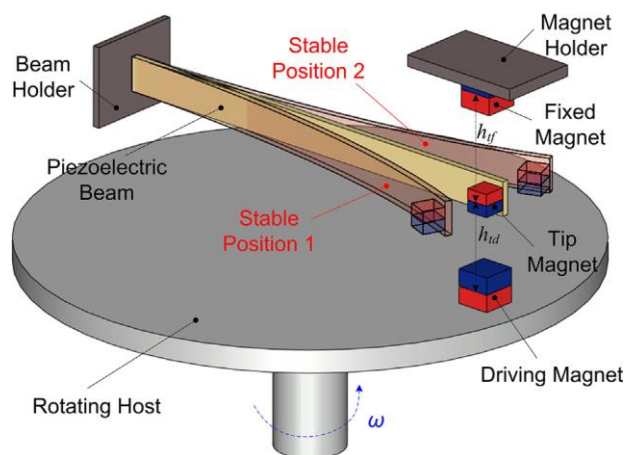
CS – TENG omogućava prikupljanje energije pri vrlo niskim frekvencijama, dok RF – EMG proizvodi energiju pri većim frekvencijama. RF – EMG postiže napon od 0,59 V i električnu struju od 1,78 mA pri brzini od 100 min<sup>-1</sup>. S druge strane, CS – TENG postiže izlazni napon od 315,7 V i električnu struju od 44,6 mA pri istoj brzini od 100 min<sup>-1</sup>. Zaključno, dobiveni izlazni parametri su dovoljni za punjenje komercijalnih kondenzatora, čija uskladištena energija se može iskoristiti za napajanje elektroničkog termometra u senzoru temperature vode [30].

### **3.3. Uređaji za prikupljanje energije korištenjem piezoelektričnih konzolnih gredica**

Jedan od najčešćih načina prikupljanja kinetičke energije je putem piezoelektričnih materijala. U poglavlju 2.6 opisani su osnovni pojmovi i vrste piezoelektričnih konzolnih gredica. Vrlo su pogodne za korištenje pri vibracijskim uzбудama te mogu generirati veliki napon odnosno snagu. Izazov je što su piezoelektrični materijali krhki pa treba biti oprezan s jakim trzajima piezoelektričnih gredica da ne dođe do loma, te su u nastavku opisana dva uređaja koja rade na principu piezoelektričnog efekta [31].

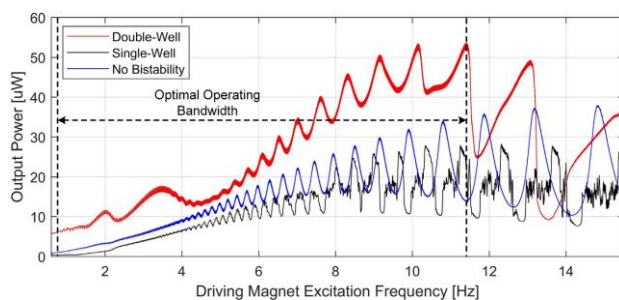
### 3.3.1. Uređaj za prikupljanje energije pomoću piezoelektrične gredice u dva stabilna položaja

Princip rada bistabilnog mehanizma prikazanog na Slici 3.7 očituje se u korištenju fiksnog magneta postavljenog iznad piezoelektrične konzolne gredice sa svrhom poboljšanja proizvodnje energije. Vrh magneta na piezoelektričnoj gredici i fiksni magnet smješten iznad gredice stvaraju odbojnu magnetsku silu koja uvodi dva stabilna ravnotežna stanja. Gredica ostaje u bilo kojem stabilnom položaju (stabilni položaj 1 ili stabilni položaj 2 prema Slici 3.7) onda kada je sustav statičan. Ako je sustav dinamičan tj. pokretan rotacijskim gibanjem, nastaju jednostruke ili dvostruke osciliranje između dva stabilna položaja te se pomoću piezoelektričnog učinka stvara napon. Pohranjena energija varira u ovisnosti o oscilacijskom modu. Ako je periodično titranje dvostruke oscilacije, amplituda i brzina vibracija je puno veća od jednostruke oscilacije za manju frekvenciju te u konačnici proizvodi se više snage [32].



Slika 3.7 Shematski prikaz REH modela pomoću piezoelektrične gredice u dva stabilna položaja [32]

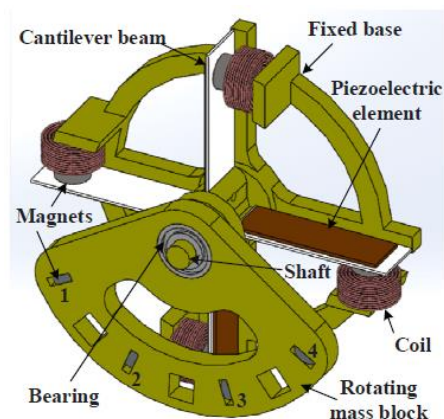
Kako bi se ilustrirala prednost bistabilnog mehanizma, na Slici 3.8 prikazana je usporedba izlazne snage između piezoelektričnih gredica sa i bez bistabilnosti, odnosno dva stabilna položaja. Razlika između jednostranog i dvostranog oscilirajućeg moda na frekvencijama između 1-10 Hz potvrđuje dobivanje puno boljih rezultata pomoću dvostranog oscilirajućeg moda [32].



Slika 3.8 Usporedba jednostranog i dvostranog oscilirajućeg moda piezoelektrične gredice [32]

### 3.3.2. Prikupljanje energije pomoću piezoelektromagnetskog višesmjernog vibracijskog uređaja

Piezoelektrični sloj je u ovom slučaju postavljen na površinu svake konzolne gredice da bi prikupljao energiju (Slika 3.9). Permanentni magneti su postavljeni na slobodne krajeve konzolne gredice kao blok s masom. Četiri zavojnice za prikupljanje energije raspoređeni su na bazi ispod permanentnih magneta, odnosno na konzolnim gredicama. Na središnjem vratilu postolja postavljen je ležaj, dok je na vanjskom prstenu ležaja postavljen rotirajući blok te njegovi položaji odgovaraju permanentnim magnetima na konzolnim gredama. Piezoelektrična gredica je pobuđena vibracijom na svoju frekvenciju interakcijom između magneta na konzoli i magneta na rotirajućem bloku. Također, može se prikupiti i energija udarnih vibracija pri niskofrekventnom ljudskom pokretu. Što je veća brzina vibracije, to je veći izlazni napon na zavojnici. Međutim, uvelike ovisi veličina piezoelektrične gredice koja određuje maksimalnu amplitudu vibracije prilikom trzanja, odnosno maksimalnu generiranu snagu uređaja [33].



Slika 3.9 Piezoelektromagnetski višesmjerni vibracijski uređaj [33]

Karakteristike REH uređaja iz ovog poglavlja su dani u Tablici 3.2 [33].

Tablica 3.2 Karakteristike piezoelektromagnetskog višesmjernog vibracijskog uređaja [33]

|                              |                                   |
|------------------------------|-----------------------------------|
| Način pobude                 | Permanentni magneti               |
| Metoda prikupljanja energije | Piezo-elektromagnetna kombinacija |
| Maksimalna izlazna snaga     | 1,31 mW                           |
| Radna frekvencija            | 1-15 Hz                           |
| Smjer vibracije              | Višesmjerni zamah i vibracija     |
| Promjer uređaja              | 70 mm                             |

### 3.4. Vrednovanje opisanih uređaja

Kako bi uvidjeli koja je od gore opisanih izvedbi daje najpovoljnije rezultate, izradit će se tablica vrednovanja prema kriterijima koji su bitni za zadatak i konstrukciju. Svaki se kriterij dijeli na pojedina svojstva koja mu pripadaju te se određuje faktor težine  $g$  (koji može biti između 0 i 1) za svako pojedino svojstvo, čime se pokazuje koliki je značaj toga svojstva. Zbrojeno po kriterijima, faktori težine iznose ukupno 100%, odnosno 1, te također, zbrajajući po svim svojstvima, suma iznosi 1. Svako izvedbi odnosno uređaju se za pojedina svojstva dodjeljuju bodovi od 0 do 4. Ako je svojstvo nezadovoljavajuće, rješenju se pridjeljuje 0 bodova, jedva prolazno 1 bod, zadovoljavajuće 2 boda, dobro 3 boda te odlično 4 boda. Na koncu se određuju 4 vrste kvalitete kojima se izražava stupanj kvalitete nekog rješenja i na temelju kojih se različite izvedbe uspoređuju. Ukupna „nevagana“ kvaliteta prikazuje zbroj svih dodijeljenih bodova za pojedinu izvedbu. Ukupna „vagana“ kvaliteta pokazuje zbroj umnoška faktora težine i pripadnih bodova. Ukupna „nevagana“ apsolutna kvaliteta dobije se dijeljenjem ukupne „nevagane“ kvalitete s najvećom mogućom kvalitetom (broj svojstava pomnožen s najvećom mogućom ocjenom). Ukupna „vagana“ apsolutna kvaliteta dobije se dijeljenjem ukupne „vagane“ kvalitete s najvećom mogućom kvalitetom, pri čemu se svojstva važu (najveća moguća ocjena množena sumom faktora težine).

Vrednovanje će se provoditi prema kriterijima „Konstrukcija“, „Iskoristivost“ i „Praktičnost“ koji pobliže opisuju uređaje prethodno opisane po poglavljima. Najveća važnost pridaje se iskoristivosti uređaja (60%), pošto je glavni cilj postizanje što veće izlazne snage ( $g = 0,45$ ) uz što nižu radnu frekvenciju ( $g = 0,15$ ) da bi se omogućila što bolja efikasnost nosivog uređaja. Sljedeći kriterij po važnosti je konstrukcija (25%), čime se osigurava mala težina konstrukcije s  $g = 0,06$  i otpornost na vanjske čimbenike poput korozije, zamora materijala i puzanja s  $g = 0,04$ . Također se gleda i cijena koja prema ovom kriteriju ima najveći iznos od  $g = 0,19$  te tehnološka zahtjevnost s iznosom od  $g = 0,06$ . Zadnji kriterij predstavlja praktičnost (15%) koji ulazi parametrima udobnosti s  $g = 0,08$  te kompaktnosti s  $g = 0,07$ , čime se ocjenjuju parametri koji utječu na rukovanje uređajima.

Svako pojedino svojstvo je vrednovano za 5 različitih uređaja te su kriteriji, svojstva i ocjene po izvedbama prikazane u Tablici 3.3.

Tablica 3.3 Vrednovanje različitih koncepata uređaja

| VREDNOVANJE PREDLOŽENIH UREĐAJA             |                                |             |                       |                    |                                    |                    |                                |                    |                   |                    |                              |                    |
|---|--------------------------------|-------------|-----------------------|--------------------|------------------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|------------------------------|--------------------|
| Bodovanje: $v_i = 0 \dots 4$                |                                |             |                       |                    |                                    |                    |                                |                    |                   |                    |                              |                    |
| KRITERIJ                                    | SVOJSTVO                       | Model       | Uređaj pomoću njihala |                    | Rotirajući elektromagnetski uređaj |                    | Triboelektrični elektromagneti |                    | Bistabilni uređaj |                    | Piezoelektromagnetski uređaj |                    |
|   |                                | $g_i$       | $v_i$                 | $(g_i \times v_i)$ | $v_i$                              | $(g_i \times v_i)$ | $v_i$                          | $(g_i \times v_i)$ | $v_i$             | $(g_i \times v_i)$ | $v_i$                        | $(g_i \times v_i)$ |
| Konstrukcija<br>(0,25)                      | Otpornost na vanjske čimbenike | 0,04        | 2                     | 0,1                | 4                                  | 0,2                | 4                              | 0,2                | 3                 | 0,15               | 4                            | 0,2                |
|   | Težina                         | 0,06        | 1                     | 0,07               | 3                                  | 0,21               | 3                              | 0,21               | 3                 | 0,21               | 3                            | 0,21               |
|   | Cijena                         | 0,09        | 2                     | 0,26               | 4                                  | 0,52               | 2                              | 0,26               | 3                 | 0,39               | 4                            | 0,52               |
|   | Tehnološka zahtjevnost         | 0,06        | 3                     | 0,18               | 3                                  | 0,18               | 1                              | 0,06               | 4                 | 0,24               | 3                            | 0,18               |
| Iskoristivost<br>(0,6)                      | Maksimalna izlazna snaga       | 0,45        | 300 mW<br>4           | 1,8                | 10,4 mW<br>2                       | 0,9                | 0,09 mW<br>2                   | 0,9                | 0,05 mW<br>1      | 0,45               | 1,31 mW<br>2                 | 0,9                |
|   | Niska radna frekvencija        | 0,15        | 1                     | 0,15               | 4                                  | 0,6                | 4                              | 0,6                | 4                 | 0,6                | 4                            | 0,6                |
| Praktičnost<br>(0,15)                       | Udobnost                       | 0,08        | 2                     | 0,16               | 3                                  | 0,24               | 3                              | 0,24               | 3                 | 0,24               | 3                            | 0,24               |
|   | Kompaktnost                    | 0,07        | 1                     | 0,07               | 4                                  | 0,28               | 4                              | 0,28               | 4                 | 0,28               | 4                            | 0,28               |
| ... = $v_{\max} \times n = 4 \times 8 = 32$ |                                | $V = S v_i$ | 16                    |                    | 27                                 |                    | 23                             |                    | 25                |                    | 27                           |                    |

|                      |     |       |       |       |       |       |       |      |       |       |
|----------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| $V_g = S(v_i g_i)$   |     | 2,79  |       | 3,13  |       | 2,75  |       | 2,56 |       | 3,13  |
| $V_{aps} = V/32$     | 0,5 |       | 0,844 |       | 0,719 |       | 0,781 |      | 0,844 |       |
| $V_{g\,aps} = V_g/4$ |     | 0,698 |       | 0,783 |       | 0,688 |       | 0,64 |       | 0,783 |

Na temelju vrednovanja može se zaključiti da vodeće mjesto zauzimaju rotirajući elektromagnetski uređaj iz poglavlja 3.2.1 te piezoelekromagnetski uređaj iz poglavlja 3.3.2. Dobivena ukupna „nevagana“ apsolutna kvaliteta ( $V_{aps} = 0,844$ ) potvrđuje vjerodostojnost ispitivanja. S obzirom na to da su dobiveni rezultati jednaki, u nastavku rada će se, radi jednostavnosti te dostupnosti piezoelektričnih gredica na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci, u svrhu daljnjih istraživanja obraditi sustav s trzalicom koji će impulsnim uzbudama piezoelektričnog pretvarača pretvarati kinetičku energiju u električnu, a sve s ciljem davanja ideje za izradu nove konstrukcije nosivog uređaja koji sadrži optimalne faktore trzalica koje su opisane u sljedećem poglavlju. Ukoliko se proširi istraživanje moguće je vrednovati i usporediti predloženu konstrukciju s danim kriterijima.



## **4. EKSPERIMENTALNI POSTAV, ALATI I TEHNOLOGIJA IZRADE**

Korištenjem metode vrednovanja različitih koncepata u 3. poglavlju, utvrđeno je da su pomoću rotacijskog gibanja, elektromagnetski te piezoelektromagnetski uređaji optimalni za ostvarivanje najveće izlazne snage. U nastavku ovog poglavlja su stoga, zbog kompleksnosti mehanizma iz potpoglavlja 2.6.2, opisane potrebne stavke za izvedbu mjerenja i analizu utjecaja geometrijski različitih trzalica. Budući da se te različitost trzalica teško matematički modeliraju, neophodno je dobiti rezultate proširivanjem eksperimentalnih ispitivanja prema znanstvenom istraživanju Marković E. et al – EUSPEN [34]. Tu spadaju eksperimentalan postav, softverski alat Minitab te aditivne tehnologije za izradu trzalica namijenjenih za kontroliranu mehaničku uzbudu piezoelektričnih gredica. U ovom kontekstu, diplomski rad fokusira se na analizu različitih geometrija trzalica korištenih u konstrukciji rotora s ciljem povećanja efikasnosti mehaničkog trzaja i proizvodnje električne energije.

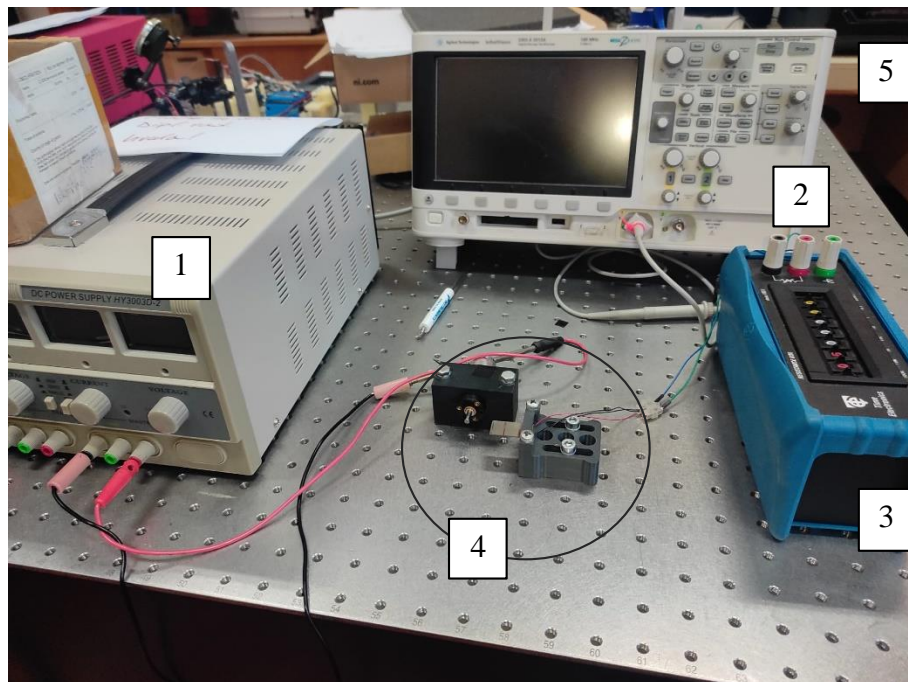
Ispitivanja su provedena na eksperimentalnom postavu smještenom u Laboratoriju za precizno inženjerstvo na Tehničkom fakultetu u Rijeci, koji omogućuje precizno pozicioniranje i učvršćivanje piezoelektrične konzolne gredice opisane u nastavku kao ključni dio u analizi mehaničkog trzaja.

