

# Tehnologije prikupljanja niskorazinske energije iz okoliša i njihova primjena u mrežama autonomnih senzora za pametne gradove

---

**Malvić, Mateo**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:650281>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-12**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Sveučilišni preddiplomski studij elektrotehnike

Završni rad

**TEHNOLOGIJE PRIKUPLJANJA NISKORAZINSKE  
ENERGIJE IZ OKOLIŠA I NJIHOVA PRIMJENA U  
MREŽAMA AUTONOMNIH SENZORA ZA PAMETNE  
GRADOVE**

Rijeka, ožujak 2023.

Mateo Malvić

0112059155

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Sveučilišni preddiplomski studij elektrotehnike

Završni rad

**TEHNOLOGIJE PRIKUPLJANJA NISKORAZINSKE  
ENERGIJE IZ OKOLIŠA I NJIHOVA PRIMJENA U  
MREŽAMA AUTONOMNIH SENZORA ZA PAMETNE  
GRADOVE**

Mentor: prof. dr. sc. Saša Zelenika

Rijeka, ožujak 2023.

Mateo Malvić

0112059155

# IZJAVA

Sukladno članku 8. Pravilnika Sveučilišta u Rijeci o izradi završnih radova, završnih ispita i završetku preddiplomskih studija Tehničkih fakulteta, ja, Mateo Malvić, student sveučilišnog preddiplomskog studija elektrotehnike, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad na temu: „Tehnologije prikupljanja niskorazinske energije iz okoliša i njihova primjena u mrežama autonomnih senzora za pametne gradove “ pod mentorstvom prof. dr. sc. Saše Zelenike.

Rijeka, ožujak 2023.

---

Mateo Malvić

0112059155

# SADRŽAJ

1	Uvod.....	1
2	Bežične senzorske mreže .....	4
3	Arhitektura bežičnog senzorskog čvora.....	7
3.1	Kontroler .....	8
3.2	Senzori.....	10
3.3	Komunikacijski uređaji .....	10
3.4	Spremište energije .....	16
4	Principi prikupljanja niskorazinske energije NA kolniku.....	17
4.1	Fotonaponski (FN) članak .....	19
4.1.1	Fotonaponski članci prve generacije.....	23
4.1.2	Fotonaponski članci druge generacije.....	25
4.1.3	Fotonaponski članci treće generacije .....	27
4.1.4	Fotonaponski sustavi četvrte generacije .....	27
4.2	Sustavi za prikupljanje mehaničke energije .....	29
4.3	Sustavi za prikupljanje energije iz temperaturnog gradijenta .....	32
4.3.1	Seebeckov efekt .....	33
4.3.2	Peltierov učinak.....	34
4.3.3	Thomsonov efekt.....	34
4.3.4	Princip rada .....	35
5	Hibridni sustavi.....	37
6	Konstruktivski zahtjevi .....	38
7	Idejna rješenja .....	39
7.1	Rješenje 1: FN/TEG/PEG .....	39
7.2	Rješenje 2: PEG/TEG.....	41
7.3	Rješenje 3: PEG/TEG/FN .....	43
7.4	Evaluacija rješenja.....	46
7.5	Razrada odabranog rješenja.....	48
8	Zaključak.....	50
9	Literatura .....	52
	Sažetak .....	55
	Summary .....	56

## 1 UVOD

Gradovi postaju pametniji, poboljšavajući životne uvjete građana i učinkovitost javnih servisa i usluga grada (Tablica 1.1.). Istraživanja pokazuju da više od polovice svjetske populacije živi u urbanim sredinama, a predviđa se da će se taj udio popeti do 70 posto do 2050. godine [1]. Taj porast donosi sa sobom određene izazove u smislu upravljanja gradovima i gradskom infrastrukturom.

„Dizajni pametnih gradova pokušavaju uključiti što je više moguće različitih tehnologija koje donose dinamiku, inteligenciju i višestruke mogućnosti života u gradu. Srž pametnih gradova u području ambijentalne inteligencije je mogućnost korištenja potrebnih tehnologija koje mogu skenirati okoliš kako bi osjetile kretanja i prilike dostupne u različitim gradskim životnim prostorima. Poželjno je da su te tehnologije po mogućnostima pametne i inteligentne sa snažnim dinamičkim senzoričkim sposobnostima.“ [2]

Pametni gradovi (engl. *smart city*) omogućuju građanima i posjetiteljima mogućnost interakcije s gradom kao što su provjera dostupnosti parkinga u stvarnom vremenu, praćenje stanja prometa na cestama i upravljanje prometnom signalizacijom [3], [4]. Oni omogućuju gradskim vlastima i tvrtkama prilagodbu usluga ondje gdje su one potrebne – jedan od primjera je paljenje ulične rasvjete kada postoji prisutnost ljudi ili automobila uz mogućnost automatskog prepoznavanja kvara kako bi isti bio otklonjen u što kraćem roku.

Takozvana „žetva energije“ je proces prikupljanja niskorazinske energije iz okoliša koja biva pretvorena u iskoristivu električnu energiju. Principi i tehnologije prikupljanja niskorazinske energije iz okoliša se razlikuju te će u ovom završnom radu biti opisani principi i tehnologije koje bi mogle koristiti energiju cestovnog prometa u cilju stvaranja autonomnog bežičnog čvora koji bi energiju cestovnog prometa koristio kao izvor napajanja.

Doista, senzorske mreže infrastruktura su koja omogućuje stvaranje virtualnog okoliša grada u kojem je moguće pratiti stanja određenih sustava u realnom vremenu koristeći veliki broj bežičnih senzorskih čvorova. Ova tehnologija jedna je od najperspektivnijih tehnologija kojom se nastoji postići ambijentalna inteligencija, no potrebno je pronaći rješenja izazova koje ona postavlja pred korisnike. Jedan od najvećih izazova je ograničenje energije i životnog vremena bežičnog senzorskog čvora, odnosno baterije kao spremišta energije unutar njega. Kao moguće rješenje ove problematike ističu se tehnologije prikupljanja niskorazinske energije iz okoliša (EH skraćeno od engl. *energy harvesters*).

Korištenjem sustava za „žetvu energije“ moguće je produžiti životni vijek bežičnog senzorskog čvora, ali i konstruirati autonomni bežični senzorski čvor koji bi koristio ambijentalnu energiju za mjerenje, procesuiranje i komunikaciju. Prilikom dizajniranja autonomnog senzorskog čvora, energija i minimalizacija potrošnje energije jedan je od ključnih faktora. Cilj ovog rada jest osmisliti rješenje hibridni sustav za prikupljanje niskorazinske energije koji koristi dva ili više vrsta različitih izvora energije iz okoliša kako bi se postigla potpuna autonomnost bežičnog senzorskog čvora.

Senzorske mreže i arhitektura bežične senzorske mreže opisani su u drugom poglavlju.

U poglavlju trećem opisana je arhitektura bežičnog senzorskog čvora, a kroz potpoglavlja su opisani pojedini elementi arhitekture bežičnog senzorskog čvora redom: kontroler, senzori, komunikacijski uređaji te izvori energije.

U poglavlju četiri opisani su sustavi za prikupljanje niskorazinske energije iz okoliša s naglaskom na prikupljanje energije u cestovnom prometu, dan je pregled recentnih postignuća u ovom području, s naglaskom na fotoelektričnu, piezoelektričnu i termoelektričnu pretvorbu.

Poglavlje pet bavi se hibridnim sustavima, a u poglavlju šest su dani konstrukcijski zahtjevi prema kojima su osmišljena rješenja.

U poglavlju sedam osmišljena su i vrednovana su tri kombinirana rješenja s ciljem dobivanja hibridnog sustava i većeg iskorištenja ambijentalne energije.

U poglavlju osam dan je zaključak.