### **4.1 Eksperimentalni postav za analizu različitih geometrija trzalica**

Gore navedena ispitivanja provedena su na postojećem eksperimentalnom postavu u sklopu Laboratorija za precizno inženjerstvo na Tehničkom fakultetu u Rijeci [35]. Ovaj eksperimentalni postav omogućuje precizno pozicioniranje i učvršćivanje piezoelektrične konzole kako bi se moglo provesti ispitivanje procesa mehaničkog trzaja ovisno o geometriji trzalica koje mehanički djeluju na konzolnu gredicu. Također, postav pruža mogućnost kontrolirane varijacije relevantnih konstrukcijskih parametara, poput duljine i širine trzalica, kako bi se analizirao utjecaj geometrijskih karakteristika na odziv piezoelektričnog pretvornika. Time se stvara temelj za ispitivanje mehaničkih svojstava konzolnih gredica te optimizaciju konstrukcije rotora s trzalicama u svrhu povećanja učinkovitosti mehaničkog trzaja i generacije električne energije. Prikaz eksperimentalnog postava nalazi se na Slici 4.1 i uključuje:

- 1- izvor napajanja za istosmjerni motor

- 2- osciloskop za mjerenje generiranog napona na piezoelektričnoj gredici
- 3- otpornu dekadu
- 4- sklop za mehaničko trzanje te
- 5- pripadajuću računalnu potporu



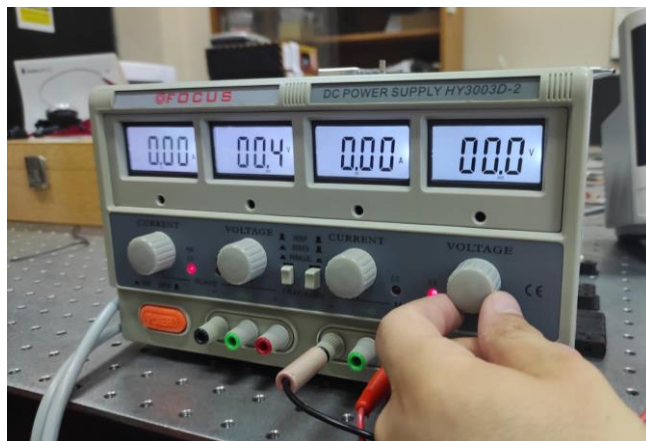
Slika 4.1 Eksperimentalni postav: 1 - izvor napajanja, 2 – osciloskop, 3 – otporna dekada, 4 - sklop za mehaničko trzanje, 5 - računalna potpora

U sklopu eksperimentalnog postava, koriste se instrumenti koji imaju sljedeći redoslijed operacija: istosmjerni izvor napajanja stvara potrebni ulazni napon za pokretanje istosmjernog motora simulirajući gibanje ljudskog tijela tako da na vratilu prenosi okretni moment na 3D printanu trzalicu. Ta trzalica mehaničkim trzajem djeluje na piezoelektričnu gredicu pri čemu uzrokuje deformaciju konzole, uslijed koje se generira napon u piezoelektričnim slojevima stvarajući ispis električnog signala prikazanog na osciloskopu. Osciloskop omogućuje vizualizaciju električnih signala u vremenu i isporučuje zapis mjerenja u obliku CSV datoteke, dok otporna dekada simulira opterećenje trošila povezanih na piezoelektričnu gredicu, što omogućuje konačni izračun generirane snage.

#### 4.1.1 Istosmjerni izvor napajanja

Uređaj za pretvorbu izmjenične električne struje iz mreže u istosmjernu naziva se u ovome radu istosmjerni izvor napajanja (engl. *Direct Current*, DC) s mogućnošću regulacije izlazne

istosmjerne struje. Kako bi se mogao pokrenuti istosmjerni motor u sklopu za mehaničko trzanje, na njega je potrebno dovesti odgovarajući ulazni napon putem istosmjernog izvora napajanja HY3003D – 2 [35] prikazanog na Slici 4.2.



Slika 4.2 Istosmjerni izvor napajanja HY3003D-2

Povećanjem ulaznog napona, povećava se i brzina vrtnje na DC motoru te se samim time i povećava iskoristiva energija koja simulira frekvenciju pomaka ljudske ruke. Veza između ulaznog napona na izvoru napajanja i brzine vrtnje DC motora pri temperaturi okoline 22 °C je dana izrazom 4.1 [36]:

$$U = n_0 \cdot 2\pi \cdot r \cdot k_M + I_0 \cdot R \quad (4.1)$$

gdje  $U$ , V predstavlja napon na izvoru napajanja,  $n_0$ ,  $\text{min}^{-1}$  je početna brzina vrtnje DC motora,  $I_0$ , A daje jakost struje u uvjetima bez opterećenja,  $R$ ,  $\Omega$  označava otpor,  $r$  je prijenosni omjer reduktora elektromotora, dok  $k_M$ , Nm/A predstavlja konstantu momenta DC motora. Raspon ulaznog napona  $U$ , odnosno ulazne brzine vrtnje istosmjernog motora  $n_0$  korištenog u eksperimentalnom postavu, bit će opisan s ostalim ulaznim veličinama u 6. poglavlju.

#### 4.1.2 Istosmjerni elektromotor s reduktorom

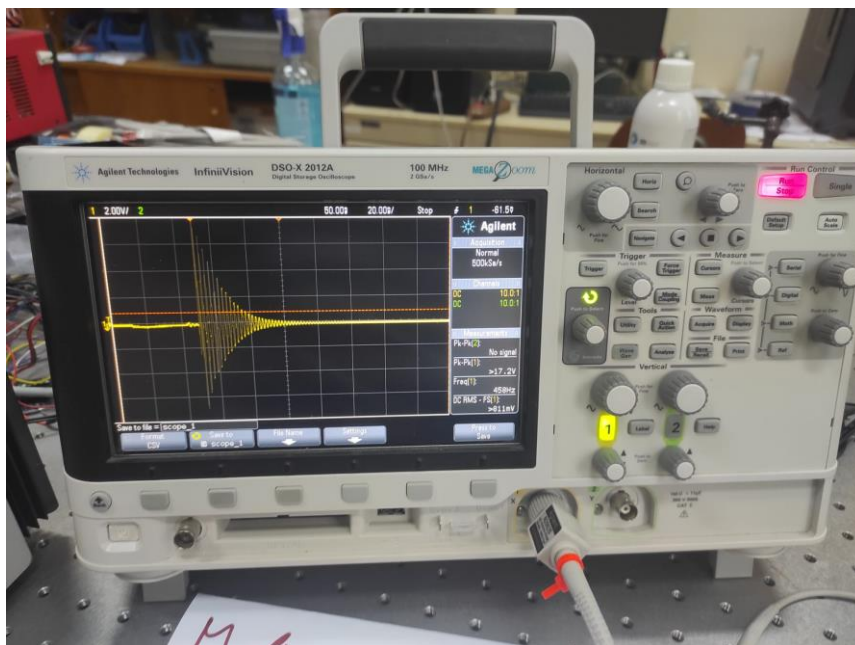
DC motor s reduktorom služi za simuliranje frekvencije gibanja tijela prenošenjem okretnog momenta vratila na 3D tiskanu trzalicu. Prijenosni omjer reduktora  $r$  prema specifikaciji [35] iznosi 28:1, dok su ostale karakteristike istosmjernog reguliranog motora s reduktorom Faulhaber serije 2233.T 018S [36] prikazane u Tablici 4.1:

Tablica 4.1 Karakteristike DC motora s reduktorom serije 2233.T 018S [36]

|  |                         |
|--|-------------------------|
| Radni napon                              | 4,5 V .... 30 V         |
| Maksimalni torzijski moment              | 4,9 mNm                 |
| Maksimalni broj okretaja bez opterećenja | 9.000 min <sup>-1</sup> |
| Zaustavni moment                         | 13,4 mNm                |
| Promjer                                  | 22 mm                   |
| Duljina                                  | 32,6 mm                 |

#### 4.1.3 Osciloskop

Osciloskop koji se koristi u sklopu ovog eksperimenta je Agilent InfiniiVision DSO – X 2012A (Slika 4.3) [37]. To je elektronički mjerni uređaj koji se koristi za vizualizaciju električnih signala u vremenu. Osnovna svrha osciloskopa omogućuje analizu i mjerenje različitih svojstava signala.



Slika 4.3 Osciloskop Agilent InfiniiVision DSO – X 2012A

Veličina koja će se mjeriti u sklopu 6. poglavlja ovoga rada, je izlazni napon  $U$  piezoelektričnog pretvarača koji je podvrgnut impulsnoj uzbuđi, a dobivene vrijednosti se pohranjuju u obliku CSV datoteke. Specifikacije osciloskopa Agilent InfiniiVision DSO – X 2012A dane su u Tablici 4.2 [35]:

Tablica 4.2 Specifikacija osciloskopa [35]

|                 |   |
|-----------------|---|
| Analogni kanali | 2 |
|-----------------|---|

|                                |                                  |
|--------------------------------|----------------------------------|
| Digitalni kanali               | 8 na MSO modelima s nadogradnjom |
| Širina pojasa                  | 100 MHz                          |
| Raspon uzorkovanja             | 1Gsa/s po kanalu                 |
| Dubina memorije                | 100 kpta                         |
| Stopa ažuriranja valnih oblika | 50.000 valnih oblika u sekundi   |

#### 4.1.4 Otporna dekada

Precizna otporna dekada korištena u ovom istraživanju je TE 1051 *Resistance Decade Box* prikazana na Slici 4.4. Korištenjem otporne dekade simuliralo se opterećenje trošila koje je povezano na piezoelektričnu gredicu. Model otporne dekade 1051 je kompaktan te je načinjen od čvrstog metalnog kućišta s odvojivim gumiranim pokrovom, što ga čini idealnim za preciznu upotrebu. Visoka točnost postiže se korištenjem otpornika s visokom stabilnosti i metalnim filmom. Osmoznamenasti prekidač s kotačićem omogućuje precizno i jednostavno postavljanje s jasnim prikazom vrijednosti otpora [38]. Električni otpor  $R$  sustava je konstantan u ovome ispitivanju tijekom svih provedenih mjerenja i iznosi  $5\text{ k}\Omega$ , što je određeno prema [31] za pravokutnu piezoelektričnu gredicu, kao optimalan otpor gredice pri kojem se generira maksimalna snaga.



Slika 4.4 Otporna dekada TE 1051 pri iznosu od  $5\text{ k}\Omega$

Primjenom Ohmovog zakona moguće je izračunati dobivenu snagu  $P$  u vremenskoj domeni iz napona na osciloskopu  $U$  preko konstantnog električnog otpora  $R$ , što je prikazano jednadžbom 4.2 [39]:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (4.2)$$

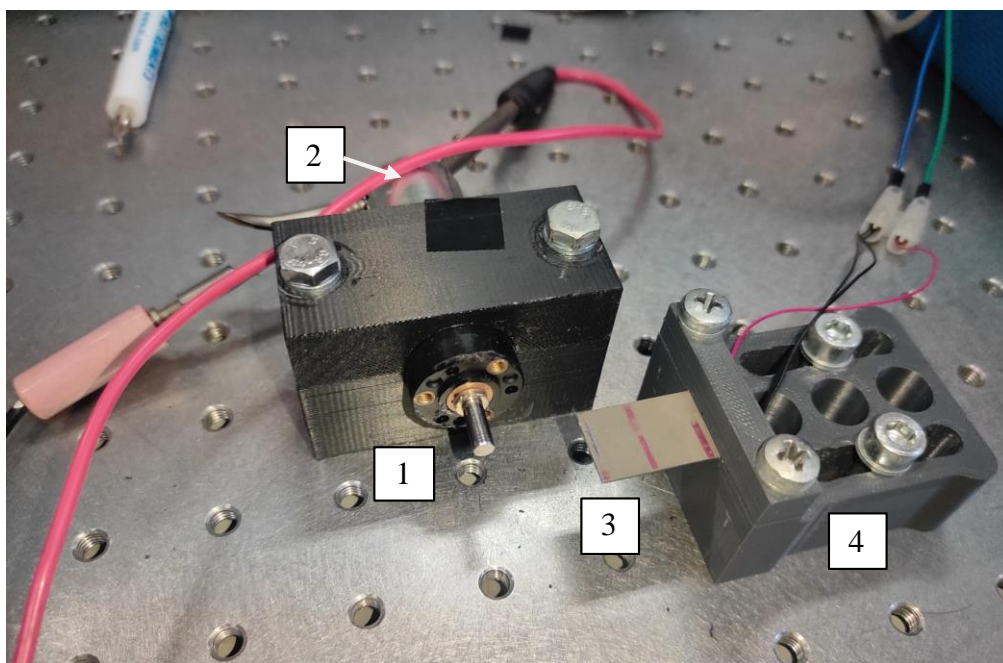


Dobivena snaga  $P$  koristi se kao relevantna veličina za usporedbu dobivenih vrijednosti eksperimentalnih mjerenja.

#### 4.1.5 Sklop za mehaničko trzanje

Sklop za mehaničko trzanje sastoji se prema Slici 4.5 od sljedećih komponenti:

- 1- vratilo elektromotora na koje se montira rotor s trzalicama izrađen korištenjem aditivnih tehnologija
- 2- regulirani istosmjerni elektromotor s reduktorom
- 3- piezoelektrična konzolna gredica
- 4- sklopa za ukleštenje piezoelektrične gredice



*Slika 4.5 Sklop za mehaničko trzanje: 1 – Vratilo elektromotora na koje se montira rotor s trzalicama, 2 – DC motor s reduktorom, 3 – piezoelektrična gredica, 4 – sklop za učvršćivanje piezoelektrične gredice*

Istosmjernim izvorom napajanja opisanim u cjelini ..., pokreće se istosmjerni regulirani motor s reduktorom (2). Na vratilo (1) elektromotora s reduktorom montira se rotor s trzalicom izrađen aditivnim tehnologijama. Trzalica koja se ispituje mehanički djeluje na pravokutni piezoelektrični pretvarač (3) u obliku konzolne gredice; sama je gredica pak pričvršćena u sklop

za uklještenje(4) koji se sastoji od dva dijela konstrukcije povezanih vijcima koji su stegnuti moment ključem na 1,5 Nm ( $\pm 6\%$ ).

#### 4.1.6 Piezoelektrična konzolna gredica

Kod eksperimentalnih ispitivanja u sklopu ovoga rada korištena je pravokutna piezoelektrična bimorfna gredica (Piezo.com) [40] prikazana na Slici 4.6. Gredica je čvrsto uklještena na jednom kraju i nema vršnu masu na slobodnom kraju gredice.



Slika 4.6 Komercijalna piezoelektrična konzola proizvođača Piezo.com [39]

Gredica se sastoji od supstrata nehrđajućeg čelika debljine 0,15 mm, na čijim površinama se nalaze dva sloja piezoelektrično vodljivog materijala PZT-5A debljine 0,254 mm, s ukupnom površinom od 23 (dužina) mm x 15 (širina) mm [40].

Osim korištene piezokeramike PZT-5A, postoje i Piezo.com varijante PZT-5J i PZT-5H [40]. Usporedba svojstava piezokeramika dana je u Tablici 4.3 [41]:

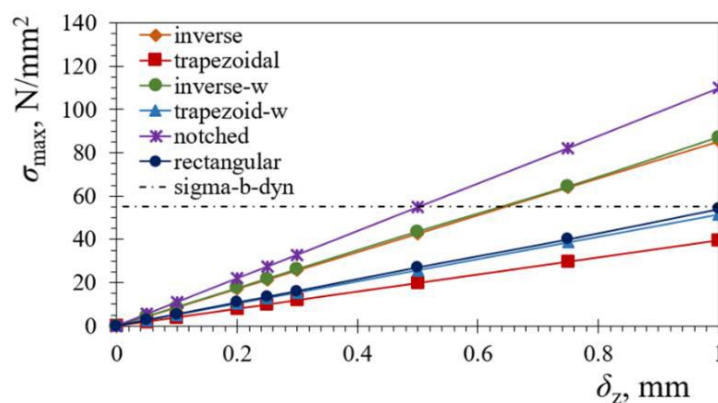
Tablica 4.3 Svojstva piezokeramika PZT-5A, PZT-5J i PZT-5H [41]

|   | Simbol   | Mjerna jedinica | PZT-5A                | PZT-5J                | PZT-5H                |
|---|----------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Relativna dielektrična konstanta        | $K^T_3$  |                 | 1800                  | 2100                  | 3800                  |
| Piezoelektrični koeficijent deformacije | $d_{33}$ | m/V             | $390 \cdot 10^{-12}$  | $500 \cdot 10^{-12}$  | $650 \cdot 10^{-12}$  |
|   | $d_{31}$ | m/V             | $-190 \cdot 10^{-12}$ | $-210 \cdot 10^{-12}$ | $-320 \cdot 10^{-12}$ |
| Elektromehanički koeficijent sprezanja  | $k_{33}$ |                 | 0,72                  | 0,74                  | 0,75                  |
|   | $k_{31}$ |                 | 0,35                  | 0,37                  | 0,44                  |

|  |          |                   |                       |                       |                      |
|--|----------|-------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| Piezoelektrični koeficijent naprezanja | $g_{33}$ | Vm/N              | $24 \cdot 10^{-3}$    | $23 \cdot 10^{-3}$    | $19 \cdot 10^{-3}$   |
|  | $g_{31}$ | Vm/N              | $-11,6 \cdot 10^{-3}$ | $-10,4 \cdot 10^{-3}$ | $-9,5 \cdot 10^{-3}$ |
| Youngov modul                          | $Y^E_3$  | N/m <sup>2</sup>  | $5,2 \cdot 10^{10}$   | $5,1 \cdot 10^{10}$   | $5 \cdot 10^{10}$    |
| Gustoća                                | $\rho$   | Kg/m <sup>3</sup> | 7800                  | 7800                  | 7800                 |
| Temperatura                            | T        | °C                | 350                   | 320                   | 230                  |

Piezoelektrični materijal PZT-5A ističe se visokim konstantama deformacije  $d$  i koeficijentima sprezanja  $k$ . Povećana izlazna snaga naboja korisna je za senzorske uređaje i generatore, dok je visoka izlazna deformacija korisna za postizanje velikih pomaka pri umjerenim naponima. Također, PZT-5A pruža stabilna radna svojstva pri većim temperaturama. Odabirom optimalnih piezokeramika, povećava se maksimalna učinkovitost sustava [41].

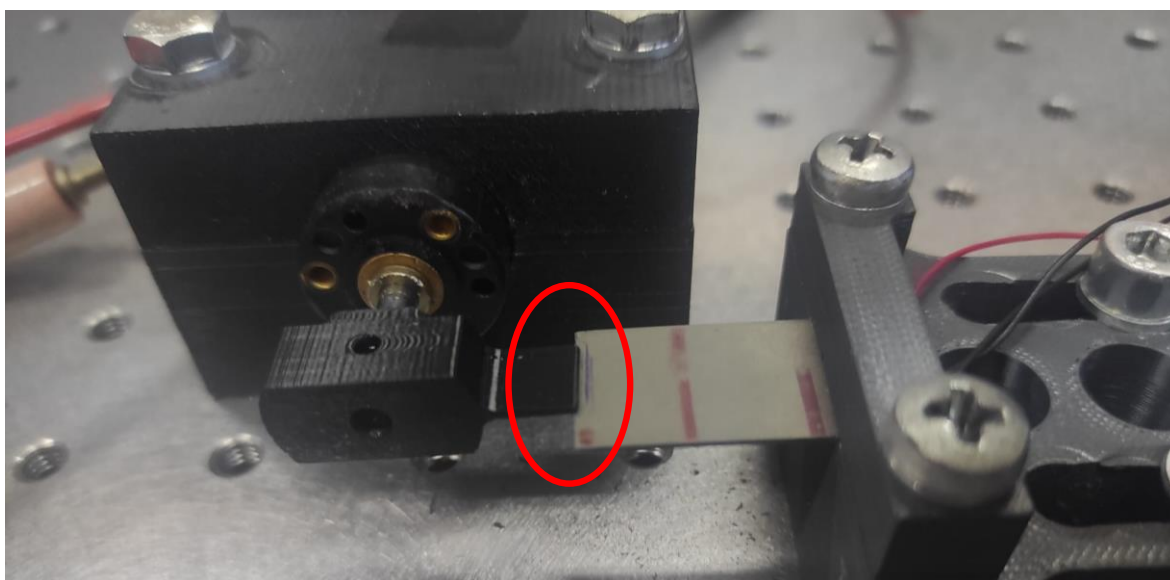
Nadalje, vrlo bitno svojstvo kod piezoelektričnih gredica su maksimalna dopuštena naprezanja uslijed savijanja. U literaturi [31] su dostupna ispitivanja od kojih je jedan primjer prikazan na Slici 4.7 gdje su prikazana maksimalna naprezanja na savijanje u piezoelektričnim slojevima različitih oblika pretvarača, ovisno o pomaku vrha trzalice na konzoli. Numeričkom analizom dobivene su tu vrijednosti maksimalnog naprezanja i progiba. Na slici je prikazana trajna dinamička čvrstoća  $R_d$ , označena crtkanom linijom, koja predstavlja maksimalni dopušteni otklon pravokutne piezoelektrične konzolne gredice čiji oblik će se koristiti u okviru ovog diplomskog rada. Doista, piezoelektrični pretvarač, odnosno piezoelektrična konzolna gredica radi u dinamičkim uvjetima koji uzrokuju promjenjiva naprezanja u krhkom piezoelektričnom materijalu. Stoga je važno razmotriti maksimalni dopušteni progib piezoelektrične konzolne gredice kako bi se izbjegla oštećenja zamora materijala [31]. Kako bi se naprezanja održala unutar granica čvrstoće, progib vrha piezoelektrične pravokutne konzole mora prema [31] biti manji od 1 mm.



Slika 4.7 Naprezanje na savijanje varijacijom različitih vrijednosti progiba vrha konzole na piezoelektričnim konzolnim gredicama [31]



Samim time, a budući da se u ovome radu ispituju različite dimenzije trzalica na rotoru, vrlo je bitno odrediti konstantan prijeklop između trzalica i piezoelektrične konzolne gredice. Promjenom vrijednosti prijeklopa, dobiveni rezultati eksperimentalnog ispitivanja ne bi bili konzistentni jer bi došlo do promjene uvjeta uzbude, odnosno promjene dobivene snage na piezoelektričnoj konzoli. Da bi se izbjegao taj problem, a time osigurala ponovljivost mjerenja, uvedena je oznaka na piezoelektričnoj gredici koja osigurava podešavanje točne pozicije vrha trzalice bez obzira na njezinu dimenziju (Slika 4.8).



*Slika 4.8 Oznaka na piezoelektričnoj gredici radi osiguravanja konstantnog prijeklopa*

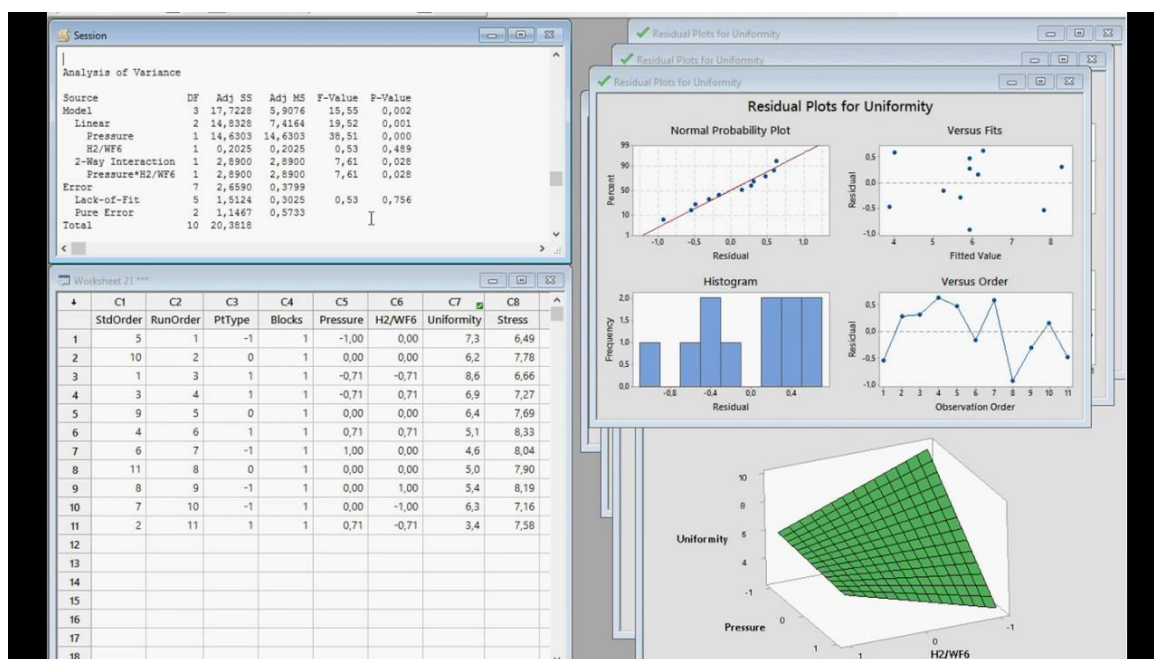
Također, da ne bi došlo do zamora materijala i mogućeg loma piezoelektrične konzolne gredice uslijed višestrukog namještanja, stezanja i otpuštanja u zoni uklještenja, poželjno je obaviti na jednoj konfiguraciji sva eksperimentalna ispitivanja uz povećanu pažnju i konstantnu provjeru dobivenih podataka da bi sva ispitivanja bila konzistentna.

## **4.2 Programski alat Minitab**

Minitab®, komercijalno dostupan programski alat za statističku analizu, koristi se kao učinkovit alat za izradu modela „odzivne plohe“ te posebnu tehniku DoE (engl. *Design of Experiments*) metode koji se usredotočuje na dobivanje rezultata u ograničenom broju točaka te izdvajanje ključnih varijabli za analizu odziva koji su pod utjecajem više nezavisnih varijabli. Unutar DoE metodologije nalazi se specifična tehnika Modela odzivne plohe RSM (engl.

*Response Surface Methodology*) koja omogućuje modeliranje i optimizaciju odziva pod utjecajem više neovisnih varijabli dajući regresijski model ponašanja sustava koji je opisan u nastavku [42].

Minitab® je programski alat koji služi za definiranje ključnih faktora ispitivanja preko kojih se dobiva nasumična kombinacija varijabli DoE metodom koje je potrebno provjeriti, nakon čega slijedi analiza RSM – a, što je važno u procesu optimizacije. Kroz prikupljanje podataka, modeliranje, vizualizaciju i validaciju, Minitab pružan vrijedan okvir za bolje razumijevanje i optimizaciju kompleksnih sustava i procesa. Primjer rezultata RSM metode u Minitabu prikazan je na Slici 4.9 te su u nastavku objašnjeni koraci za provođenje analize modela površine odziva [43].



Slika 4.9 Primjer modela površine odziva u Minitabu [43]

Prvi korak u procesu nakon definiranih ključnih faktora je određivanje nasumične kombinacije varijabli (ograničeni broj točaka) pomoću DoE metode. Ključno je imati matricu dizajna koja specificira nasumičnu kombinaciju varijabli za provođenje eksperimentalnog ispitivanja kako bi se osigurala pouzdanost rezultata. Nakon dobivenih ključnih faktora i nasumičnih varijabli DoE metodom, slijedi CAD modeliranje i izrada 3D tiska određenih dimenzija modela preko kojih su eksperimentalnim mjerenjem dobivene maksimalne generirane snage. Nakon prikupljanja podataka, provodi se analiza RSM metode. Programski alat generira regresijski model odnosa između varijabli odziva i ključnih faktora varijabli, uključujući linearne, kvadratne i interakcijske članove. Odabir odgovarajućih članova ovisi o znanju korisnika o sustavu i rezultatima kriterija za odabir modela. Kako bi se bolje razumio model, Minitab pruža grafičke alate za vizualizaciju površine odziva. To uključuje kreiranje 3D površinskih karti i drugih

grafičkih prikaza koji omogućuju bolje razumijevanje promjene odziva s različitim postavkama faktora. Također, programski alat omogućuje analizu ostataka, analizu varijance ANOVA (engl. *Analysis of Variance*) i dijagnostičke alate kako bi se provjerila adekvatnost modela koja pomaže osigurati da model dobro odgovara stvarnim podacima. ANOVA predstavlja tehniku koja omogućuje identifikaciju utjecaja različitih faktora na varijabilnost u podacima na način da analizira razliku između srednjih vrijednosti više varijabli. [42]

Nakon uspješnog modeliranja, Minitab omogućuje korištenje modela za optimizaciju. Pomoću ovog modela, moguće je pronaći kombinacije faktora koje će maksimizirati ili minimizirati odziv prema zadanim kriterijima. Jedan od poželjnih kriterija je izbjegavanje sedlastog oblika dobivene funkcije o kojem će se govoriti pri analizi ovoga rada. Osim toga, Minitab pruža alate za provođenje statističkih testova i generiranje intervala pouzdanosti kako bi se donosili zaključci o značajnosti faktora i obliku površine odziva. Ovaj korak je ključan za komunikaciju rezultata i donošenje odluka na temelju analize te će se koristiti u poglavljima 5. i 6. za analizu mjerenja rezultata [42].

Zaključno, iz Minitaba® su dobivene nasumične kombinacije varijabli, iz kojih su pomoću alata Inventor® generirani 3D CAD modeli rotora s trzalicom te su isti izrađeni aditivnim tehnologijama o kojima će biti više riječi u nastavku rada.

### **4.3 Aditivne tehnologije**

Općenito, aditivne tehnologije omogućuju izradu kompleksnih i jednostavnih 3D uzoraka, održivost te reciklažu materijala uz vrlo nizak i prihvatljiv trošak proizvodnje. U ovome radu, koristiti će se FDM (engl. *Fused Deposition Modeling*) metoda aditivne tehnologije [44]. Princip rada FDM tehnologije je prilično jednostavan te se temelji na principu ispisa sloj-po-sloj za dobivanje 3D uzorka. FDM metodom istiskuje se polimerni materijal (engl. *filament*), dok mehanizam za guranje materijala (engl. *extruder*) osigurava prolaz filameta kroz grijač (engl. *hotend*) prema mlaznici stvarajući tanke niti sloj-po-sloj i dobivanje konačnog 3D izratka. Pritom treba pripaziti na vanjske čimbenike poput gravitacije koji mogu utjecati na oblik i veličinu uzorka, te na činjenicu da se uzorak može smanjiti i postati porozan tijekom stvrdnjavanja, što može utjecati na kvalitetu 3D tiska [42]. Kao jednu od mogućnosti profesionalne, pa i industrijske tehnologije izrade rotora s trzalicama na Tehničkom fakultetu u Rijeci, koristi se aditivna tehnologija FDM na uređaju za 3D tisak Flashforge® Creator 3 [45].



*Slika 4.10 3D pisac FlashForge® Creator 3 [44]*

3D pisac FlashForge® Creator 3 prikazan na Slici 4.10 sastoji se od dva neovisna ekstrudera promjera 400  $\mu\text{m}$ , što omogućuje uporabu različitih materijala za filament, uključujući najčešće korištene akrilonitril butadien stiren (ABS), polietilentereftalat (PET) ili polikarbonat (PC) pa sve do polimera ojačanih vlaknima. Stroj koristi odvojivu grijanu podlogu s maksimalnom temperaturom od 120  $^{\circ}\text{C}$  te može proizvoditi 3D tiskane dijelove unutar volumena 300 x 250 x 200  $\text{mm}^3$ , s točnošću od  $\pm 200 \mu\text{m}$  [44]. 3D tiskani rotori s trzalicama izrađeni su na način da su sve pojedinačne komponente proizvoda ravnomjerno poravnate tijekom procesa tiska, što osigurava dosljedne mehaničke karakteristike. Na taj način, brzo i učinkovito proizvodi se znatan broj proizvoda različitih oblika i različitih materijala.

Za izradu rotora u ovome radu je korišten filament materijal polikarbonat (PC) koji stvara optimalnu snagu i tisak na prethodno opisanom stroju, a što je dokazano prethodnim istraživanjima Marković E. et al – EUSPEN [34].

Doista, PolyMax™ PC je inženjerski filament polikarbonata koji kombinira izvrsnu čvrstoću, otpornost, toplinsku izdržljivost i kvalitetu 3D ispisa. S točkom omekšavanja na 113  $^{\circ}\text{C}$ , može djelovati u zahtjevnim okruženjima gdje su otpornost na udarce, otpornost na toplinu i vibracije bitni faktori. Polikarbonat (PC) je materijal visoke čvrstoće namijenjen zahtjevnim okruženjima i inženjerskim primjenama te ima izuzetno visoku temperaturnu deformaciju i otpornost na udarce. Polikarbonat također ima visoku temperaturu staklaste tranzicije od 150  $^{\circ}\text{C}$ , što znači da će održati strukturalnu cjelovitost do te temperature, čineći ga prikladnim za upotrebu u visokotemperaturnim područjima. Nadalje, može se savijati i često se koristi u primjenama gdje je potrebna fleksibilnost. Većina dostupnih polikarbonatnih filamenata sadrži aditive koji omogućuju tiskanje filamena na nižim temperaturama, pa je potrebno provjeriti smjernice za

određeni korišteni brend plastike [46, 47]. Općenite karakteristike PC filameta dane su u Tablici 4.4 [47].

Tablica 4.4 Prednosti i mane PC filameta [47]

| Prednosti PC                    | Mane PC                                 |
|---------------------------------|---|
| Otporan na udarce               | Visoke temperature tiska                |
| Visoka otpornost na toplinu     | Visoka tendencija curenja tijekom tiska |
| Prirodno proziran               | Sklon vitoperenju                       |
| Visoka savitljivost bez pucanja | Brzo apsorbira vlagu iz zraka           |

Polikarbonat je izuzetno higroskopan, što znači da će upijati vlagu iz zraka, što može utjecati na njegova radna svojstva tijekom tiska i na njegovu čvrstoću. Stoga bi se trebao čuvati u hermetički zatvorenim, suhim spremnicima nakon otvaranja. Spremnik PolyBox™ koji se koristi za regulaciju vlažnosti filameta osiguravajući da se zadrži na razinama manjima od 15%, nalazi se u Laboratoriju za precizno inženjerstvo na Tehničkom fakultetu u Rijeci te je prikazan na Slici 4.11 [47, 48].



Slika 4.11 PolyBox™ spremnik za regulaciju vlažnosti filameta [48]

Također, pošto PolyMax™ PC filament zahtijeva vrlo visoke temperature za tisak, stvarat će odvajanje slojeva ako se ispisuje na niskoj temperaturi ili s pretjeranim hlađenjem. Da bi se izbjeglo odvajanje slojeva filameta od podloge, potrebno je postaviti optimalne ulazne parametre na stroju [47]:

- temperatura predzagrijavanja podloge: 80 °C - 120 °C
- nadodati sloj adhezivnog sredstva na podlogu

- temperatura ekstrudera: 260 °C – 310 °C.

U ovom poglavlju detaljno su opisani elementi potrebni za ispitivanja rotora s trzalicama. Poglavlje 5. je fokusirano na eksperimentalno mjerenje odziva piezoelektričnih pretvarača podvrgnutih impulsnim uzбудama pomoću trzalica različitih geometrija dobivenih kombinacijom parametara iz Minitaba i obradom dobivenih podataka u MS Excelu.