Tablica 1.1. Područja i potpodručja primjene tehnologija pametnih gradova [5]

Područje	Potpodručje	Opis
Vlast (više učinkovita)	E -vlast Transparentnost vlasti Javni servisi Javna sigurnost Nadzor grada Odgovor na hitne slučajeve	Poboljšanje unutarnje i vanjske učinkovitosti; mogućnost pristupa službenim dokumentima i politikama organizacijama i građanima; osiguravanje učinkovitosti rada javnih servisa; nadzor i upravljanje javnom sigurnosti; brz i efektivan odgovor na hitne slučajeve
Građanstvo (sretnije)	Javni prijevoz Pametni promet Turizam Zabava Zdravstvo Edukacija Konzumacija Socijalna kohezija	Učinkovitije putovanje i kretanje; pristup kontekstualiziranoj, preciznoj informaciji u stvarnom vremenu, visokokvalitetni bitni javni servisi kao što su školstvo, zdravstvo i sport; obogaćivanje aktivnosti za slobodno vrijeme, komunikacija i dijeljenje sa drugima.
Poslovni subjekti (prosperitetniji)	Upravljanje poduzećima Logistika Opskrbni lanac Transakcija Oglašavanje Inovacija Poduzetništvo Poljoprivreda	Poboljšanje među-upravne učinkovitosti i kvalitete; korištenje učinkovitije logistike i platforme opskrbnog lanca i metoda; šire i točnije oglašavanje; širenje poslovnih partnera i korisnika(kupaca); olakšavanje poduzetništva i investicija; unapređenje poslovne aktivnosti grada, kao što su proizvodnja, prodaja, poljoprivreda i savjetovanje; poticanje inovacija
Okoliš (više održiv)	Pametna mreža Obnovljiva energija Upravljanje vodovodom Upravljanje otpadom Kontrola onečišćenja Gradnja Stanovanje Zajednica Javni prostori	Ispostavljanje održivije, ekonomičnije i sigurnije energije i vodoopskrbe uzimajući u obzir navike građana; korištenje zelene ili energije iz obnovljivih izvora; recikliranje i tretiranje otpada sigurno i učinkovito; smanjenje i prevencija onečišćenja; pružanje mobilnosti, telekomunikacija i svih drugih pogodnosti u različitim dijelovima grada



## 2 BEŽIČNE SENZORSKE MREŽE

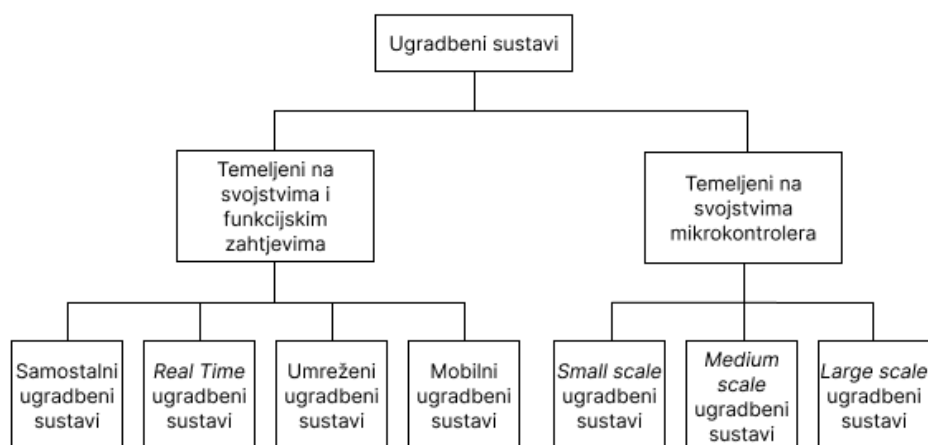
Najčešći postupak procesuiranja digitalnih informacija dešava se na velikim računalima opće namjene, od starijih središnjih računala (engl. *mainframes*) do današnjih laptopa i dlanovnika (engl. *palmtops*). Njihova sposobnost i način procesuiranja informacija uglavnom se temelji na čovjeku kao korisniku sustava [6].

U drugom području primjene, fizički okoliš je u centru pažnje. Računanje se tu koristi kako bi se ostvarila kontrola određenih fizikalnih procesa kao što su kontrola temperature i tlaka u tankovima ili prostorijama. Kod ovakvih primjena računanje je vezano uz kontrolu fizičkog stanja [6]. Računala ugrađena u fizički okoliš nazivaju se ugrađbeni računalni sustavi te su kao takvi usko vezani za njihov kontrolni zadatak kao dio većeg sustava.

Danas su ugrađbena računala prisutna u gotovo svakom uređaju, od kućanskih aparata do velikih industrijskih strojeva (Slika 2.1.). Imaju golemi utjecaj na ljudske živote, a razvijaju se velikom brzinom i postaju dio sve manjih uređaja. Današnja tehnologija, osim mogućnosti računanja i kontrole, od ugrađenih računala zahtijeva i sposobnost komunikacije čime se omogućuje komunikacija: (1) uređaja s uređajem, (2) uređaja s čovjekom i (3) čovjeka s uređajem [7]. Sposobnost komunikacije značajka je koja omogućuje razvitak pametnih tehnologija i naprednih mogućnosti kontrole i upravljanja raznim sustavima kao što su promet i signalizacija u prometu te ulična rasvjeta.

Senzorske mreže su infrastruktura koja omogućuje razvoj ambijentalne inteligencije temeljene na velikom broju senzorskih čvorova žično ili češće bežično povezanih u mrežu [6].

Bežične senzorske mreže (engl. *wireless sensor networks* - WSN) predstavljaju značajan iskorak u odnosu na žične komunikacije budući da pri instalaciji novih senzorskih čvorova nisu potrebne pred radnje za instalaciju kao što su priprema i razvođenje komunikacijskih kablova te održavanje istih. Bežične senzorske mreže rješavaju određene probleme, no donose određene izazove koje je potrebno riješiti. Neki od tih izazova su vezani za prijenos podataka u realnom vremenu, skaliranje mreže, daljinsko upravljanje i upravljanje energijom.[8]



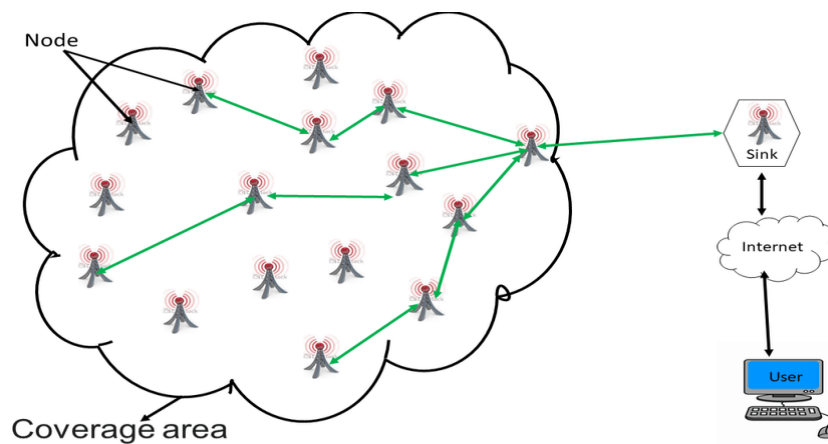
Slika 2.1. Podjela ugradbenih sustava [9]

Bežična senzorska mreža sastoji se od velikog broja senzorskih čvorova (engl. *nodes*) koji prikupljaju informacije o stanju okoliša u kojem se nalaze, čvora u kojem se prikupljaju podaci (engl. *sink*), javne mreže, koordinacijskih čvorova i krajnjeg korisnika (engl. *user*) [10] – Slika 2.2. Mnogo sitnih, pametnih i cijenom pristupačnih senzorskih čvorova su raspoređeni u ciljanom senzorskom polju kako bi prikupljali, raširili i analizirali podatke dobivene iz okoliša. Kako bi se osigurala potpuna povezanost, tolerancija kvarova i duži vijek trajanja, WSN su obično razvijene kao *ad-hoc* mreže<sup>1</sup> koje koriste mrežne protokole višestrukog skoka (engl. *multi-hop*) kako bi dobavili podatke iz okoliša i vršili sveprisutnu kontrolu [10].