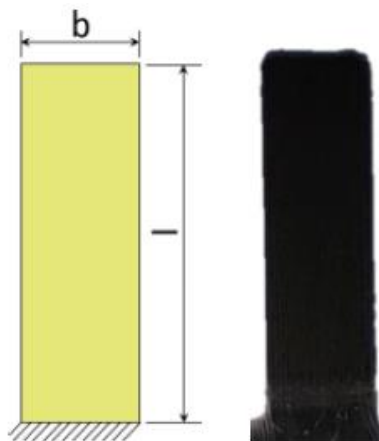
## 5. MJERENJE ODZIVA PIEZOELEKTRIČNIH PRETVARAČA PODVRGNUTIH IMPULSNOJ UZBUDI

Nastavno na znanstveno istraživanje prema Marković E. et al – EUSPEN [34] i utjecaja dobivenih parametara na izrađenim rotorima s trzalicama, potrebno je proširiti raspon ispitivanja geometrije trzalica da bi se ustanovio odziv u terminima generirane snage te napraviti analizu u svrhu dobivanja optimalnih parametara trzalice za potrebe daljnjeg istraživanja.

U ovom poglavlju opisano je eksperimentalno ispitivanje utjecaja trzalica različitih geometrija na odziv pravokutne piezoelektrične konzole podvrgnute uzbuđi trzanjem slobodnog kraja. Na taj će se način istražiti geometrija pravokutne trzalice, ulazni parametri ispitivanja, proizvodnja rotora s trzalicom pomoću 3D tiska, mjerenje odziva pomoću eksperimentalnog postava te obrada podataka. Sljedeće poglavlje bavit će se analizom dobivenih podataka na temelju generirane snage.

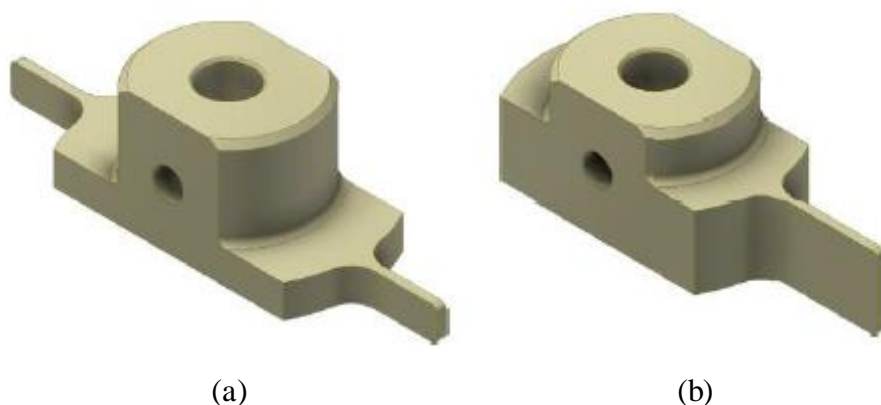
### 5.1. Geometrija pravokutne trzalice

Za određivanje krutosti pravokutne trzalice u ovisnosti o promjeni geometrijskih dimenzija, na trzalici na rotoru prikazanoj na Slici 5.1 označene su promjenjive dimenzije duljine  $l$  i širine  $b$  trzalice koje su dobivene nasumičnim varijablama iz programa Minitab. Debljina  $h$  svih ispitanih pravokutnih trzalica iznosi 1 mm. Povećanjem debljine, povećala bi se krutost, što bi uzrokovalo veći progib, no zbog razlučivosti 3D pisača i loših tolerancija stroja, ne bi bilo moguće imati konzistentnu promjenu debljine trzalice.



Slika 5.1 Tlocrt pravokutne trzalice s kotiranim veličinama duljine  $l$  i širine  $b$  [49]

Prikaz modela cijelog rotora s dvije pravokutne trzalice je dan na Slici 5.2 a, dok je u radu, radi boljih, preciznijih i konzistentnih rezultata te povećane kontrole trzanja, korišten model rotora s jednom pravokutnom trzalicom (Slika 5.2b). Rotori poput onih prikazanih na Slici 5.2 omogućuju mehaničko trzanje piezoelektrične gredice putem ujednačene rotacije rotora oko središnje osi.



*Slika 5.1 Prikaz modela rotora s dvije pravokutne trzalice (a) te prikaz modela rotora s jednom pravokutnom trzalicom (b), modeliranih pomoću 3D CAD alata Autodesk Inventor®, koji su korišteni u ovome radu [49]*

## 5.2. Ulazni faktori ispitivanja

Ulazni faktori eksperimentalnog ispitivanja se odnose na one faktore koji utječu na odziv piezoelektričnog pretvarača. Glavni geometrijski parametri i faktori su duljina trzalice, moment tromosti trzalice  $I_x$ , frekvencija trzanja iskazana brojem okretaja rotora  $n$  te vrsta materijala koji se ispituje. Prethodno istraživanje [47], u odnosu na te rubne uvjete, je pokazalo da je najbolji odziv generirane snage s gledišta materijala za trzalice izrađene od PC-a, dok je za glavne geometrijske parametre i faktore potrebno proširiti ispitivanje u svrhu dobivanja optimalne trzalice. Shodno tome, odabrani su ulazni faktori eksperimentalnog ispitivanja:

- duljina trzalice:  $l = 5 \dots 10$  mm;
- moment tromosti:  $I_x = 0,125 \dots 0,8$  mm<sup>4</sup>;
- frekvencija trzanja tj. broj okretaja rotora:  $n_0 = 95 \dots 360$  min<sup>-1</sup>;
- materijal: polikarbonat;
- broj različitih kombinacija varijabli rotora za ispitivanje: 15.



Uporabom programskog alata Minitab iz poglavlja 4.2. i kombinacijom prethodno navedenih ulaznih parametara odnosno varijabli, pomoću DoE - CVT (engl. *Latinized Centroidal Voronoi tessellation*) sustavne metode koja kombinira i izdvaja ključne parametre ispitivanja uzimajući u obzir ulazne faktore, dobiveno je petnaest kombinacija ključnih parametara koje je potrebno ispitati. Time se smanjuje broj potrebnih izvođenja eksperimenta što je ključ za ostvarenje optimalne analize rezultata ukupnog ispitivanja i ostvarenje matematičke formulacije koja putem varijabli (duljina, moment tromosti, broj okretaja) opisuje dobivenu prosječnu snagu te prosječnu generiranu snagu unutar pet *peak-to-peak* oscilacija [50].

Generirane varijable preko Minitab alata za ključne parametre za eksperimentalno ispitivanje su prikazane u Tablici 5.1:

*Tablica 5.1: Prikaz 15 kombinacija ključnih parametara rotora s trzalicom dobivenih programskim alatom Minitab i DoE – CVT metodom*

| Redni broj rotora | $l$ (mm) | $I_x$ (mm <sup>4</sup> ) | $n_0$ (min <sup>-1</sup> ) |
|-------------------|----------|--------------------------|----------------------------|
| 1.                | 6        | 0,608                    | 311                        |
| 2.                | 7,5      | 0,125                    | 360                        |
| 3.                | 7,5      | 0,125                    | 98                         |
| 4.                | 7,5      | 0,792                    | 360                        |
| 5.                | 8        | 0,438                    | 277                        |
| 6.                | 6        | 0,258                    | 302                        |
| 7.                | 8        | 0,677                    | 139                        |
| 8.                | 7        | 0,226                    | 172                        |
| 9.                | 10       | 0,582                    | 315                        |
| 10.               | 9        | 0,688                    | 214                        |
| 11.               | 6        | 0,685                    | 177                        |
| 12.               | 8        | 0,692                    | 308                        |
| 13.               | 7        | 0,447                    | 135                        |
| 14.               | 5        | 0,24                     | 159                        |
| 15.               | 10       | 0,522                    | 163                        |

Kao što je vidljivo, minimalan broj okretaja je  $n_{0\min} = 98 \text{ min}^{-1}$  odnosno  $n_{0\min} = 1,63 \text{ s}^{-1}$ , što rezultira s 1,63 trzaja piezoelektričnog pretvornika u sekundi jednom trzalicom na rotoru prema Slici 5.2b. Maksimalan broj okretaja iznosi  $n_{0\max} = 360 \text{ min}^{-1}$  tj.  $n_{0\max} = 6 \text{ s}^{-1}$  što daje 6 trzaja u sekundi. Da bi se odredio napon za napajanje elektromotora, odnosno napon potreban za postizanje

gore navedenih brzina vrtnje, potrebno je uvrstiti konstante elektromotora u izraz 4.1 iz poglavlja 4.1.1, te variranjem broj okretaja  $n_{0min}$  i  $n_{0max}$  dobije se:

$$U_{min} = n_{0min} \cdot 2\pi \cdot 28 \cdot 0,0188 + 0,005 \cdot 25 \quad (5.1)$$

$$U_{max} = n_{0max} \cdot 2\pi \cdot 28 \cdot 0,0188 + 0,005 \cdot 25 \quad (5.2)$$

Pojednostavljenjem i množenjem konstanti, za variranje raspona između minimalnog i maksimalnog napona potrebnog za pokretanje elektromotora slijedi izračun:

$$U = 1,0528 \cdot n_0 \cdot \pi + 0,125 \quad (5.3)$$

$$U_{min} = 1,0528 \cdot n_{0min} \cdot \pi + 0,125 \quad (5.4)$$

$$U_{min} = 1,0528 \cdot 98 \cdot \pi + 0,125$$

$$U_{min} = 5,5 \text{ V}$$

$$U_{max} = 1,0528 \cdot n_{0max} \cdot \pi + 0,125 \quad (5.5)$$

$$U_{max} = 1,0528 \cdot 360 \cdot \pi + 0,125$$

$$U_{max} = 20 \text{ V}$$

Dobiveni raspon ulaznog napona potrebnog za pokretanje elektromotora prema jednadžbama 5.4 i 5.5 je:  $U = 5,5 \text{ V} \dots 20 \text{ V}$ . Moment tromosti  $I_x$  usko je povezan sa širinom pravokutne trzalice  $b$ , pa za konstantnu debljinu  $h = 1 \text{ mm}$ , prema razlozima objašnjenim u poglavlju 5.1 vrijedi jednadžba 5.6:

$$b = \frac{I_x \cdot 12}{h^3} \quad (5.6)$$

$$b_{min} = \frac{0,125 \cdot 12}{1^3}$$

$$b_{min} = 1,5 \text{ mm}$$

Slijedom toga, uvrštavajući na istom principu za  $b_{max}$ , širina trzalice varira između vrijednosti:  $b = 1,5 \text{ mm} \dots 9,5 \text{ mm}$ .

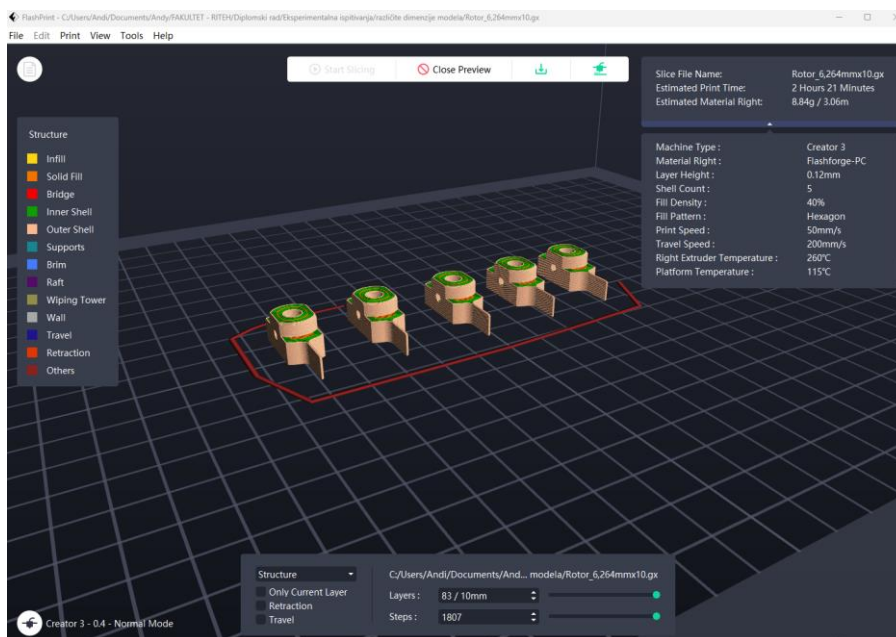
### 5.3. Izrada rotora s trzalicom pomoću 3D tiska

Da bi se izradili rotori s trzalicom, koristi se opisani Flashforge Creator 3 uređaj za 3D ispis. 3D CAD model iz programskog paketa Autodesk Inventor® [51] sprema se u obliku STL

datoteke. Računalna podrška Flashforge Creator 3 pisača na računalo je Flashprint „slicer“ program. Učitavanjem STL datoteke stvara se virtualni radni prostor 3D pisača te se daje mogućnost definiranja smjera uzorka u koordinatnom sustavu (x, y, z), pozicije uzorka, broja uzoraka, strukture te uspostave svih inicijalnih parametara s namjenom „rezanja“ (engl. *slicing*) 3D modela na slojeve koji potom određuju kvalitetu i rezolucija 3D tiska. Povećanjem debljine slojeva, povećava se robusnost te otpornost izratka na vanjske čimbenike. Primjer postavki parametara 3D pisača dani su u Tablici 5.2, dok je vizualizacija tiska na „sliceru“ prikazana na Slici 5.3.

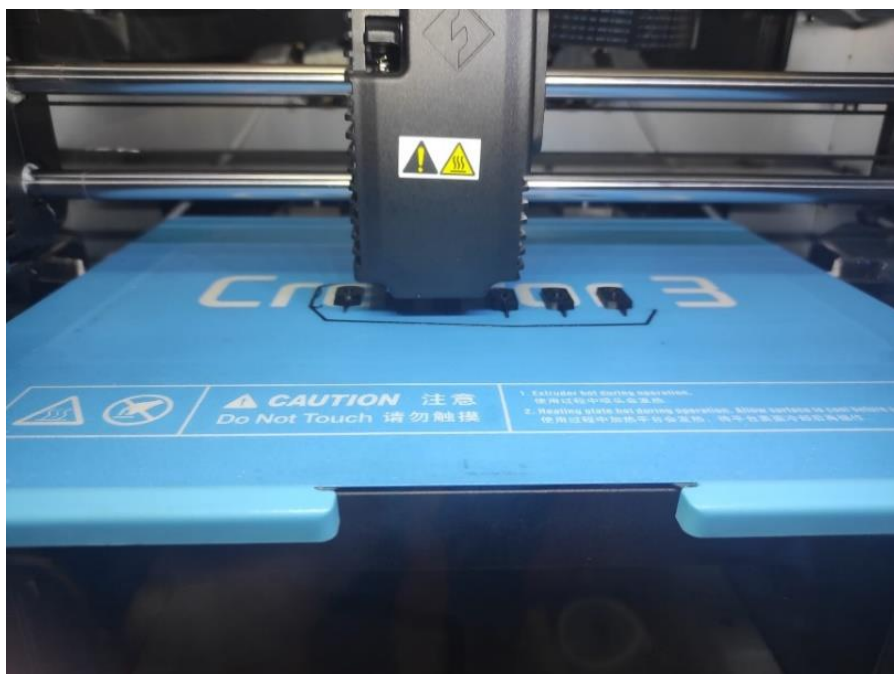
Tablica 5.2: Inicijalni parametri potrebni za 3D tisk

| Materijal tiska        | Polymax™ PC |
|------------------------|-------------|
| Temperatura ekstrudera | 260 °C      |
| Temperatura podloge    | 115 °C      |
| Brzina ispisa          | 50 mm/s     |
| Brzina kretanja        | 200 mm/s    |
| Visina uzorka          | 0,12 mm     |
| Uzorak ispune          | Hexagon     |
| Promjer mlaznice       | 0,4 mm      |



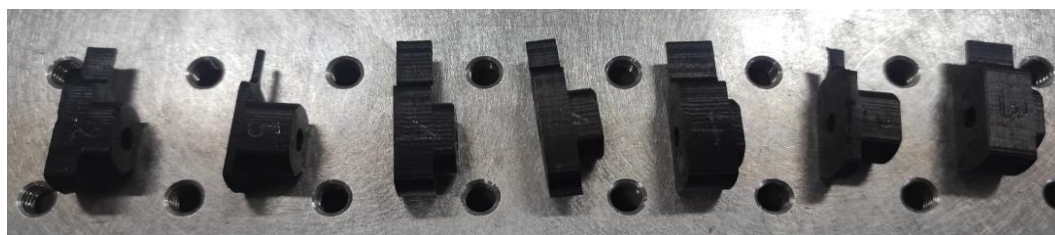
Slika 5.3. Slicer s virtualnim radnim prostorom 3D pisača

Nakon namještanja i podešavanja parametara tiska u programu, dobiva se procjena vremena trajanja procesa izrade te iznos potrebnog materijala koji će se iskoristiti. *Slicer* zatim generira G-kod koji se implementira u 3D pisač putem USB pohrane memorije. Sljedeći korak je nanošenje sloja adhezivnog sredstva na podlogu unutar 3D pisača i postavljanje postavki 3D pisača na predzagrijavanje temperature podloge na 120 °C da ne bi došlo do odljepljivanja izratka na početku tiska. Nakon što se dosegne navedena temperaturna vrijednost predzagrijavanja podloge, 3D pisač može započeti s radom i tiskom. Postupak 3D tiska prikazan je na Slici 5.4 s vidljivim postepenim nanošenjem slojeva od kojih se stvara izradak, odnosno u konkretnom slučaju, trzalica.



*Slika 5.4 Prikaz izrade rotora s trzalicom tehnologijom 3D tiska*

Kako bi rezultati mjerenja bili konzistentni i statistički relevantni, odnosno kako bi se smanjila greška mjerenja, svaki ispitani tip trzalice izrađen je u pet primjeraka da bi se postigla veća preciznost mjerenja, odnosno i smanjile pogreške mjerenja. Ukupno je tako proizvedeno 75 uzoraka trzalica čije je ispitivanje opisano u sljedećem potpoglavlju. Na Slici 5.5 su prikazani rotori s različitim geometrijama trzalica navedenim u Tablici 5.1.