Mrežni protokoli za komunikaciju višestrukog skoka omogućuju prijenos podataka čvora s jedne strane do koordinacijskog čvora druge strane fizičkog prostora tako da se podatci prenose preko čvorova koji se nalaze na putu što je vidljivo na Slici 2.2. Ovaj protokol omogućuje povezivanje vrlo mnogo malih bežičnih senzora u *mesh* mrežu koja je prikazana na Slici 3.4. [12].

---

<sup>1</sup> **ad-hoc mreža** je bežična mreža koja omogućava lako povezivanje bežičnih uređaja u određenom fizičkom prostoru bez potrebe za korištenjem infrastrukture kao što su pristupna točka ili bazna stanica [11]



Slika 2.2. Općenita arhitektura bežične senzorske mreže [13]

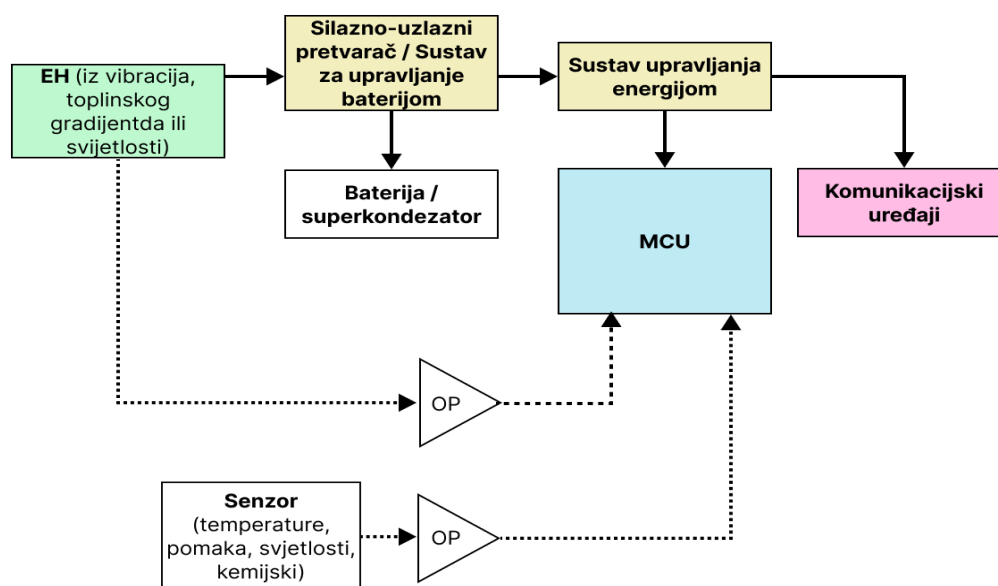
### 3 ARHITEKTURA BEŽIČNOG SENZORSKOG ČVORA

Nakon što su u drugom poglavlju opisane bežične senzorske mreže i njihova arhitektura, kroz treće poglavlje detaljno je opisana arhitektura bežičnog senzorskog čvora kao osnovnog elementa bežične senzorske mreže čiji je autonomni rad predmet ovog završenog rada.

Najčešće, bežični senzorski čvor sastoji se od mikrokontrolera, senzora ili osjetnika, komunikacijskog uređaja i izvora energije napajanja [10] – Slika 3.1. Prilikom dizajniranja bežičnih senzorskih čvorova nužno je uzeti u obzir minimalizaciju potrošnje energije. Kao izvor napajanja mogu se koristiti baterije koje imaju ograničenu energetska zalihu koja je ključan faktor za vijek trajanja senzora. U bežičnim senzorskim mrežama s više stotina ili tisuća čvorova, zamjena baterija kompleksan je i zahtjevan te ponekad i nemoguć zadatak [14]. Kako bi se produžio vijek trajanja i povećala autonomnost bežičnog senzorskog čvora te kako bi se izbjegla potreba zamjene baterija, moguće je prikupljati dostupnu energiju iz okoliša za punjenje baterija ili super kondenzatora koji će omogućiti normalan rad čvora. Uz korištenje sustava za prikupljanje niskorazinske energije iz okoliša s prikladnim senzorskim čvorom s vrlo niskom potrošnjom energije, moguće je proizvesti i autonomni bežični *deploy-and-forget*<sup>2</sup> senzorski čvor [10].

---

<sup>2</sup> *deploy-and-forget* – (hrv. razvij-i-zaboravi) termin koja označava bežične mreže senzora čiji čvorovi omogućuju brz razvoj mreže uz smanjenje kompleksnosti razvitka mreže te uključuju posebno dizajnirane komunikacijske protokole koji osiguravaju neometan i dugotrajan rad mreže.[15]



Slika 3.1. Arhitektura bežičnog senzorskog čvora s implementiranim EH sustavom u funkciji senzora i izvora energije

### 3.1 Kontroler

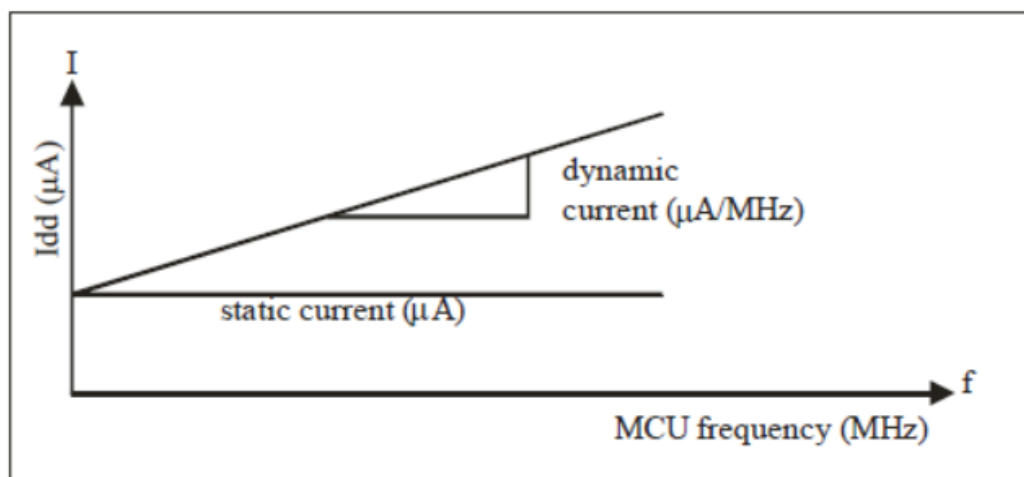
Kontroler je jezgra bežičnog senzorskog čvora. On procesira podatke prikupljene sa senzora, odlučuje kada i gdje će ih poslati, zaprima podatke s drugih senzora i donosi odluke o akcijama aktuatora. Mora izvršavati razne programe, od vremenski ograničenog procesiranja signala i slanja istog koristeći komunikacijske protokole, do programa za specifične primjene [6].

Procesor bežičnog senzorskog čvora se odabire na temelju karakteristika i potrebno je napraviti određene kompromise između fleksibilnosti, performansi, energetske učinkovitosti i cijene. Moguće je koristiti procesor opće svrhe koji se koristi i za osobna računala, no takvi procesori su pre jaki i troše previše energije pa je potrebno pronaći jednostavniji procesor koji je dizajniran za primjenu u ugradbenim sustavima. Takve procesore nazivamo mikrokontroleri. Osim centralne procesorske jedinice (skraćeno CPU od engl. *Central Processing Unit*), mikrokontroleri imaju i jedinicu za pohranu podataka [16].

Jedinica za pohranu čvora obično sadrži *flash* memoriju, na kojoj je pohranjen programski kod, i radnu memoriju (RAM), koja sprema informacije sa senzora i podatke potrebne za računanje [16].

Glavna karakteristika koja mikrokontrolere čini prikladnim za ugradbene sustave jest njihova fleksibilnost kada je riječ o povezivanju s drugim uređajima kao što su senzori. Skup instrukcija koje mikrokontroler izvodi odgovoran je za vremenski ograničeno procesuiranje signala, a pritom koriste puno manju količinu energije [6]. Bitna karakteristika procesora u senzorskom čvoru su različiti načini rada. Aktivno, neaktivno i stanje mirovanja predstavljaju minimalan broj načina rada. Ova značajka vrlo je bitna kako bi se sačuvalo što je više moguće energije bez ometanja rada procesora [16].

U aktivnom načinu rada mikrokontroler troši puno energije u odnosu načine rada koji štede energiju, budući da crpi dvije komponente struje (Slika 3.2.): statičku struju (engl. *static current*), koja je rezultat curenja struje koju koriste komponente mikrokontrolera kao što su *flash* memorija, ROM, itd., te dinamičku struju (engl. *dynamic current*), koja je linearno proporcionalna frekvenciji radnog takta samog mikrokontrolera. U tablici 2.1 navedeni su mikrokontroleri razvrstani prema veličini instrukcijske riječi [17].



Slika 3.2. Struja koja crpi mikrokontroler [17]

Bežični senzorski čvor zahtjeva procesor ultraniske potrošnje električne energije koji je u stanju mirovanja u dugim intervalima, obično više 99% posto vremena, čime se postiže značajna ušteda energije. Djelatni ciklus (engl. *duty cycle*) čvora sastoji se od brzog buđenja, izvođenja mjerenja, komunikacijskih i kontrolnih funkcija i povratka u način rada mirovanja.

### 3.2 Senzori

Prema Fradenu: „Senzor je uređaj koji prima pobudu na koju odgovara električnim signalom.“ Pobuda je definirana kao količina, svojstvo ili stanje koje je primljeno i pretvoreno u električni signal [18].

Može se reći da su senzori elektronički sklopovi koji električnim signalom odgovaraju na ulazno fizikalno svojstvo, taj je električni signal kompatibilan sa elektroničkim sklopovima kao što su i bežični senzorski čvorovi. Senzori su zapravo pretvornici energije koji prenose informaciju, a da bi došlo do prijenosa informacije mora doći do prijenosa energije[18].

Svakodnevno se senzori koriste u raznim uređajima kao što su automobili, strojevi, pametni telefoni, medicina i robotika. Senzori se mogu podijeliti u razne kategorije: senzori buke i vibracija, automobilski i senzori u transportu, kemijski senzori, strujni i naponski električni senzori, senzori vlage i vlažnosti zraka i drugi, senzori temperature i drugi [19].

### 3.3 Komunikacijski uređaji

Komunikacijski uređaj omogućuje razmjenu podataka između čvorova. U nekim slučajevima žična komunikacija je izabrana metoda i kao takva se često primjenjuje u mnogim senzorskim konfiguracijama. Bežična komunikacija sve je češće primjenjivana i interesantnija metoda. Ovo područje od iznimne je važnosti za napredak „interneta stvari“<sup>3</sup> (IoT skraćeno od engl. *internet of things*) i pametnih tehnologija [10].

---

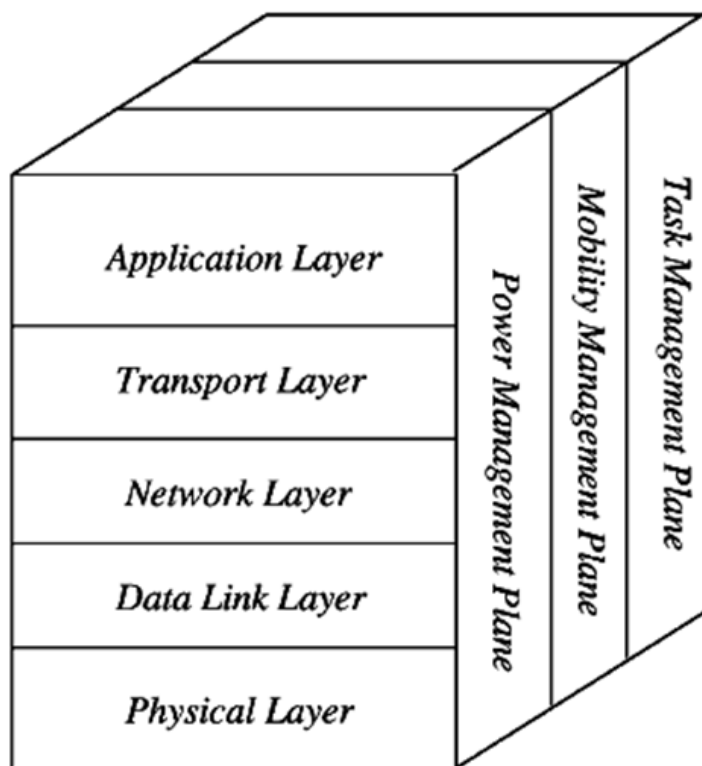
<sup>3</sup> „Internet stvari“ (IoT) opisuje se kao mreža fizičkih objekata – „stvari“ – u koje su ugrađeni senzori, softver i druge tehnologije u cilju povezivanja i razmjene podataka s drugim uređajima i sustavima putem interneta. [20]

Osnovni komunikacijski proces sastoji se od slanja podataka od izvora do odredišta. Ako je potrebno da bežični senzorski čvorovi žele međusobno komunicirati, bežični senzorski čvor na izvoru generira informaciju koja se enkodira i odašilje prema odredištu, a bežični senzorski čvor odredišta prima informaciju i dekodira je za krajnjeg korisnika. Ovaj proces logički je podijeljen u definiranu sekvencu događaja ili akcija, gdje individualni entiteti tvore slojeve komunikacijskog stoga (engl. *stack*). Stog WSN protokola prikazan na Slici 3.3. sadrži 5 mrežnih slojeva: (1) fizički sloj (engl. *physical layer* - PHY), (2) sloj podatkovne veze (engl. *data link layer*), (3) mrežni sloj (engl. *network layer*), (4) transportni sloj (engl. *transport layer*) i (5) aplikacijski sloj (engl. *application layer*)[10].



Tablica 3.1. Snaga mikrokontrolera i senzorski čvorovi u kojima su primijenjeni [17]

CPU	Napon izvora [V]	Snaga (aktivna) [mW]	Snaga (mirovanje) ( $\mu$ W)	Senzorski čvor
<b>4 bitni CPU</b>				
EM6603	1,2-3,6	0,0054	0,3	
EM6605	1,8-5,5	0,012	0,9	
<b>8 bitni CPU</b>				
ATtiny 261V/ 461V/861V	1,8-5,5	0,38mA @1,8V 1MHz	0,1	
PIC16F877	2-5,5	1,8	3	CIT
AT90LS8535	4-6	15	45	WeC Rene
ATMega163L	2,7-5,5	15	3	Rene2 Dot
ATMega103L	2,7-3,6	15,5	60	Mica IBadge
C8051F311	2,7-3,6	21	0,3	Parasitic
ATMega128L	2,7-5,5	26,7	83,15	Mica Mica2Dot Mica2 BTnode
PIC18F452	2-5,5	40,2	24	EnOcean TCM
80C51RD5+	2,7-5,5	48	150	RFRAIN
<b>16 bitni CPU</b>				
MSP430F149	1,8-6	3	15	Eyes, BSN
MSP430F1611	1,8-3,6	3 1,5	15 6	Telos, SNoW
<b>32 bitni CPU</b>				
AtmelAT91 ARM Thumb	2,7-3,6	114	480	
Intel PXA271	2,6-3,8	193	1800	iMote2
Intel StrongArm SA1100	3-3,6	230	25	WINS, $\mu$ AMPS



Slika 3.3. Stog protokol (engl. stack) bežične senzorske mreže [21]

Fizički sloj na najnižoj razini prima i odašilja podatke. Prilikom dizajniranja fizičkog sloja, energetska učinkovitost važnija je od faktora poput propagacije i slabljenja signala. Energetski učinkoviti fizički sloj trenutni je predmet istraživanja u cilju konstrukcije sitnog, jeftinog uređaja niske potrošnje energije koji je primopredajnik, senzor i procesorska jedinica u jednom. Idući viši sloj je sloj podatkovne veze koji osigurava stabilnu komunikaciju od točke do točke ili od točke do više točaka. Ovaj sloj isto se dizajnira energetski odgovorno te se nastoje smanjiti potencijalne kolizije među susjednim signalima zbog velikog okolišnog šuma i mobilnosti samih senzorskih čvorova. U ovom sloju WSN-a mogu biti implementirani štedni načini rada od kojih je najočitiji isključenje primopredajnika kada se ne koristi. Prijedlog dinamičkog upravljanja energijom predlaže pet štednih načina rada i istražuje načine tranzicije između različitih načina [10].