*Slika 5.5 Prikaz 3D tiskanih rotora s različitim geometrijom trzalica*

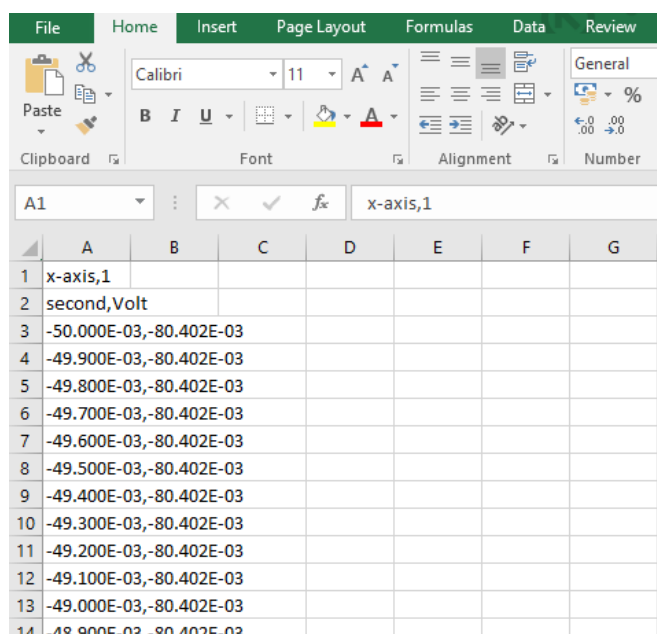
## 5.4. Mjerenje odziva pomoću eksperimentalnog postava

Mjerenja odziva piezoelektričnog pretvarača provedeno je pomoću eksperimentalnog postava opisanog u poglavlju 4.1. Na vratilo elektromotora postavljaju se 3D tiskane trzalice, a dovođenjem ulaznog napona na elektromotor preko istosmjernog izvora napajanja se, u ovisnosti o parametrima dobivenima iz jednadžbe 5.3 za svaki pojedinačni rotor s trzalicom, generira rotacijsko gibanje rotora s trzalicom te se kontaktom trzalice i piezoelektričnog pretvarača dobiva odziv u obliku napona na osciloskopu. Otpor električnog sustava je nepromjenjiv i održava se na optimalnoj vrijednosti od 5 k $\Omega$  prema poglavlju 4.1.3.

Za svaki rotor (od ukupno 75 primjeraka rotora) izvedeno je šest mjerenja, što ukupno daje 450 izmjerenih skupova podataka naponskog odziva na osciloskopu spremljeno u CSV datoteke. Da bi se dobili mjerodavni grafički prikazi naponskih odziva iz oblika CSV datoteke, potrebno ih je obraditi, za što je u sklopu ovog rada korišten MS Office Excel, dok je postupak opisan u sljedećem potpoglavlju.

## 5.5. Obrada rezultata eksperimentalnih mjerenja

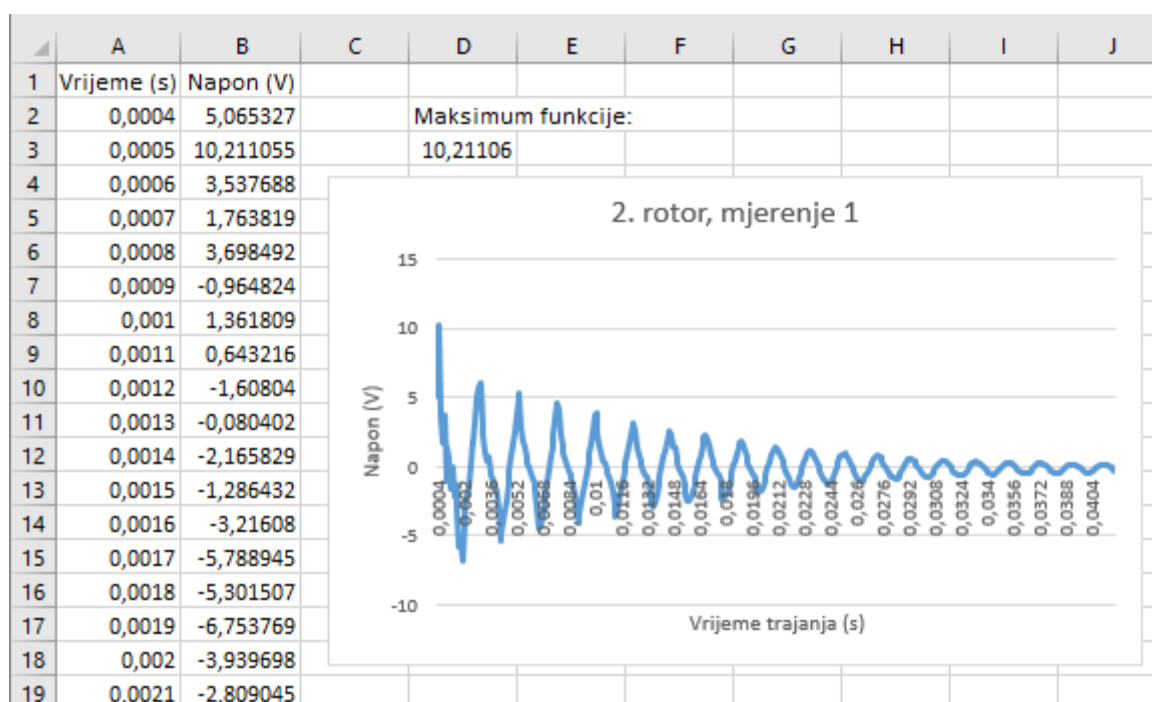
Podatke dobivene eksperimentalnim mjerenjima potrebno je obraditi, a u tu je svrhu u ovom radu je korišten MS Office Excel. Prikaz dobivenih neobrađenih podataka dan je na Slici 5.6.



|    | A                       | B | C | D | E | F | G |
|----|-------------------------|---|---|---|---|---|---|
| 1  | x-axis,1                |   |   |   |   |   |   |
| 2  | second,Volt             |   |   |   |   |   |   |
| 3  | -50.000E-03,-80.402E-03 |   |   |   |   |   |   |
| 4  | -49.900E-03,-80.402E-03 |   |   |   |   |   |   |
| 5  | -49.800E-03,-80.402E-03 |   |   |   |   |   |   |
| 6  | -49.700E-03,-80.402E-03 |   |   |   |   |   |   |
| 7  | -49.600E-03,-80.402E-03 |   |   |   |   |   |   |
| 8  | -49.500E-03,-80.402E-03 |   |   |   |   |   |   |
| 9  | -49.400E-03,-80.402E-03 |   |   |   |   |   |   |
| 10 | -49.300E-03,-80.402E-03 |   |   |   |   |   |   |
| 11 | -49.200E-03,-80.402E-03 |   |   |   |   |   |   |
| 12 | -49.100E-03,-80.402E-03 |   |   |   |   |   |   |
| 13 | -49.000E-03,-80.402E-03 |   |   |   |   |   |   |
| 14 | -48.900E-03,-80.402E-03 |   |   |   |   |   |   |

Slika 5.6 Neobrađeni podaci mjerenja odziva piezoelektričnog pretvarača

Obradom, definiranjem i pohranjivanjem podataka iz CSV datoteke u Excel datoteku, dobivene su vrijednosti vremenskog intervala ispitivanja i naponskog odziva koje precizno opisuju dinamiku funkcije odziva piezoelektričnog pretvarača. Skupove podataka potrebno je homogenizirati tako da svih 450 grafova započinju s istom referentnom točkom. Taj proces uključuje pronalaženje maksimuma funkcije unutar svakog skupa podataka. Nakon identifikacije maksimuma, prva prethodna točka postaje referentnom, a zatim pratimo graf unaprijed u vremenskom intervalu od 0,04 sekunde počevši od maksimuma funkcije. Primjer jednog mjerenja i homogeniziranog skupa podataka s dobivenim grafom odziva prikazan je na Slici 5.7.



Slika 5.7 Prikaz homogeniziranog skupa podataka jednog mjerenja

Nakon dobivanja svih homogeniziranih skupova podataka, bilježe se značajne vrijednosti iz svakog grafa da bi se mogla naposljetku napraviti statistička analiza podataka. Kako bi se postigao ovaj cilj, za svako mjerenje se iz dobivenih podataka generiraju tri grafa koji se sastoje od vrijednosti maksimalnog *peak-to-peak* napona, prosječnog *peak-to-peak* napona unutar 5 uzbuda te prosječni napon u vremenskom intervalu od 0,04, a što je detaljnije opisano u sljedećem poglavlju. Nakon dobivenih grafova naponskih odziva, funkcijom aritmetičke sredine uspoređuju se dobiveni podaci unutar šest mjerenja za svaku trzalicu, odnosno, za svih pet primjeraka za svaki model trzalice s jednakim geometrijama i faktorima stvara se konačni graf ispitivanja naponskog odziva. Uz dobivene vrijednosti naponskih odziva piezoelektričnih pretvarača izračunava se prema jednadžbi 4.2. i generirana snaga na svim rotorima s trzalicama uz optimalni električni otpor od 5

$k\Omega$ . Budući da su, pak, odzivi sinusoidalnog oblika, moguće je dobiti i vrijednosti napona negativnog predznaka, pa se pritom za izračun generirane snage koristi apsolutna vrijednost napona.

U ovom poglavlju su obrađeni svi koraci eksperimentalnog ispitivanja skupa trzalica s obradom podataka u MS Office Excelu, dok je, s ciljem usporedbe utjecaja različitih parametara trzalica na generiranu snagu piezoelektričnog pretvarača, prikaz i analiza rezultata eksperimentalnih mjerenja prikazana u sljedećem poglavlju.

## 6. UTJECAJ GEOMETRIJE TRZALICA NA GENERIRANU SNAGU PIEZOELEKTRIČNE KONZOLE

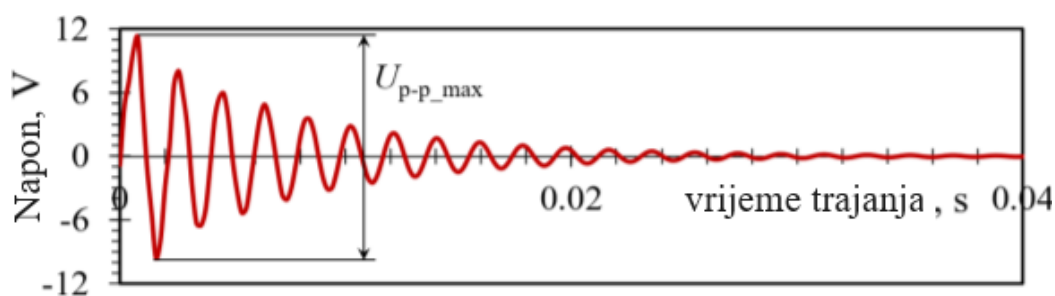
Podaci dobiveni iz eksperimentalnih mjerenja opisanih u prethodnom poglavlju služe kao temelj za analizu u ovom dijelu radu. Analizira se ponašanje sinusoidalnih uzbuđa u vremenskom intervalu 0,04 s trajanja titraja, maksimalnog odziva u jednom titraju te u prosječnom trajanju prvih pet uzbuđa, što je u korelaciji s periodom od 0,01 s.

Unosom vrijednosti snage za određene kombinacije parametara varijabli u programski alat Minitab i optimizacijom, dobiva se odzivna ploha i matematički model ponašanja. Rezidualnim dijagramima i koeficijentima determinacije koji predstavljaju odstupanje od regresijske krivulje odnosno prikaz ostataka pomoću kojih se provjerava kvaliteta i vjerodostojnost modela pa se optimizacijom modela pomoću rješavača dobiva optimalna geometrija trzalice koja rezultira najvećom generiranom snagom.

Prema znanstvenom istraživanju Marković E. et al – EUSPEN [34] utvrđeno je da su najveće izlazne snage dobivene korištenjem PC trzalica s najvišim iznosima momenta tromosti  $I_x$  i broja okretaja  $n_0$ . S druge strane, svi dobiveni grafovi rezultirali su sedlastim oblikom optimizacije dobivenih vrijednosti, koji označava da je pokazatelj višestrukih maksimuma snaga izvan raspona vrijednosti optimalnih parametara trzalica koji su razmatrani pa je potrebno provjeriti nakon analize da li dolazi do istog učinka u nastavku ovoga poglavlja.

### 6.1. Utjecaj geometrije trzalice na generiranje snage

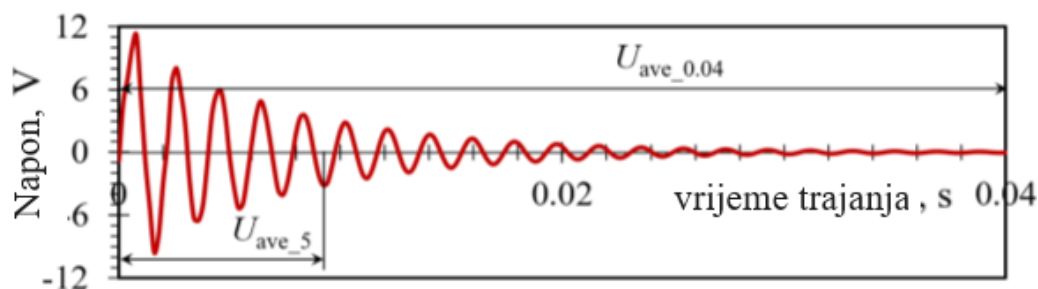
Iz dobivenih podataka potrebno je odrediti maksimalnu vrijednost napona  $U_{p-p\_max}$  „od vrha do vrha“ (engl. *peak-to-peak*), što predstavlja razliku između maksimalne i minimalne vrijednosti naponskog odziva. Na Slici 6.1 prikazan je maksimalni *peak-to-peak* napon  $U_{p-p\_max}$ .



6.1 Maksimalna *peak-to-peak* vrijednost naponskog odziva koja se koristi za izračun generirane snage  $P_{p-p\_max}$  [49]



Sljedeći parametri za analizu dobivenih podataka su dobivene prosječne vrijednosti napona  $U_{ave\_0.04}$  u periodu titranja od 0,04 sekunde te prosječne vrijednosti napona  $U_{ave\_5}$  u pet uzastopnih „peak-to-peak“ vrijednosti koji su također mjerodavni za izračun generirane snage  $P_{ave\_0.04}$  i  $P_{ave\_5}$ . Na Slici 6.2 označeni su mjerodavni naponi  $U_{ave\_0.04}$  i  $U_{ave\_5}$ .



6.2 Izmjereni prosječni napon  $U_{ave\_0.04}$  u periodu od 0,04 sekunde i prosječni napon  $U_{ave\_5}$  u pet vrhova amplitude [49]

Uvrštavanjem dobivenih vrijednosti napona  $U_{ave\_5}$ ,  $U_{ave\_0.04}$  i  $U_{p-p\_max}$  u jednadžbu 4.2 uzimajući u obzir konstantni optimalni električni otpor od 5 k $\Omega$  izračunavaju se generirane snage  $P_{ave\_5}$ ,  $P_{ave\_0.04}$  i  $P_{p-p\_max}$  koje su mjerodavne za analizu i usporedbu dobivenih rezultata. Prikaz dobivenih generiranih snaga s pripadajućim DoE ulaznim parametrima rotora s trzalicom i izračunatom standardnom devijacijom  $\sigma$  generirane snage  $P_{p-p\_max}$  dani su u Tablici 6.1 [49].

Tablica 6.1 DoE ulazni parametri s dobivenim rezultatima eksperimentalnih mjerenja

| Redni broj rotora | DoE ulazni parametri |                         |                           | Dobiveni rezultati ispitivanja |                   |                   |                      |
|-------------------|----------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
|                   | $l$ , mm             | $I_x$ , mm <sup>4</sup> | $n_0$ , min <sup>-1</sup> | $P_{p-p\_max}$ , mW            | $\pm \sigma$ , mW | $P_{ave\_5}$ , mW | $P_{ave\_0.04}$ , mW |
| 1.                | 6                    | 0,608                   | 311                       | 4,858                          | 0,362             | 3,002             | 1,162                |
| 2.                | 7,5                  | 0,125                   | 360                       | 2,229                          | 0,588             | 1,079             | 0,323                |
| 3.                | 7,5                  | 0,125                   | 98                        | 3,383                          | 0,198             | 1,631             | 0,581                |
| 4.                | 7,5                  | 0,792                   | 360                       | 3,571                          | 0,5               | 1,861             | 0,549                |
| 5.                | 8                    | 0,438                   | 277                       | 2,418                          | 0,176             | 1,229             | 0,414                |
| 6.                | 6                    | 0,258                   | 302                       | 4,917                          | 0,468             | 3,174             | 1,032                |
| 7.                | 8                    | 0,677                   | 139                       | 2,419                          | 0,121             | 1,318             | 0,449                |
| 8.                | 7                    | 0,226                   | 172                       | 2,876                          | 0,242             | 1,523             | 0,502                |
| 9.                | 10                   | 0,582                   | 315                       | 2,465                          | 0,117             | 1,312             | 0,444                |
| 10.               | 9                    | 0,688                   | 214                       | 1,940                          | 0,113             | 1,029             | 0,355                |

|     |    |       |     |       |       |       |       |
|-----|----|-------|-----|-------|-------|-------|-------|
| 11. | 6  | 0,685 | 177 | 4,604 | 0,116 | 3,161 | 1,131 |
| 12. | 8  | 0,692 | 308 | 2,607 | 0,253 | 1,418 | 0,482 |
| 13. | 7  | 0,447 | 135 | 1,701 | 0,048 | 0,965 | 0,336 |
| 14. | 5  | 0,24  | 159 | 5,161 | 0,319 | 3,278 | 1,142 |
| 15. | 10 | 0,522 | 163 | 2,025 | 0,179 | 1,028 | 0,349 |

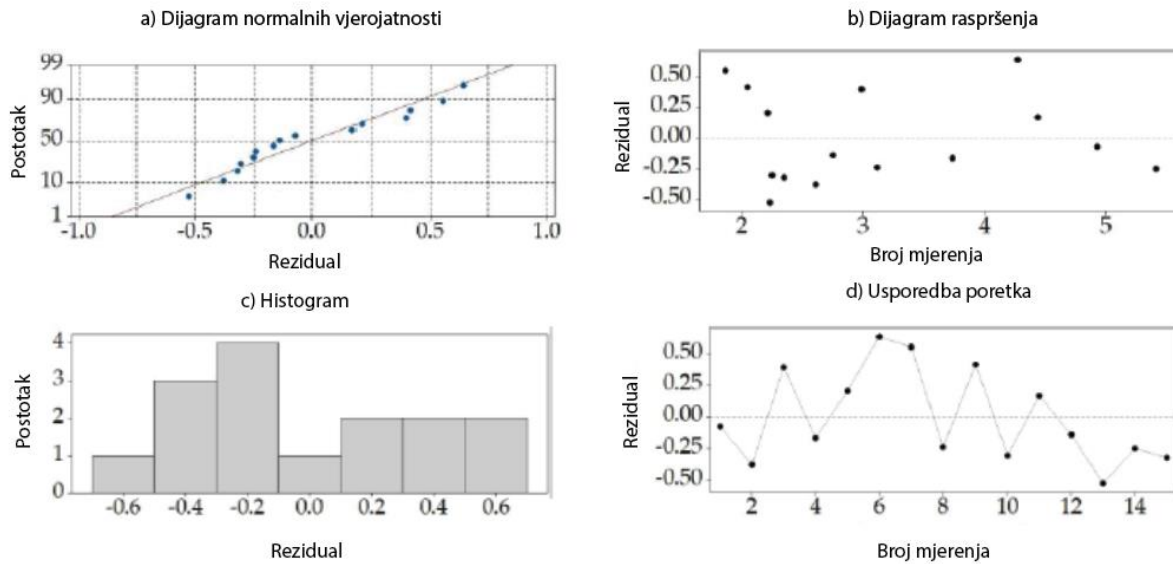
Vidljivo je iz Tablice 6.1 da povećanjem duljine trzalice  $l$  snaga opada, dok se za kraće duljine  $l$  snaga povećava. Zbog povećane krutosti trzalice se, dakle, povećava naponski odziv piezoelektričnog pretvarača. Iako utjecaj na rezultate ima i početni broj okretaja elektromotora, važno je postaviti trzalicu sa što većom krutosti da bi se generirala veća snaga na uređaju. Nadalje, izračunom standardne devijacije primjećujemo da je raspršenost podataka oko srednje vrijednost prihvatljiva, što ukazuje da su podaci relativno blizu srednje vrijednosti te sugerira zadovoljavajuću preciznost i konzistentnost u mjerenjima. Naravno, uspoređujući  $P_{p-p\_max}$  s  $P_{ave\_5}$  i  $P_{ave\_0.04}$  vidljivo je da se s povećanjem vremenskog intervala trzanja smanjuje dobivana snaga.