Mrežni sloj zadužen je za usmjeravanje podataka s transportnog sloja. Protokol za usmjeravanje podataka mrežnog sloja mora biti efikasan te pridonijeti uštedi energije i životnom vijeku senzorskog čvora. Transportni sloj pomaže u održavanju toka podataka ako aplikacija senzorske mreže to zahtijeva. Ovisno o zadacima senzora, različite senzorske aplikacije mogu biti ugrađene i korištene u aplikacijskom sloju [10].

Za razliku od tradicionalnih mreža, gdje je prioritet ostvarivanje visoko kvalitetnog servisa, očuvanje energije je prioritet u bežičnim senzorskim mrežama .

2000. godine ZigBee i IEEE 802 radna grupa 15 su se posvetili zadatku standardizacije *low-power, low-cost* bežične mreže u rezidencijalnom i industrijskom okruženju. IEEE-ijev odbor za nove standarde dodijelio je zadatak razvoja LR-WPAN(od engl. *low rate-wireless personal area network*) standarda koji se danas naziva 802.15.4., a odnosni se na standardizaciju fizičkog sloja i sloja podatkovne veze [10].

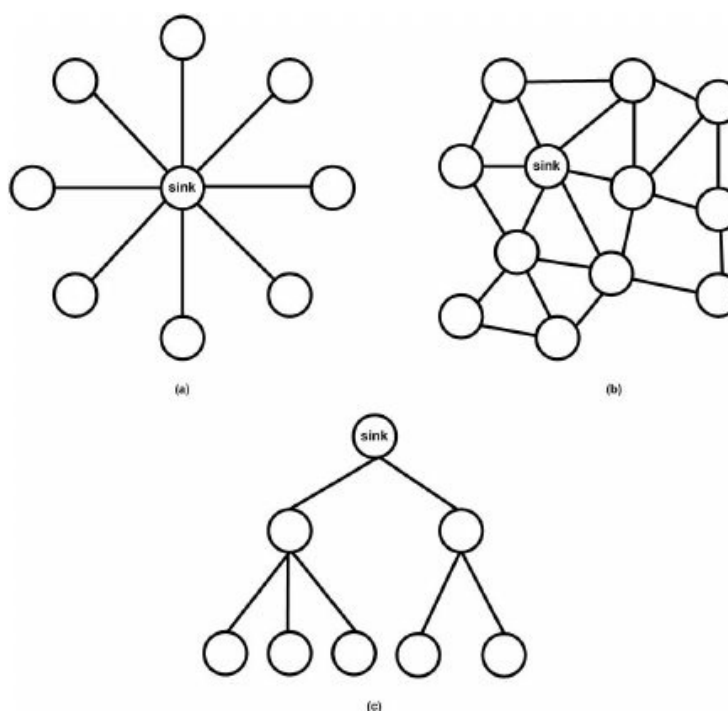
Temeljen na IEEE 802.15.4. standardu, ZigBee je standardizirao protokole u gornjim slojevima komunikacijskog stoga. ZigBee tehnologije rade na tri frekvencije: 2.4 GHz, 900 MHz i 868 MHz. ZigBee protokoli su protokoli otvorenog pristupa, što omogućuje raznim proizvođačima implementaciju protokola prilikom konstruiranja svojih uređaja. odnosno povezivanje uređaja različitih proizvođača [10].

Savez<sup>4</sup> koji se bavi standardizacijom povezivosti uključuje članove renomiranih svjetskih kompanija kao što su Amazon, Apple, Google, Leedarson i mnogi drugi. Prednosti ZigBee tehnologija su visoka propusnost, simetrična komunikacija i različite topologije koje podržava; neki od nedostataka su ograničeni domet, niska pouzdanost i kompleksnost pri postavljanju [22].

---

<sup>4</sup> *Connectivity Standards Alliance* savez je koji okuplja grupu kompanija koja održava i objavljuje ZigBee standard, osnovan je 2002. godine, a broji preko 500 kompanija koje su članice saveza.

LoRa je tehnologija dugog dometa s niskom potrošnjom energije koja koristi ISM pojas. Cilj ove tehnologije je povećati vijek trajanja baterije senzora i reducirati cijenu uređaja. LoRa koristi CSS modulaciju<sup>5</sup> kako bi održala nisku potrošnju energije uz povećanje komunikacijskog dometa. LoRaWAN je bežični komunikacijski protokol razvijen od strane LoRa saveza kao odgovor na izazove koje donose IoT tehnologije. LoRa se koristi za komunikacije jednostrukog skoka gdje je svaki čvor povezan sa koordinacijskim čvorom (engl. sink), te podržava samo zvjezdastu topologiju (Slika 3.4.a) što je njen nedostatak u odnosu na ZigBee [10].



*Slika 3.4. Topologije bežičnih senzorskih mreža: (a) zvjezdasta topologija; (b) mesh topologija omogućuje komunikaciju višestrukog skoka (engl. multi-hop) gdje svaki čvor može međusobno komunicirati, a informacije s udaljenih čvorova se prosleđuju prema koordinacijskom čvoru putem drugih čvorova koji im se nalaze na putu ; (c) razgranata topologija*

---

<sup>5</sup> CSS (Spektar širenja cvrkutanja) (engl. *Chirp spread spectrum*) modulacija koristi metodu širenja frekvencije kao tehniku modulacije. Takozvani „chirp“ je sinusoidan signal čija se frekvencija tijekom vremena povećava ili smanjuje. [23]

### 3.4 Spremište energije

Spremište energije igra važnu ulogu kada je riječ o bežičnom senzorskom čvoru i prikupljanju niskorazinske energije iz okoliša te zbog toga odabir spremišta energije predstavlja zadatak primarne važnosti. Punjive baterije su čest izbor pri konstrukciji bežičnog senzorskog čvora. Punjive baterije spremišta su energije koje je moguće puniti reverznom unutarnjom kemijskom reakcijom. Visina izlaznog napona i gustoća energije jedan je od bitnih parametara za odabir baterije, a dvije tehnologije se ističu kao dobre opcije za bežične senzorske čvorove: nikal-metal-hidridna baterija i baterija s litijem. Litijeve baterije imaju visoki izlazni napon i energetske gustoću, efikasne su i relativno sporo se prazne. [12]

Sa baterijama ili samostalno, superkondenzatori mogu biti korišteni kao spremišta energije u bežičnim senzorskim mrežama. Oni također mogu pohranjivati naboje, ali je njihova brzina pražnjenja naboja puno veća nego li je to slučaj kod baterija, a prednost im je brzo punjenje i pražnjenje te to što ne pate od gubitka kapaciteta pohrane energije kao što je to slučaj kod punjivih baterija. [12]

U ovom poglavlju opisani su bežični senzorski čvorovi i tipične komponente njihove arhitekture.

## 4 PRINCIPI PRIKUPLJANJA NISKORAZINSKE ENERGIJE NA KOLNIKU

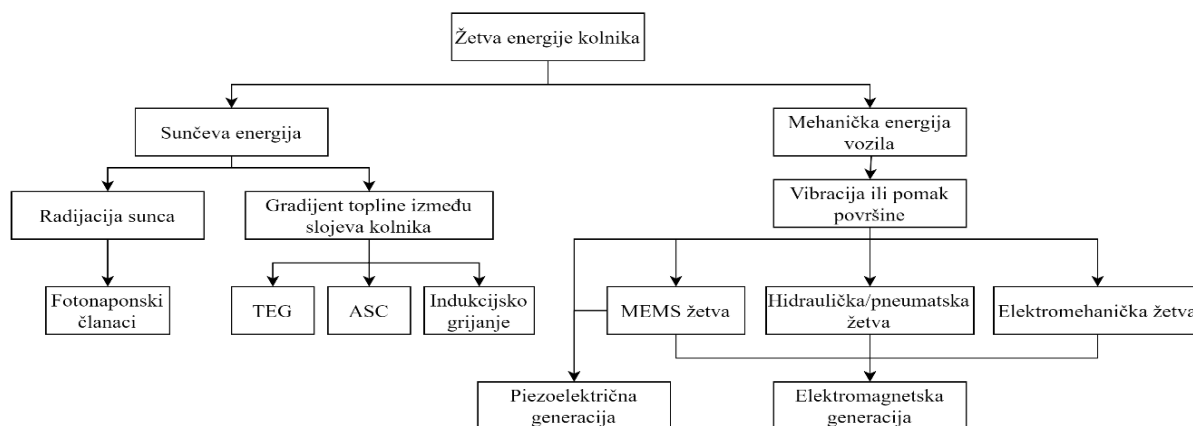
Nakon što su u 3. poglavlju opisani glavni dijelovi arhitekture bežičnog senzorskog čvora, ovdje će se obraditi principi prikupljanja niskorazinske energije na kolniku koji su potrebni kako bi se konstruirao autonomni bežični senzorski čvor. Naglasak u ovom poglavlju biti će na sustavima za pretvorbu Sunčeve odnosno svjetlosne, mehaničke i toplinske energije.

Prikupljanje i pretvorba niskorazinske<sup>6</sup> energije iz okoliša, tema je brojnih istraživanja jer postoji potencijal da će ta tehnologija u potpunosti zamijeniti ili produžiti životni vijek baterije u uređajima niske potrošnje kao što su bežični senzorski čvorovi opisani u poglavlju 2.2., jer upravo baterija predstavlja najveće ograničenje u pogledu životnog vijeka bežičnog senzorskog čvora [].

Prednosti žetve energije jesu ekološka prihvatljivost i niski troškovi održavanja u odnosu na baterije kao izvore energije. Brzi razvoj elektroničkih sklopova niske potrošnje energije posljednjih godina omogućuje zamjenu baterije sustavom za prikupljanje i pretvorbu niskorazinske energije iz okoliša energije. Prikupljanjem energije s kolnika ceste (engl. *road pavement energy harvesting*), ovisno o tehnologiji prikupljaju se različiti oblici neiskorištene energije iz okoliša (npr. kinetička, svjetlosna, toplinska) što je prikazano na slici 3.4.

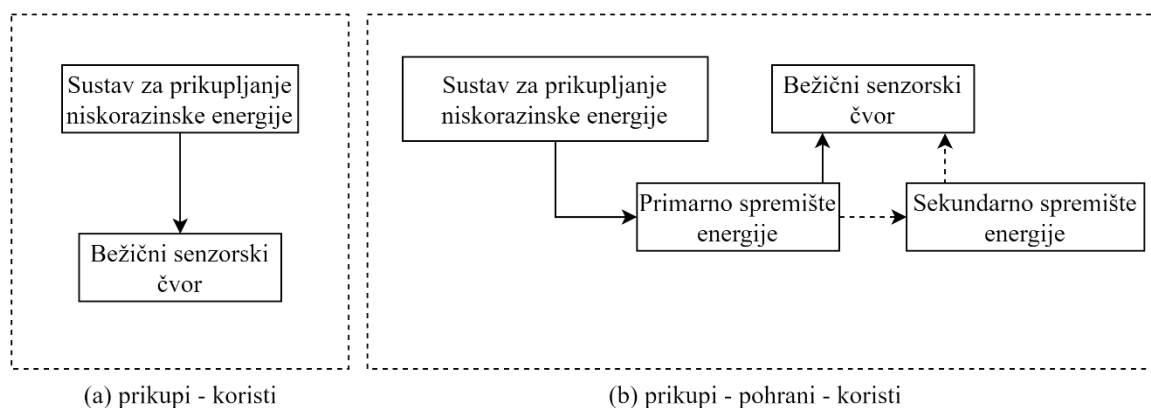
---

<sup>6</sup> Reda veličine  $\mu\text{W}$  –  $\text{mW}$ .



Slika 4.1. Principi prikupljanja niskorazinske energije kolnika [24]

Sa Slike 4.1. je vidljivo da je moguće prikupljati energiju Sunca (engl. *Solar energy*) te mehaničku energiju vozila (engl. *vehicle mechanical energy*). Tu energiju moguće je koristiti odmah za napajanje senzora kao što je prikazano na slici 4.2(a), ili ju je moguće pohranjivati u spremištu energije poput baterija ili superkondenzatora (potpoglavlje 4.4) te koristiti za napajanje bežičnih senzorskih čvorova što je prikazano na Slici 4.2(b).



Slika 4.2. Arhitektura sustava za žetvu energije: (a) bez spremnika energije i (b) sa spremnikom energije [12]

Energija Sunca emitira se u obliku radiovalova u vidljivom i nevidljivom spektru, odnosno kao Sunčevo zračenje (engl. *Solar radiation*) koje je moguće direktno prikupljati putem fotonaponskih članaka (engl. *photovoltaic cells*) ili posredno kada se zagrije površinski sloj kolnika u obliku gradijenta temperature između površinskog i dubljih slojeva kolnika (engl. *thermal gradients on RP layers*).

Osim Sunčeve energije moguće je prikupljati i mehaničku energiju vozila koja se manifestira u obliku vibracija ili pomaka. Tehnologije koje se koriste za prikupljanje bit će opisane u nastavku poglavlja.

#### 4.1 Fotonaponski (FN) članak

Fotonaponski članak (engl. *Photovoltaic cell*, FN) je nemehanički uređaj koji direktno pretvara Sunčevo zračenje u električnu energiju. FN članci se mogu podijeliti na tri podvrste ovisno o području primjene:

- (1) za unutarnju primjenu,
- (2) za vanjsku primjenu i
- (3) za miješanu (unutarnju i vanjsku) primjenu.

Područje primjene ovisi o poluvodičkoj tehnologiji, odnosno materijalu, no o tome će biti više rečeno u nastavku poglavlja nakon kratkog povijesnog pregleda razvoja fotonaponskih tehnologija.

Francuski fizičar Edmond Becquerel zaslužan je za otkriće fotonaponskog efekta do kojeg je došao slučajno dok je s ocem radio na fizici poluvodiča 1839. godine. Prvi fotonaponski članak izumio je Charles Fritts 1883. godine, te je već 1884. godine popločan prvi krov solarnim panelima koristeći Frittsove članke napravljene od selena s vrlo tankim slojem zlata. Zahvaljujući svojstvima selena ti članci imali su vrlo nisku električnu učinkovitost, oko 1%, te kao takvi nisu pronašli svoje mjesto za opskrbu energijom [25].



Dvadesetak godina kasnije, 1905. godine, Albert Einstein u časopisu „*Annalen Der Physik*“ izdaje četiri značajna teoretska rada, a u jednom od njih opisuje ranije opaženi fotoelektrični učinak, za što je 1922. godine primio Nobelovu nagradu za fiziku [25].

U *Bell Labs*-u 1954. godine rođena je fotonaponska tehnologija kada su Daryl Chapin, Calvin Fuler i Gerald Pearson razvili fotonaponski članak od silicija koji je pretvarajući, dozračenu energiju Sunca, mogao proizvesti dovoljnu količinu energije za svakodnevne potrebe [25].

*Bell Telephone Laboratories* proizvodi silicijev FN članak s učinkovitosti od 4%, a kasnije postižu i učinkovitost od 11%. Nakon ovih otkrića započinje brži razvoj optoelektronike, a time i FN ćelija koje postaju sve učinkovitije [25].

FN članak (ili ćelija) osnovni je gradivni element FN sustava za prikupljanje i pretvorbu energije. Pojedini članci veličinom mogu varirati od oko 1 centimetra do oko 10 centimetara, s proizvodnjom od 1 do 2 W koja su dostatna za napajanje manjih uređaja niske potrošnje energije kao što su bežični senzorski čvorovi [10].