## 6.2. Kvadratni regresijski model

Na temelju dobivenih podataka, primjenom RSM metode iz poglavlja 4.2 optimizacijom se dobiva kvadratni regresijski model opisan putem jednadžbe 6.1 za izlaznu snagu  $P_{p-p\_max}$  prilikom trzanja piezoelektričnog pretvarača. Prediktivna sposobnost ovog modela ocjenjuje se putem koeficijenta determinacije  $R^2$  koji u rasponu između 0 % i 100 % izražava mjeru ukupne točnosti regresijskog modela. Za promatrani slučaj,  $R^2$  iznosi 90,43 %, što ukazuje na mogućnost predviđanja više od 90 % varijabilnosti analiziranih parametara. Što je veći koeficijent determinacije, to se bolje predviđaju izlazne varijable [53].

$$P_{p-p\_max} = 17,73 - 4,1 \cdot l - 4,5 \cdot I_x + 0,0301 \cdot n + 0,2831 \cdot l^2 + 9,22 \cdot I_x^2 - 0,000041 \cdot n^2 - 0,889 \cdot l \cdot I_x - 0,00192 \cdot l \cdot n + 0,01223 \cdot I_x \cdot n \quad (6.1)$$

Analizom rezidualnih dijagrama moguće je procijeniti adekvatnost modela i njegovu kvalitetu u opisivanju podataka izlazne varijable. Slučajna greška ili ostatak (engl. *rezidual*) predstavlja stohastičko odstupanje od regresijske krivulje. Ovaj koncept obuhvaća sve varijable koje nisu uključene u model, ali ipak utječu na izlaznu varijablu [54]. Na Slici 6.3 prikazana su četiri rezidualna dijagrama za modele kvadratnog polinoma dobivene korištenjem programskog alata Minitab®.



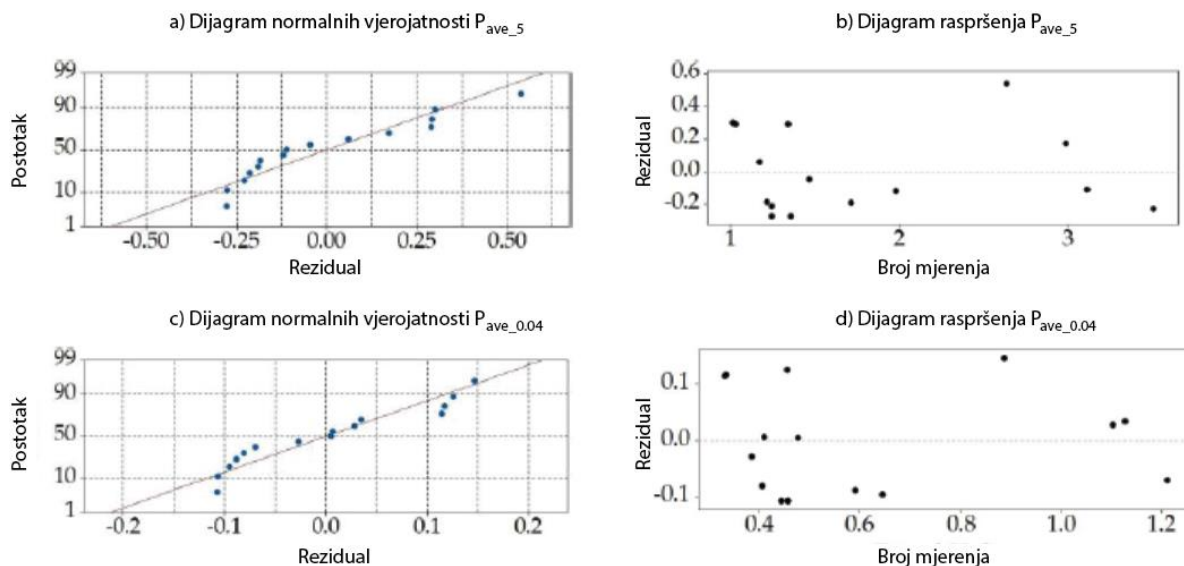
Slika 6.3 Dobiveni modeli slučajnih grešaka za generiranu snagu  $P_{p-p_{max}}$ : (a) dijagram normalnih vjerojatnosti, (b) dijagram raspršenja, (c) histogram ostataka, (d) usporedba poretka

Dobiveni regresijski model, kako prikazuje Slika 6.3, detaljno je analiziran kroz rezidualne kako bi se ocijenila njegova prediktivna učinkovitost kojom se uočava dobro poravnanje normalnih vjerojatnosti (Slika 6.3a) s uskim rasipanjem točaka oko pravca  $R^2 = 1$ . Dijagram raspršenja, koji prikazuje rezidualne u odnosu na predviđene vrijednosti (Slika 6.3b), jasan je pokazatelj slučajnosti ostataka oko nule, sugerirajući minimalno odstupanje u predikcijama i distribuciju sličnu normalnoj. Kvazi-normalna distribucija reziduala također je primjetna u histogramu ostataka (Slika 6.3c). Analiza varijabilnosti reziduala prema redosljedu promatranja (Slika 6.3d) pruža uvid u utjecaj redosljeda eksperimentalnih mjerenja, koji idealno moraju biti nasumično raspoređeni oko središnje crte, što potvrđuje postignuta slučajnost u prikazanim točkama, iz čega se može zaključiti da su reziduali međusobno nezavisni [54]. Zaključak je da su reziduali nasumični i bez međusobne funkcijske veze, što je potvrđeno analizom dijagrama reziduala. Također je primijećena normalna distribucija reziduala, uz laganu asimetričnost što predstavlja dobro ponašanje modela slučajnih grešaka.

Uz opisani model, a s ciljem pronalaženja optimalne kombinacije parametara trzalice koji rezultiraju maksimalnom snagom, uzeta su u obzir i ostala dva modela jednadžbi za  $P_{ave_5}$  i  $P_{ave_0.04}$ :

$$P_{ave_5} = 12,5 - 3,141 \cdot l - 0,82 \cdot I_x + 0,0231 \cdot n + 0,2106 \cdot l^2 + 5,68 \cdot I_x^2 - 0,000034 \cdot n^2 - 0,671 \cdot l \cdot I_x - 0,00108 \cdot l \cdot n + 0,00441 \cdot I_x \cdot n \quad (6.2)$$

$$P_{ave_0.04} = 4,27 - 1,146 \cdot l - 0,84 \cdot I_x + 0,00859 \cdot n + 0,0807 \cdot l^2 + 1,73 \cdot I_x^2 - 0,000013 \cdot n^2 - 0,365 \cdot l \cdot I_x - 0,00391 \cdot l \cdot n + 0,00185 \cdot I_x \cdot n \quad (6.3)$$



Slika 6.4 Rezidualni dijagrami snage u pet uzastopnih vrhova amplitude  $P_{ave\_5}$  i ukupne prosječne snage  $P_{ave\_0,04}$  dobivene u vremenskom intervalu 0,04 sekunde

Prikazani su kvadratni regresijski modeli za ispitivanja unutar pet prosječnih vrhova dobivenih snagom  $P_{ave\_5}$  (Slika 6.4a, b) te modeli za ispitivanje ukupne prosječne snage  $P_{ave\_0,04}$  dobivene u vremenskoj domeni od 0,04 sekunde (Slika 6.4c, d). Vidljivo je da u oba slučaja postoji samo nekoliko točaka koje nisu u idealnom poretku, što znači da se dogodilo tek manje odstupanje na dijagramu normalnih vjerojatnosti, dok su rezultati na dijagramu raspršenosti takvi da su reziduali grupirani i teže bliže donjim vrijednostima. Modeli jednadžbe 6.2 i jednadžbe 6.3 imaju koeficijent determinacije  $R^2_{ave\_0,4} = 91,38 \%$  i  $R^2_{ave\_5} = 91,89 \%$ , odnosno oba modela opisuju više od 90 % varijabilnosti analiziranih podataka. Zaključno, sva tri modela omogućavaju vrlo dobar opis povezanost između zadanih varijabli.

### 6.3. Optimizacija pomoću rješavača

Rješavač (engl. *solver*) je programski alat kojim MS Excel omogućuje pronalazak optimalnih rješenja nekog problema u situacijama gdje se ulazne vrijednosti i ishod mogu precizno izračunati [55]. U sklopu ovoga rada, za optimizaciju procesa korišteni su GRG (engl. *Generalized Reduced Gradient*) nelinearni algoritam i evolucijski (engl. *Evolutionary algorithm*) algoritam. GRG metoda se temelji na promatranju nagiba ciljne funkcije dok se mijenjaju ulazne vrijednosti varijabli; optimalno rješenje postiže se kada odgovarajuće parcijalne derivacije dosegnu nulu. Iako je metoda optimizacije relativno brza, rezultirajuće rješenje može se razlikovati od globalnog optimuma, jer algoritam često stane na lokalnoj optimalnoj vrijednosti koja je najbliža početnim uvjetima [56]. S druge strane, evolucijski algoritam temelji se na teoriji prirodnog odabira i

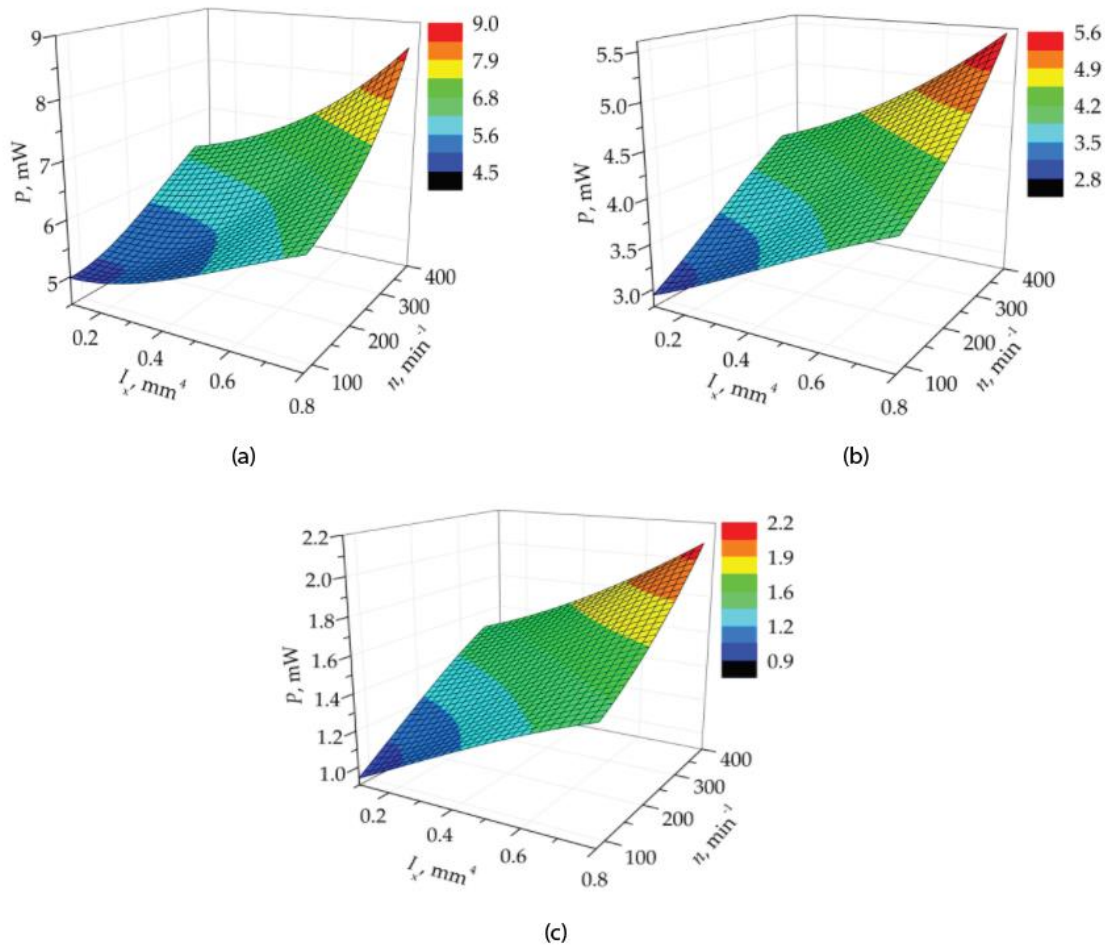
primjetno je sporija ali i robusnija metoda optimizacije koja je sklonija konvergiranju prema globalnom optimalnom rješenju. U ovom slučaju, proces optimizacije počinje s nasumičnom populacijom skupova ulaznih vrijednosti, a rezultati se procjenjuju u odnosu na ciljnu vrijednost. Skup koji proizvodi rješenje najbliže ciljnoj vrijednosti odabran je za generiranje potomstva, koje je mutacija najboljeg skupa prve generacije. Proces se nastavlja sve dok se promjena između dvaju uzastopnih generacija ne smanji na vrlo malu vrijednost. S obzirom da se svaki član populacije u generaciji pojedinačno procjenjuje, ukupni proces je prilično dugotrajan [57].

Korištenjem opisanih optimizacijskih algoritama dobiveni su ključni parametri koji rezultiraju najvećim snagama, što je prikazano u Tablici 6.2.

*Tablica 6.2 Optimalni parametri trzanja korištenjem dvaju različitih algoritama u MS Excel Solveru [49]*

|                         | GRG algoritam  |              |                 | Evolucijski algoritam |              |                 |
|-------------------------|----------------|--------------|-----------------|-----------------------|--------------|-----------------|
|                         | $P_{p-p\_max}$ | $P_{ave\_5}$ | $P_{ave\_0,04}$ | $P_{p-p\_max}$        | $P_{ave\_5}$ | $P_{ave\_0,04}$ |
| $l$ , mm                | 5              | 5            | 5               | 5                     | 5            | 5               |
| $I_v$ , mm <sup>4</sup> | 0,125          | 0,125        | 0,125           | 0,8                   | 0,8          | 0,8             |
| $n$ , min <sup>-1</sup> | 268,64         | 268,40       | 264,09          | 360                   | 312,03       | 312,12          |
| $P$ , mW                | 6,29           | 4,08         | 1,37            | 8,64                  | 5,67         | 2,14            |

Vizualizacijski 3D prikaz Evolucijskog algoritma dobivenih ploha parametra za trzalicu s duljinom  $l = 5$  mm dan je na Slici 6.5 za vrijednosti snage  $P_{p-p\_max}$  (a),  $P_{ave\_5}$  (b) i  $P_{ave\_0,04}$  (c).