Princip rada FN članka temelji se na PN spoju koji se dobiva tehnološkim spojem dva različito dopirana poluvodiča. P – tip dobiti će se dopiranjem silicija (Si) trovalentnim atomima kao što su bor (B), aluminij (Al), indij (In), a n – tip dopiranjem petvalentnim atomima kao što je fosfor (P) i drugi [26].

Sunčeva svjetlost koja upada na površinu sunčeve ćelije se reflektira s te površine. Ako je energija fotona:  $E_{ph} = hf$  gdje je  $h$  – Planckova konstanta,  $m^2kg/s$ ; a  $f$  – frekvencija svjetlosti, Hz; manja od energije energetskog rascjepa između valentne i vodljive vrpce poluvodiča, koju je potrebno predati elektronu, tada će svjetlost biti direktno propuštena iz poluvodiča bez apsorpcije. U slučaju kada je energija fotona veća od energije energetskog rascjepa poluvodičkog materijala, tada će materijal apsorbirati tu energiju i doći će do pobuđivanja elektrona koji će prijeći iz valentnog u vodljivi pojas te će se generirati par elektron – šupljina što se u elektronici naziva svjetlosne generacije. Svjetlosne generacije će se dešavati unutar osiromašenog područja PN spoja, a pod djelovanjem ugrađenog električnog polja elektroni će prijeći u n – područje, a šupljine u p – područje poluvodiča [27].

Najčešća metrika koja se koristi prilikom procjene radnih karakteristika fotonaponskih tehnologija je korisnost odnosno učinkovitost  $\eta$ , koja predstavlja omjer izlazne električne energije i ulazne svjetlosne energije kao što je navedeno u jednadžbi 4.1. [28]:

$$\eta = \frac{E_{el}}{E_{sol}} \quad (4.1)$$

gdje je:

$E_{el}$  – izlazna električna energija, J

$E_{sol}$  – ulazna energija zračenja (najčešće Sunca), J

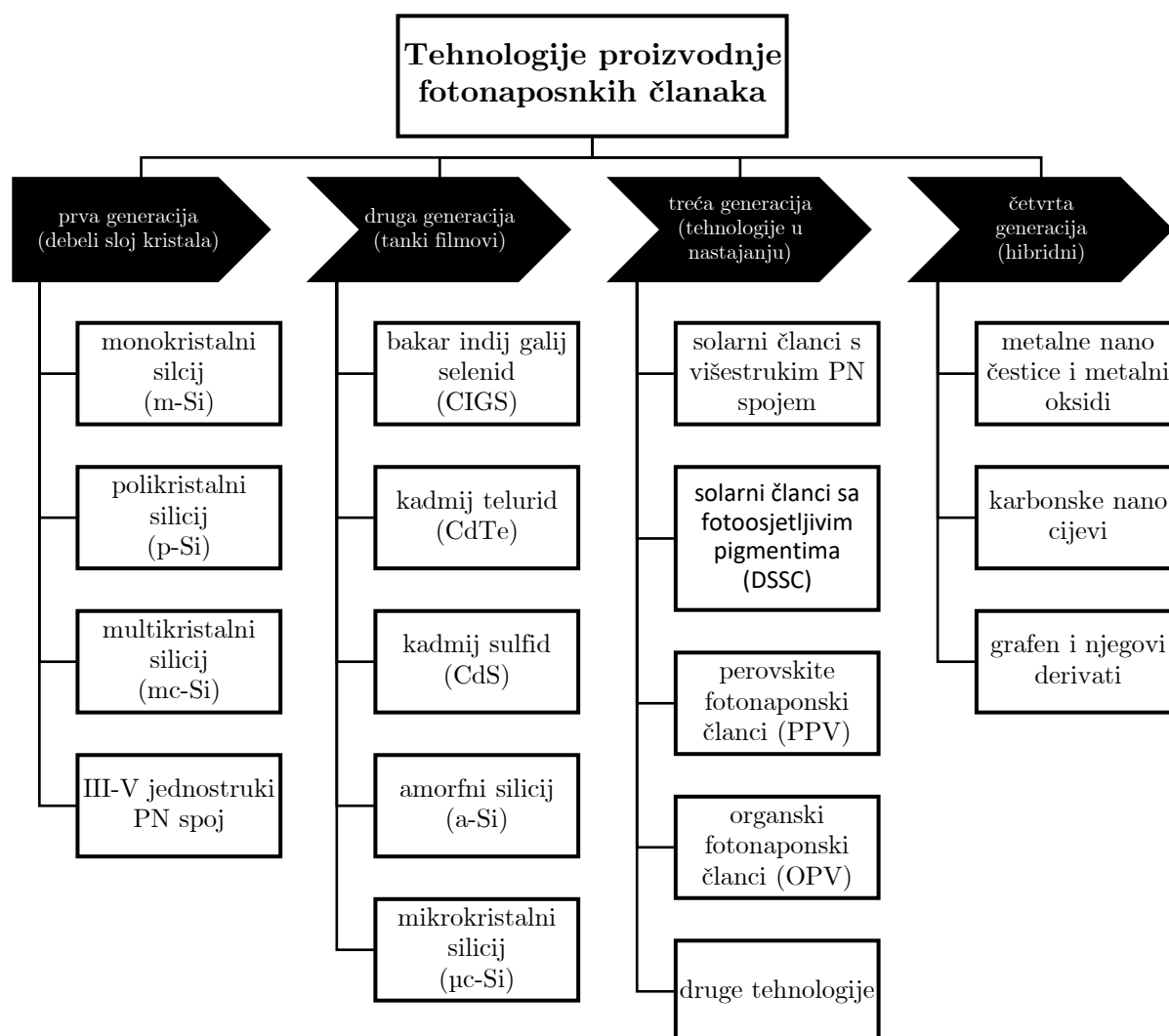
Učinkovitost kombinira različite komponente karakteristika sustava kao što su struja kratkog spoja, napon otvorenih stezaljki i faktor punjenja (engl. *fill factor*), koji u pravilu ovise o značajkama materijala i proizvodnim defektima [29].

Isplativost izrade fotonaponske ćelije i njezina učinkovitost ovise o materijalu od kojeg je izrađena. Velik broj istraživanja proveden je u ovom području kako bi se pronašao materijal koji je najučinkovitiji i najisplativiji za izradu fotonaponskih ćelija. Karakteristike idealnog materijala FN ćelije bi trebale zadovoljiti slijedeće uvjete [30]:

- od članaka se očekuje da imaju energetski rascjep između 1,1 i 1,7 eV;
- da imaju strukturu energetskih vrpca koja omogućuje direktan prijelaz;
- da su lako dostupni i neotrovni i
- trebaju imati visoku fotonaponsku učinkovitost pri pretvorbi.

Ključni problem razvoja fotonaponskih ćelija jest razvoj metoda kojim bi se ostvarila najveća moguća učinkovitost uz najmanje moguće troškove izrade. Povećanje korisnosti solarnih ćlanka moguće je korištenjem učinkovitih načina smanjenja unutarnjih gubitaka. Optički, kvantni i električni gubici tri su osnovne vrste gubitaka u FN ćelijama. Smanjenje gubitaka bilo koje vrste zahtjeva različite, a često i napredne metode proizvodnje FN ćlanka i FN modula. Gornja granica učinkovitosti komercijalno dostupnih tehnologija određena je poznatim Shockley-Queisser ograničenjem koje uzima u obzir ravnotežu između fotogeneracija i radijacijske rekombinacija [31].

Sama tehnologija proizvodnje napredovala je kroz protekla desetljeća, otkrićem novih materijala i boljih tehnologija proizvodnje došli smo do jeftinijih i energetski učinkovitijih fotonaponskih ćelija. Četiri generacije FN ćelija i recentna postignuća navedena su na dijagramu koji je prikazan na Slici 4.3.