Slika 6.5 Grafički prikaz utjecaja parametara trzanja na dobivenu snagu za duljinu  $l = 5$  mm na generiranim snagama  $P_{p-max}$  (a),  $P_{ave-5}$  (b) i  $P_{ave-0,04}$  (c)[49]

Nakon provedene optimizacije, dobivene su optimalne vrijednosti parametara trzanja koji rezultiraju maksimalnim izlaznim snagama te su prikazane u Tablici 6.2. Što se tiče optimalnih parametara geometrije trzalica, obje metode jasno favoriziraju u sva tri slučaja duljinu trzalice  $l$  koja se podudara s donjom granicom odabranog raspona, odnosno  $l = 5$  mm, što potvrđuje tendenciju opisanu u potoglavlju 5.2. Iz Slike 6.5 može se uočiti da je ponašanje odziva vrlo slično u sva tri promatrana slučaja generiranje snage, s malom razlikom u zoni rubnih vrijednosti ispitivanja. Nadalje, u Tablici 6.2 primjećuju se značajno veće dobivene maksimalne snage korištenjem Evolucijskog algoritma, što je objašnjivo prethodno opisanim načinom rada toga algoritma. Iako su rezultati pokazali da obje metode preferiraju istu duljinu trzalice, drugi geometrijski parametri variraju ovisno o metodi optimizacije. Osim toga, brzina trzanja koja rezultira najvećim prosječnim i maksimalnim izlaznim snagama razlikuje se između korištenih algoritama pa se odabire Evolucijski algoritam s najvećim izlaznom snagom koja iznosi  $P = 8,64$  mW. Analiza grafičkog prikaza podataka sugerira da krući dizajn trzalice s kratkom duljinom i visokom brzinom trzanja generira najveće snage. Također je vidljivo da, suprotno naznaci tijekom početnih studija [34], niti jedan od grafičkog prikaza koji se odnose na ovdje razmatrani širi raspon

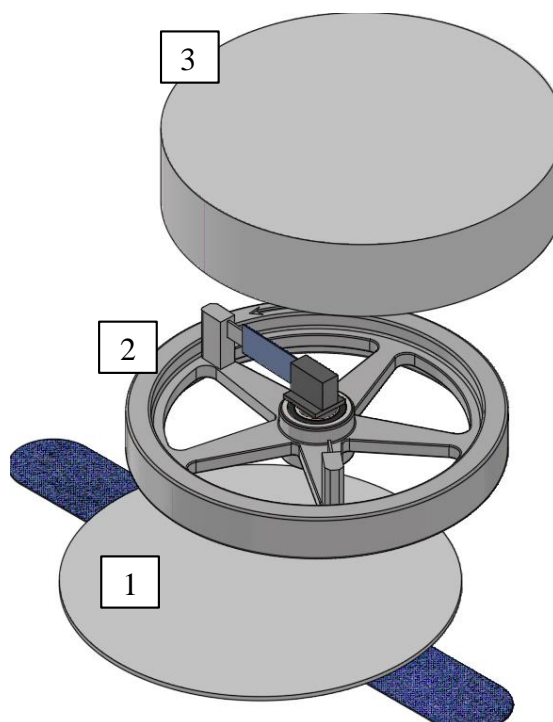
vrijednosti dizajna parametara ne prikazuje učinak sedla, već svi prikazuju jasne globalne maksimume.

Na temelju eksperimentalnih mjerenja provedenih u sklopu ovoga rada moguće je, stoga, zaključiti da optimalna geometrija 3D tiskanih trzalica od polikarbonatnog materijala mora imati što manju duljinu da bi se povećala krutost trzalice, dok je preporučljivo imati što veći broj okretaja vratila na elektromotoru da bi se generirala veća snaga. Međutim, postoji mogućnost da još čvršći dizajn trzalica uzrokuje veće izlazne snage, što bi moglo imati negativne posljedice na zamor materijala te dovesti do loma i nemogućnost korištenja piezoelektričnog pretvarača, pa se stoga savjetuje oprez kod korištenja kraćih i krućih trzalica.

## 7. PRIJEDLOG KONSTRUKCIJE NOSIVOG MEDICINSKOG UREĐAJA

Zaključno na analizu dobivenih podataka u prethodnim poglavljima, kao i na vrednovanje različitih uređaja za prikupljanje niskorazinske energije i učinkovitosti faktora trzalica u dobivanju izlazne snage, cilj ovog poglavlja je predložiti inicijalnu konstrukciju nosivog uređaja koji bi korištenjem trzalice mogao napajati medicinske uređaje, eliminirajući tako potrebu za ekološki neprihvatljivim elektrokemijskim baterijama.

Idejna konstrukcija nosivog uređaja temelji se na principu rotacijskog gibanja ostvarenog pomicanjem ruku ili nogu prilikom hoda, odnosno frekvencijom tijela stvarajući koristan rad. Prihvat uređaja na ručni ili nožni zglob moguć je pomoću remena, a prototip se sastoji od postolja (1) na kojem se nalazi mehanizam (2) i kućišta (3), kao što je prikazano na Slici 7.1.

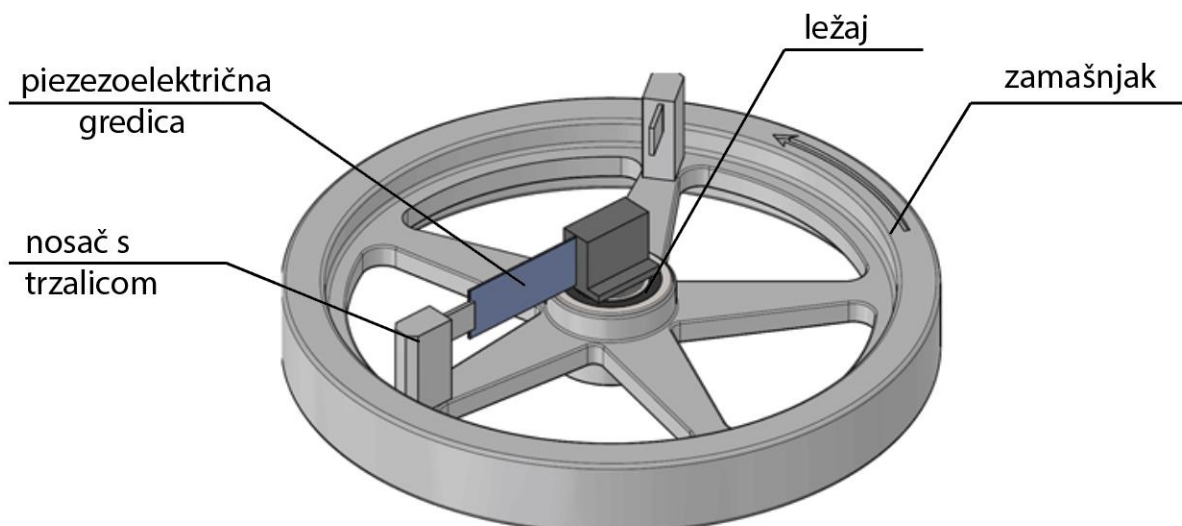


Slika 7.1 Skica idejnog prototipa modela nosivog uređaja: 1 - postolje, 2 - mehanizam i 3 - kućište

Sastavni dijelovi mehanizma idejne konstrukcije su pokretni i nepokretni dijelovi sklopa. Između rotacijskog i nepokretnog dijela sklopa nalazi se ležaj koji služi za smanjivanje trenja i olakšavanje rotacijskog gibanja pokretnog dijela. Nepokretni dio sklopa sadrži vratilo na kojem se nalazi stezni mehanizam koji pričvršćuje piezoelektričnu konzolnu gredicu, a pokretni dio je moguće izvesti aditivnom tehnologijom iz jednog komada te se sastoji od konstrukcije zamašnjaka



na kojem se nalaze dvije konstrukcije nosača trzalica. Prikaz mehanizma s rotacijskim i nepokretnim dijelovima sklopa dan je na Slici 7.2



*Slika 7.2 Skica sastavnih dijelova mehanizma prototipa*

Na svakoj strani nosača nalazi se po jedna optimizirana trzalica koja prilikom rotacijskog gibanja zamašnjaka ostvaruje kontakte sa statičkom piezoelektričnom gredicom. Uzbudom piezoelektrične gredice generirat će se električna energija koja se može koristiti za napajanje medicinskih uređaja. Izlazna snaga konstrukcije s optimiziranim trzalicama najviše će ovisiti o masi konstrukcije zamašnjaka koju je potrebno optimizirati, dok je ovdje dan osnovni princip rada uređaja. Da bi se mogla odrediti izlazna snaga i pronaći idealna konstrukcija, potrebno je provjeriti da li dobivena optimalna trzalica daje najveću snagu na ovom prototipu i vrednovati uređaj, odnosno proširiti istraživanje vodeći računa o konstrukciji, iskoristivosti i praktičnosti primjene uređaja.

## 8. ZAKLJUČAK

Nakon uvoda, ovaj diplomski rad u drugoj cjelini predstavlja niz tehnologija za prikupljanje niskorazinske energije iz okoliša i njezinu pretvorbu u električnu energiju s posebnim ciljem na njihovu ekološku održivost i mogućnosti primjene u sektorima nosivih uređaja. U ovom poglavlju naglasak je na piezoelektričnim principima prikupljanja niskorazinske energije radi bolje razumijevanja istih kroz cijeli rad.

U trećem dijelu rada, analizirano je pet različitih koncepta uređaja za prikupljanje energije korištenjem rotacijskog gibanja. Pomoću metode vrednovanja uređaja, opisani su najpovoljniji uređaji za prikupljanje energije. Glavni kriteriji vrednovanja uključuju konstrukciju, iskoristivost i praktičnost, pri čemu se iskoristivost smatra najvažnijom sa 60% relativne važnosti. Vodeći opisani uređaji su rotirajući elektromagnetski uređaj i piezoelekromagnetski uređaj. Radi dostupnosti piezoelektričnih gredica u Laboratoriju za istraživanje na Tehničkom fakultetu Rijeka, u nastavku rada analiziran je odziv piezoelektričnog pretvarača ovisno o geometriji trzalice koja ga pobuđuje s ciljem predlaganja nove konstrukcije nosivog medicinskog uređaja.

Četvrti dio rada predstavlja početak eksperimentalnog istraživanja u kojem su korišteni eksperimentalni postav, softverski alati i aditivne tehnologije za izradu rotora s trzalicom, koji će pretvarati mehaničku energiju u električnu pomoću piezoelektričnih pretvarača. Nakon uvodnog dijela s opisom eksperimentalnog postava, u petom dijelu rada je detaljno opisan postupak mjerenja odziva piezoelektričnih pretvarača podvrgnutih impulsnoj uzbuđi. To uključuje analizu geometrije trzalica, dobivanje kombinacije nasumičnih parametara ispitivanja, izradu rotora s trzalicom, mjerenje odziva eksperimentalnim postavom te obradu podataka. Geometrija trzalica varira prema duljini i širini, s konstantnom debljinom od 1 mm za optimalni 3D tisak definiran razlučivošću pisaa. Dobivenim kombinacijama nasumičnih parametara ispitivanja obuhvaćene su, korištenjem alata Minitab i DoE - CVT metode, duljine trzalice, moment tromosti, broj okretaja rotora te je time smanjen broj potrebnih mjerenja. Modeliran je CAD model i pomoću 3D tiska su izrađeni rotori s trzalicama. Slijedi provedba mjerenja odziva piezoelektričnih pretvarača na uzbuđu trzalicama pomoću eksperimentalnog postava, a podaci se obrađuju u MS Excelu kako bi se prikupili podaci za analizu.

Analizom eksperimentalnih mjerenja u šestom dijelu rada, pružen je uvid u utjecaj različitih geometrija trzalica na generiranu snagu piezoelektričnih pretvarača. Analizirane su maksimalne vrijednosti napona i prosječne vrijednosti u određenim vremenskim intervalima. Sva tri rezultata analize su pokazali da duljina trzalice značajno utječe na generiranu snagu, pri čemu kraće trzalice

i veći broj okretaja elektromotora rezultiraju većom generiranom snagom. U ovom poglavlju razvijeni su kvadratni regresijski modeli koji su potvrđeni analizom rezidualnih dijagrama s izračunatim koeficijentom determinacije  $R^2 > 90\%$ . Korištenjem rješavača za optimizaciju, dobiveni su optimalni parametri trzalice te je provedena analiza koja pruža smjernice za optimizaciju geometrije i faktora trzalica kako bi se postigla maksimalna učinkovitost generiranja snage.

Naposljetku, u zadnjoj cjelini rada predložena je konstrukcija nosivog medicinskog uređaja koji bi koristio za prikupljanje niskorazinske energiju iz okoliša te da bi se demonstrirala praktičnu primjena prethodnih spoznaja ovoga rada u inženjerskom kontekstu, dajući mogućnost za proširenje ispitivanja i optimizaciju uređaja.

Razumijevanje i implementacija dobivenih rezultata u inovativne ideje ne samo da otvara prostor za unapređenje tehnoloških rješenja koji podržavaju zdravlje i rehabilitaciju pojedinaca, nego i stvara pozitivan utjecaj na društvo i okoliš. Također, nastavno na ovaj rad i njegovim doprinosima u primjeni tehnologije za održivo prikupljanje energije iz okoliša, otvaraju se vrata novim mogućnostima i istraživanjima u području energetske učinkovitosti.

## LITERATURA

- [1] F. Yildiz. (2009). Potential Ambient Energy-Harvesting Sources and Techniques. The Journal of Technology Studies, 35/1, pp. 40-48.
- [2] Zhang, Y., Skafidas, E. (2013). Energy Harvesting Autonomous Sensor Systems: Design, Analysis, and Practical Implementation (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b14572>
- [3] “Kinetic energy”, s Interneta, <https://www.britannica.com/science/kinetic-energy>, 19. svibnja 2023.
- [4] Beeby S. P., Tudor M. J. and White N. M. (2006) Energy harvesting vibration sources for Microsystems applications. Journal of Measurement Science and Technology, 17, pp 175-195.
- [5] Priya, S. and Inman, D.J. (2009) Energy Harvesting Technologies. Springer, New York. <http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-76464-1>
- [6] S. Zelenika, Nastavni materijal iz kolegija Mikro- i nanoelektromehanički sustavi: Zakonitosti skaliranja kod minijaturizacije, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, akad. god. 2021./2022.
- [7] Williams CB, Shearwood C, Harradine MA, Mellor PH, Birch TS, Yates RB (2001) Development of an electromagnetic micro-generator. IEE Proc.-Circuits Devices Syst. 148(6): 337–342.
- [8] “Dielektrična permitivnost”, s Interneta, <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=15002>, 31. svibnja 2023
- [9] Roundy S, Wright P and Pister K. (2002) Micro-electrostatic vibration-to-electricity converters. Proceedings IMECE, pp 1–10.
- [10] C. Wu, A. C. Wang, W. Ding, H. Guo, and Z. L. Wang, (2019) ‘Triboelectric Nanogenerator: A Foundation of the Energy for the New Era’, Adv. Energy Mater., 9/1, 1802906.
- [11] “Nasa Mars Rover”, s Interneta, <https://mars.nasa.gov/mars2020/>, 31. svibnja 2023

- [12] Tian, Zh., Lee, S., Chen, G. (2014). A Comprehensive Review of Heat Transfer in Thermoelectric Materials and Devices. Annual Review of Heat Transfer. 17. 10.1615/AnnualRevHeatTransfer.2014006932.
- [13] Fonash, Steve (2010). Solar Cell Device Physics. 10.1016/C2009-0-19749-0.
- [14] E. Becquerel (1839) Compt. Rend. 9, 561.
- [15] Tran, LG., Cha, HK. Park, WT. (2017). RF power harvesting: a review on designing methodologies and applications. Micro and Nano Syst. 5/14, <https://doi.org/10.1186/s40486-017-0051-0>
- [16] Wang, W., Wang, J., Chen, Z., Wang, R., Lu, K., Sang, Z., and Ju, B. (2020) Research on Asymmetric Hysteresis Modeling and Compensation of Piezoelectric Actuators with PMPI Model. Micromachines 11(4), 357; <https://doi.org/10.3390/mi11040357>
- [17] „Struna“, s Interneta, <http://struna.ihj.hr/naziv/rotacijsko-gibanje/31084/>, 2. lipnja 2022.
- [18] Heywang W., Lubitz K., Wesing W. (2008) Piezoelectricity: Evolution and Future of a Technology. Springer, Berlin, <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68683-5>.
- [19] Chalasani, S., Conrad, J. M. (2008) A Survey of Energy Harvesting Sources for Embedded Systems. University of North Carolina, Charlotte.
- [20] C. R. Bowen, H. A. Kim, P. M. Weaver and S. Dunn. (2014) Piezoelectric and ferroelectric materials and structures for energy harvesting applications. Energy and Environmental Science, 7/1, pp. 25-44.
- [21] “Piezoelectric constants”, s Interneta, <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectric-constants.html>, 21. prosinca 2023.
- [22] H. Liu, J. Zhong, C. Lee, S.-W. Lee i L. Lin. (2018) A comprehensive review on piezoelectric energy harvesting technology: Materials, mechanisms, and applications. Appl. Phys. Rev., 5/041306.
- [23] Gljušćić, P., Zelenika, S., Blažević, D., Kamenar, E. (2019). Kinetic Energy Harvesting for Wearable Medical Sensors. Sensors, 19(22), 414 4922, doi:10.3390/s19224922
- [24] Liu, H., Hou, C., Lin, J., Li, Y., Shi, Q., Chen, T., Sun, L., and Lee, C. (2018) A non-resonant rotational electromagnetic energy harvester for low-frequency and irregular human motion. Appl. Phys. Lett. 113, 203901.

- [25] Zhang, Y., Lee, C. H. (2019) Piezoelectric energy harvesting pedal integrated with a compliant load amplifier. *Advances in Mechanical Engineering*;11(1). doi:[10.1177/1687814018820142](https://doi.org/10.1177/1687814018820142)
- [26] Rodrigues J.J.P.C. et al (2018): „Enabling Technologies for the Internet of Health Things“, *IEEEAccess*, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2789329.
- [27] Fu et al., Rotational energy harvesting for self-powered sensing, *Joule* 5/5, pp 1074-1118, 2021.
- [28] Marszal, M., Witkowski, B., Jankowski, K., Perlikowski, P., and Kapitaniak, T. (2017) Energy harvesting from pendulum oscillations. *Int. J. Non-Linear Mech.* 94, 251–256.
- [29] Anton SR, Sodano HA. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006). *Smart Mater Struct* 2007; 16:R1-21.
- [30] Shao, H., Cheng, P., Chen, R., Xie, L., Sun, N., Shen, Q., Chen, X., Zhu, Q., Zhang, Y., Liu, Y., et al. (2018) Triboelectric–electromagnetic hybrid generator for harvesting blue energy. *Nanomicro. Lett.* 10, 54.
- [31] Gljuščić, P.; Zelenika, S. (2021) Experimental Characterization of Optimized Piezoelectric Energy Harvesters for Wearable Sensor Networks. *Sensors*, 21, 7042. <https://doi.org/10.3390/s21217042>
- [32] Fu, H., Yeatman E.M. (2019) Rotational energy harvesting using bi-stability and frequency up-conversion for low-power sensing applications: Theoretical modelling and experimental validation, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 125, pp. 229-244.
- [33] Shi, G., Chen, J., Peng, Y., Shi, M., Xia, H., Wang, X., Ye, Y., and Xia, Y. (2020) A piezoelectromagnetic coupling multi-directional vibration energy harvester based on frequency up-conversion technique. *Micromachines* 11, 80.
- [34] Marković E., Zelenika S., Gljuščić, P. Perčić M. (2022) Experimental study of the effect of plectrum parameters on the performances of plucked piezoelectric energy harvesters, *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology*, Leach, R. K., Akrofi-Ayesu, A., Nisbet, C. et al. (ur.). Cranfield: European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (EUSPEN), str. 73-76.
- [35] „Precision Engineering Laboratory“, Department of Mechanical Engineering Design, s Interneta, <http://precenglab.riteh.uniri.hr/category/lab-equipment/>, 20. studenog 2023.

- [36] "DC-Micromotors", Faulhaber, s Interneta, <https://www.faulhaber.com/en/products/series/2233s/>, 16. prosinca 2023.
- [37] "What is an oscilloscope?", s Interneta, <https://www.tek.com/en/blog/what-is-an-oscilloscope>, 12. prosinca 2023.
- [38] "1051 Resistance Decade Box", Time Electronics Calibration, Test and Measurement, s Interneta, <https://www.timeelectronics.com/decade-boxes/1051-8-decade-resistance-box/>, 14. prosinca 2023.
- [39] „Ohmov zakon“, Leksikografski zavod Miroslava Krleža, s Interneta, <https://enciklopedija.hr/clanak/elektricna-snaga#clanak>, 16. prosinca 2023.
- [40] "Piezo.com", s Interneta, <https://piezo.com/>, 21. prosinca 2023.
- [41] "Piezo Materials and Properties", s Interneta, <https://piezo.com/pages/piezo-material>, 21. prosinca 2023.
- [42] „Minitab – Response surface“, s Interneta, <https://support.minitab.com/en-us/minitab/20/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/how-to/response-surface/create-response-surface-design/select-a-response-surface-design/>, 16. studenog 2023.
- [43] „Minitab Design of Experiments DOE Response Surface example 1“, s Interneta, <https://www.youtube.com/watch?v=uh9sBFIk-IM>, 16. studenog 2023.
- [44] Harshit, K. D., Davim, J. P. (2021) Fused Deposition Modeling Based 3D Printing, Springer Cham, New York.
- [45] "Flashforge Creator 3 Technical Data", s Interneta, <https://www.flashforge.com/product-detail/flashforge-creator-3-fdm-3d-printer>, 22. prosinca 2023.
- [46] "PolyMax PC", s Interneta, <https://polymaker.com/product/polymax-pc/>, 29. prosinca 2023.
- [47] "Polycarbonate", s Interneta, <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/polycarbonate/>, 29. prosinca 2023.
- [48] "PolyBox – kutija za čuvanje filamenata", s Interneta, <https://www.3djake.hr/polymaker/polybox-kutija-za-cuvanje-filamenata>, 29. prosinca 2023.

- [49] Zelenika S, Gljušćić P, Barukčić A, Perčić M. (2023) Analysis of Influencing Parameters Enhancing the Plucking Efficiency of Piezoelectric Energy Harvesters. *Sensors*. 13; 23(6):3069. doi: 10.3390/s23063069.
- [50] M. Perčić, S. Zelenika, I. Mezić, R. Peter i N. Krstulović (2020). An experimental methodology for the concurrent characterization. *Friction*, 8/3, pp. 577-593.
- [51] "Autodesk Inventor", s Interneta, <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>, 8. veljače 2024.
- [52] Bellulo, A. (2021) Uvod u ekonometriju, Pula: Sveučilište Jurja Dobrile u Puli, Odjel za ekonomiju i turizam „Dr. Mijo Mirković”.
- [53] „Interpret the key results for Analyze Response Surface Design“, Minitab Support, s Interneta, <https://support.minitab.com/en-us/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/how-to/response-surface/analyze-response-surface-design/interpret-the-results/key-results/>, 11. veljače 2024
- [54] „Residual plots for Analyze Factorial Design“, Minitab 21 Support, s Interneta, <https://support.minitab.com/en-us/minitab/19/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/howto/factorial/analyze-factorial-design/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/residual-plots/>, 12. veljače 2024.
- [55] Optimizacija Excel Solverom, s Interneta, <https://www.poslovnaucinkovitost.hr/edukacije/predavanje/optimizacija-excel-solverom1>, 13. veljače 2024
- [56] MS Excel Solver Algorithms Available, s Interneta, <https://engineerexcel.com/excel-solver-solving-method-choose>, 13. veljače 2024
- [57] Optimizacija Excel Solverom, s Interneta, <https://www.poslovnaucinkovitost.hr/edukacije/predavanje/optimizacija-excel-solverom1>, 13. veljače 2024



## LISTA SIMBOLA

| parametri       | opis, mjerna jedinica                                     |
|-----------------|---|
| $A_s$           | površina skaliranja, mm <sup>2</sup>                      |
| $b$             | širina trzalice, mm                                       |
| $C$             | električni kapacitet, C                                   |
| $d$             | piezoelektrični koeficijent deformacije, m/V              |
| $d_{31}$        | piezoelektrični koeficijent deformacije - „31 smjer“, m/V |
| $d_{33}$        | piezoelektrični koeficijent deformacije - „33 smjer“, m/V |
| $E$             | Youngov modul elastičnosti, GPa                           |
| $E_{el}$        | električna energija, J                                    |
| $f$             | frekvencija, Hz   |
| $F_{ploča}$     | elektromagnetska sila između ploča, N                     |
| $g_{31}$        | piezoelektrični koeficijent naprezanja - „31 smjer“, Vm/N |
| $g_{33}$        | piezoelektrični koeficijent naprezanja - „33 smjer“, Vm/N |
| $g_i$           | faktor težine,-   |
| $h$             | debljina trzalice, mm                                     |
| $I_0$           | jakost električne struje, A                               |
| $I_x$           | moment tromosti, mm <sup>4</sup>                          |
| $k$             | elektromehanički koeficijent sprezanja                    |
| $k_{31}$        | elektromehanički koeficijent sprezanja - „31 smjer“, -    |
| $k_{33}$        | elektromehanički koeficijent sprezanja - „33 smjer“, -    |
| $k_M$           | konstanta momenta DC motora, Nm/A                         |
| $K^T_3$         | relativna dielektrična konstanta,-                        |
| $l$             | duljina, mm   |
| $n_0$           | broj okretaja, okr/min                                    |
| $P$             | ukupna dobivena snaga, mW                                 |
| $P_{ave\_0.04}$ | prosječna vrijednost snage u trajanju 0,04 s, mW          |
| $P_{ave\_5}$    | prosječna vrijednost snage u pet uzastopnih uzbuda, mW    |
| $P_{p-p\_max}$  | maksimalni <i>peak-to-peak</i> snaga, mW                  |
| $r$             | prijenosni omjer elektromotora,-                          |
| $R$             | električni otpor, $\Omega$                                |
| $S$             | faktor skaliranja,-                                       |
| $T$             | temperatura, °C   |

|                  |  |
|------------------|--|
| $U$              | električni napon, V                                    |
| $U_{ave_{0.04}}$ | prosječna vrijednost napona u trajanju 0,04 s, V       |
| $U_{ave_5}$      | prosječna vrijednost napona u pet uzastopnih uzbuda, V |
| $U_{max}$        | maksimalni napon, V                                    |
| $U_{min}$        | minimalni napon, V                                     |
| $U_{p-p_{max}}$  | maksimalni <i>peak-to-peak</i> napon, V                |
| $V_{aps}$        | ukupna nevagana apsolutna kvaliteta,-                  |
| $V_g$            | ukupna vagana apsolutna kvaliteta,-                    |
| $X_s$            | skalirana duljina,-                                    |
| $zT$             | faktor korisnosti,-                                    |
| $\rho$           | gustoća, kg/m <sup>3</sup>                             |
| $\sigma$         | standardna devijacija, mW                              |

## POPIS SLIKA

|  |    |
|--|----|
| Slika 2.1 Elektromagnetski generator [5] .....   | 4  |
| Slika 2.2 Učinak veličine mjerila S na skaliranje [6] .....  | 5  |
| Slika 2.3 Grafički prikaz raspoložive snage i gustoće snage elektromagnetskog pretvornika u ovisnosti o dimenziji [5] .....                            | 6  |
| Slika 2.4 Poprečni presjek MEMS elektromagnetskog generatora predloženog 2001. godine [7] .....  | 6  |
| Slika 2.5 Češljasti elektrostatski generator [9] .....   | 9  |
| Slika 2.6 Razlike TENG nanogeneratora: a) CS – TENG način rada, b) LS – TENG način rada, c) SE – TENG način rada, d) FT – TENG način rada [10] .....   | 10 |
| Slika 2.7 Shematski prikaz termoelektričnog generatora [12] .....  | 11 |
| Slika 2.8 Osnovni dijelovi fotonaponske ćelije [28] .....  | 12 |
| Slika 2.9 Konfiguracija piezoelektričnog pretvarača: (a) „33“ način rada, (b) „31“ način rada [19] .....   | 16 |
| Slika 2.10 Piezoelektrična bimorfna konzolna gredica [23] .....  | 17 |
| Slika 2.11 Piezoelektrična unimorfna konzolna gredica [21] .....   | 17 |
| Slika 2.12 Slojevita konstrukcija piezoelektričnog pretvarača [25] .....   | 18 |
| Slika 2.13 Ilustracija korištenja IoT preko biomedicinskih senzora pokretanih ljudskim aktivnostima [26] .....   | 19 |
| Slika 3.1 Model REH uređaja s njihovom [28] .....  | 22 |
| Slika 3.2 Efektivna snaga $P_e$ u odnosu na duljinu njihala $l_r$ [28] .....   | 22 |
| Slika 3.3 Uređaj za prikupljanje energije pomoću elektromagneta [24] .....   | 23 |
| Slika 3.4 Prototip REH uređaja s elektromagnetima: (a) korištenje na ruci; (b) korištenje na nozi [24] .....   | 24 |
| Slika 3.5 Triboelektrični – elektromagnetski hibridni generator: (a) detalj generatora, (b) kompletan uređaj [30] .....                                | 25 |
| Slika 3.6 Princip rada CS – TENG [7] .....   | 25 |
| Slika 3.7 Shematski prikaz REH modela pomoću piezoelektrične gredice u dva stabilna položaja [32] .....  | 27 |
| Slika 3.8 Usporedba jednostranog i dvostranog oscilirajućeg moda piezoelektrične gredice [32] .....  | 27 |
| Slika 3.9 Piezoelektromagnetski višesmjerni vibracijski uređaj [33] .....  | 28 |
| Slika 4.1 Eksperimentalni postav: 1 - izvor napajanja, 2 – osciloskop, 3 – otporna dekada, 4 - sklop za mehaničko trzanje, 5 - računalna potpora ..... | 34 |
| Slika 4.2 Istosmjerni izvor napajanja HY3003D-2 .....  | 35 |

|   |    |
|---|----|
| Slika 4.3 Osciloskop Agilent InfiniiVision DSO – X 2012A.....   | 36 |
| Slika 4.4 Otporna dekada TE 1051 pri iznosu od 5 k $\Omega$ .....   | 37 |
| Slika 4.5 Sklop za mehaničko trzanje: 1 – Vratilo elektromotora na koje se montira rotor s trzalicama, 2 – DC motor s reduktorom, 3 – piezoelektrična gredica, 4 – sklop za učvršćivanje piezoelektrične gredice.....   | 38 |
| Slika 4.6 Komercijalna piezoelektrična konzola proizvođača Piezo.com [39] .....   | 39 |
| Slika 4.7 Naprezanje na savijanje varijacijom različitih vrijednosti progiba vrha konzole na piezoelektričnim konzolnim gredicama [31] .....  | 40 |
| Slika 4.8 Oznaka na piezoelektričnoj gredici radi osiguravanja konstantnog prijeklopa .....   | 41 |
| Slika 4.9 Primjer modela površine odziva u Minitabu [43] .....  | 42 |
| Slika 4.10 3D pisac FlashForge® Creator 3 [44] .....  | 44 |
| Slika 4.11 PolyBox™ spremnik za regulaciju vlažnosti filamenta [48].....  | 45 |
| Slika 5.1 Tlocrt pravokutne trzalice s kotiranim veličinama duljine l i širine b [49] .....   | 47 |
| Slika 5.2 Prikaz modela rotora s dvije pravokutne trzalice (a) te prikaz modela rotora s jednom pravokutnom trzalicom (b), modeliranih pomoću 3D CAD alata Autodesk Inventor®, koji su korišteni u ovome radu [49]..... | 48 |
| Slika 5.3. Slicer s virtualnim radnim prostorom 3D pisca.....   | 51 |
| Slika 5.4 Prikaz izrade rotora s trzalicom tehnologijom 3D tiska.....   | 52 |
| Slika 5.5 Prikaz 3D tiskanih rotora s različitom geometrijom trzalica .....   | 52 |
| Slika 5.6 Neobrađeni podaci mjerenja odziva piezoelektričnog pretvarača .....   | 53 |
| Slika 5.7 Prikaz homogeniziranog skupa podataka jednog mjerenja .....   | 54 |
| 6.1 Maksimalna peak-to-peak vrijednost naponskog odziva koja se koristi za izračun generirane snage $P_{p-p_{max}}$ [49].....   | 56 |
| 6.2 Izmjereni prosječni napon $U_{ave_{0,04}}$ u periodu od 0,04 sekunde i prosječni napon $U_{ave_5}$ u pet vrhova amplitude [49] .....  | 57 |
| Slika 6.3 Dobiveni modeli slučajnih grešaka za generiranu snagu $P_{p-p_{max}}$ : (a) dijagram normalnih vjerojatnosti, (b) dijagram raspršenja, (c) histogram ostataka, (d) usporedba poretka .....                    | 59 |
| Slika 6.4 Rezidualni dijagrami snage u pet uzastopnih vrhova amplitude $P_{ave_5}$ i ukupne prosječne snage $P_{ave_{0,04}}$ dobivene u vremenskom intervalu 0,04 sekunde .....   | 60 |
| Slika 6.5 Grafički prikaz utjecaja parametara trzanja na dobivenu snagu za duljinu $l = 5$ mm na generiranim snagama $P_{p-p_{max}}$ (a), $P_{ave_5}$ (b) i $P_{ave_{0,04}}$ (c)[49].....                               | 62 |
| Slika 7.1 Skica idejnog prototipa modela nosivog uređaja: 1- postolje, 2 - mehanizam i 3- kućište .....   | 64 |
| Slika 7.2 Skica sastavnih dijelova mehanizma prototipa .....  | 65 |

## POPIS TABLICA

|   |    |
|---|----|
| Tablica 2.1 Usporedba alternativnih izvora prikupljanja energije iz okoliša [15] .....  | 13 |
| Tablica 3.1. Karakteristike REH uređaja s elektromagnetima [24] .....   | 24 |
| Tablica 3.2 Karakteristike piezoelektromagnetskog višesmjernog vibracijskog uređaja [33] .....  | 28 |
| Tablica 3.3 Vrednovanje različitih koncepata uređaja .....  | 30 |
| Tablica 4.1 Karakteristike DC motora s reduktorom serije 2233.T 018S [36] .....   | 35 |
| Tablica 4.2 Specifikacija osciloskopa [35] .....  | 36 |
| Tablica 4.3 Svojstva piezokeramika PZT-5A, PZT-5J i PZT-5H [41] .....   | 39 |
| Tablica 4.4 Prednosti i mane PC filameta [47].....  | 45 |
| Tablica 5.1: Prikaz 15 kombinacija ključnih parametara rotora s trzalicom dobivenih<br>programskim alatom Minitab i DoE – CVT metodom ..... | 49 |
| Tablica 5.2: Inicijalni parametri potrebni za 3D tisak .....  | 51 |
| Tablica 6.1 DoE ulazni parametri s dobivenim rezultatima eksperimentalnih mjerenja .....  | 57 |
| Tablica 6.2 Optimalni parametri trzanja korištenjem dvaju različitih algoritama u MS Excel<br>Solveru [49].....                             | 61 |

## SAŽETAK

Diplomski rad detaljno analizira tehnologije za prikupljanje niskorazinske energije iz okoliša i njezinu pretvorbu u električnu energiju s naglaskom na ekološku održivost i primjenu u sektorima nosivih medicinskih uređaja. Korištenjem rotacijskog gibanja istraženo je pet različitih uređaja za prikupljanje energije, od kojih je najperspektivniji uređaj s piezoelektričnim pretvaračem. Eksperimentalna istraživanja fokusiraju se na odziv piezoelektričnih pretvarača u ovisnosti o optimalnoj geometriji trzalice za dobivanje najveće izlazne snage koja se koristi za nosive medicinske uređaje. Postupak uključuje analizu geometrije, proizvodnju 3D tiskanih rotora s trzalicama, mjerenje odziva i obradu podataka u MS Excelu. Rezultati istraživanja pokazuju da duljina trzalice i broj okretaja elektromotora značajno utječu na generiranu snagu, što je potvrđeno kvadratnim regresijskim modelima i optimizacijom parametara pomoću Excel Solvera. Zaključno je predložen koncept konstrukcije nosivog medicinskog uređaja koji bi, prikupljanjem energije iz okoliša, mogao zamijeniti korištenje elektrokemijskih baterija.

Ključne riječi: prikupljanje niskorazinske energije iz okoliša, piezoelektrični pretvarači, DoE, eksperimentalno ispitivanje, nosivi medicinski uređaji

## **ABSTRACT**

The thesis thoroughly analyses technologies for harvesting low-level energy from the environment and converting it into electrical energy, with an emphasis on ecological sustainability and application in the field of wearable medical devices. Through rotational energy harvesting, five different energy harvesting devices were investigated, among which the most promising device was one with a piezoelectric transducer. Experimental investigations focus on the response of piezoelectric transducers based on the optimal geometry of the plectra to achieve maximum output power for use in wearable medical devices. The process involves geometry analysis, manufacturing of 3D printed rotors with plectra, response measurement, and data processing in MS Excel. The research results demonstrate that the length of the transducer and the number of motor rotations significantly impact the generated power, as confirmed by quadratic regression models and parameter optimization using Excel Solver. Finally, a concept for the design of a wearable medical device is proposed, which could replace the use of electrochemical batteries by harnessing energy from the environment.

Keywords: energy harvesting, piezoelectric transducers, DoE, experimental assessment, wearable medical devices