Slika 4.3. Razne vrste fotonaponskih članaka i postignuća u ovom području [29]

#### 4.1.1 Fotonaponski članci prve generacije

Prva generacija FN članaka (tablica 4.1.) zasniva se na člancima s PN spojem koji su uglavnom izrađeni od monokristaliničnog silicija (m-Si) ili polikristaliničnog silicija (p-Si), te galij arsenida (GaAs). Silicij (Si) je najčešće korišten materijal za izradu FN članaka jer Zemljina kora obiluje njime, što silicij čini dostupnim i potencijalno jeftinim. FN članci na bazi silicija kompatibilni su s mikroelektronikom na bazi silicija, što ih čini vrlo zanimljivom tehnologijom [29].

*Tablica 4.1. Tehnologije prve generacije fotonaponskih članka [32]*

FN članci od monokristaliničnog silicija (m-Si)	
učinkovitost	15 – 24%
energetski rascjep	~1,1 eV
životni vijek	25 godina
prednosti	Stabilnost; visoka učinkovitost; dug životni vijek
ograničenja	Visoki troškovi proizvodnje; veća temperaturna osjetljivost; apsorpcijski problem; gubitak materijala
FN članci od polikristaliničnog silicija (p-Si)	
učinkovitost	10 – 18%
energetski rascjep	~1,7 eV
životni vijek	14 godina
prednosti	Jednostavnija, profitabilnija proizvodnja sa manje škarta; veća apsorpcija od m-Si
ograničenja	Niža korisnost, veća temperaturna osjetljivost
FN članci od galij arsenida (GaAs)	
učinkovitost	28 – 30%
energetski rascjep	~1,43 eV
životni vijek	18 godina
prednosti	Veća stabilnost; niža temperaturna osjetljivost; bolja apsorpcijska svojstva od m-Si; veća korisnost
ograničenja	Visoka cijena

#### 4.1.2 Fotonaponski članci druge generacije

Druga generacija fotonaponskih sunčevih članaka (tablica 4.2.) stavlja naglasak na minimalizaciju troškova koji predstavljaju glavni problem prve generacije FN članaka. Minimalizacija troškova može biti postignuta korištenjem tehnologije tankih filmova, smanjujući količinu korištenih materijala čime je u konačnici postignuta manja cijena.

Debljine do nekoliko mikrona, tanki filmovi mogu biti izrađeni od amorfnog silicija (a-Si), kadmij telurida (CdTe), kadmij sulfida (CdS), bakar indij galij selenid (CIGS skraćeno od engl. copper indium gallium selenide). Glavna mana druge generacije je niska korisnost koja ne prelazi 20% [29].

Tablica 4.2. Tehnologije druge generacije fotonaponskih članka [32]

FN članci od amorfnog silicija (a-Si)	
učinkovitost	5 – 12%
energetski rascjep	~1,7 eV
životni vijek	15 godina
prednosti	Manja cijena; dostupan u velikoj količini; neotrovan; visoki faktor apsorpcije
ograničenja	Niska korisnost, kompliciraniji odabir dopanada, kratko životno vrijeme manjinskih nosioca naboja
FN članci od kadmij telurida/ kadmij sulfida (CdTe / CdS)	
učinkovitost	15 – 16%
energetski rascjep	~1,45 eV
životni vijek	20 godina
prednosti	Visoki stupanj apsorpcije; manje materijala je potrebno za proizvodnju
ograničenja	Niska korisnost; Cd iznimno otrovan; Te količina je ograničena; visoka temperaturna osjetljivost
FN članci od bakar indij galij selenid (CIGS)	
učinkovitost	20%
energetski rascjep	~1,7 eV
životni vijek	12 godina
prednosti	Manje materijala je potrebno za proizvodnju

---

ograničenja	Vrlo visoka cijena; nestabilan; jaka temperaturna osjetljivost; visoka nepouzdanost
-------------	---

---

#### 4.1.3 Fotonaponski članci treće generacije

Treća generacija fotonaponskih članaka nastala je kao odgovor na vrlo nisku korisnost druge generacije, i to depozicijom poluvodičkih tankih slojeva i željom da se uvedu novi nanomaterijali i nove tehnike. Iako sofisticirana tehnologija može biti zahtjevnija i skuplja, omjer troška po vatu može biti manji. Tehnologija proizvodnje FN članaka s višestrukim PN spojem postiže veliki iskorak po pitanju korisnosti, a jedno od značajnijih istraživanja [33] postiže korisnost od 47.1% korištenjem šesterostrukog PN spoja s III-V poluvodičima [29].

#### 4.1.4 Fotonaponski sustavi četvrte generacije

Četvrta generacija solarnih članka je fleksibilna i ima nisku cijenu, pritom poboljšavajući korisnost FN članka korištenjem novih anorganskih nanostrukture kao što su metalne nanočestice i metalni oksidi s nonomaterijalima na organskoj bazi kao što su karbonske nanocijevičice, grafen i njegovi derivati [32] (tablica 4.3.).



*Tablica 4.3. Tehnologije treće generacije fotonaponskih članaka [32]*

FN članci s višestrukim PN spojem	
učinkovitost	> 36%
prednosti	Visoka učinkovitost
ograničenja	Kompleksnost, Visoka cijena
FN članci s fotoosjetljivim pigmentima (DSSC)	
učinkovitost	5 – 20%
prednosti	Niska cijena; rad pri slabom osvjetljenju i širem kutu, rad na nižoj unutarnjoj temperaturi; robusnost; produženi vijek trajanja
ograničenja	Problemi s temperaturnom stabilnošću; otrovne i hlapljive tvari
FN članci temeljeni na kvantnim točkama	
učinkovitost	11 – 17%
prednosti	Niski troškovi proizvodnje; niska potrošnja energije
ograničenja	Otrovnost u prirodi; degradacija
FN članci od organskih i polimernih materijala	
učinkovitost	9 – 11%
prednosti	Niski troškovi procesa; lagani, fleksibilni, termalno stabilni
ograničenja	Niska korisnost
FN članci od perovskita	
učinkovitost	21%
prednosti	Niska cijena i jednostavna struktura; lagan; fleksibilan; toplinski stabilan; niski troškovi proizvodnje
ograničenja	Nestabilan

## 4.2 Sustavi za prikupljanje mehaničke energije

Mehanička ambijentalna energija prisutna je u brojnim sustavima u obliku vibracija (strojevi, ljudski pokret, industrijska postrojenja, konstrukcije kao što su mostovi, zgrade i sl.) te u obliku udarnih opterećenja koja su od značaja kada je riječ o prikupljanju energije s cestovnog pločnika prilikom prolaska automobila. Mnogi znanstvenici i istraživači tražili su načine kako iskoristiti ambijentalnu mehaničku energiju kao izvor energije te su uspješno razvijene i testirane tri metode (tablica 4.4.):

- elektromagnetska indukcija [34],
- elektrostatska generacija [35] i
- piezoelektrični efekt.

Matematička razmatranja pokazuju da će se maksimalna izlazna snaga dobiti ako je rezonantna frekvencija generatora jednaka frekvenciji ambijentalnih vibracija. Većina sustava za prikupljanje mehaničke energiju konstruirani su da rade samo na jednoj frekvenciji. Postizanje maksimuma moguće je kod elektromehaničkih strojeva koji rotiraju jednolikom brzinom, što rezultira vibracijama vremenski nepromjenjive frekvencije, no to nije slučaj kod ljudskih pokreta, vozila i vjetra, koji imaju promjenjivu frekvenciju uzbude. Učinkovitost sustava koji su prilagođeni za rad samo na jednoj rezonantnoj frekvenciji drastično opada ako uzbudna frekvencija nije jednaka rezonantnoj [36].

Adaptivni (prilagodljivi) kinetički sustavi za prikupljanje niskorazinske energije iz okoliša (EH), uređaji su razvijeni kako bi se povećao radni frekvencijski opseg vibracija EH-a, odnosno kako bi se povećala učinkovitost prikupljanja energije kod izvora promjenjivih frekvencija pobude. Adaptivne tehnologije prikupljanja kinetičke energije koriste određeni mehanizam kojim se postiže prilagodba ili podešavanje rezonantne frekvencije pojedinog generatora kako bi njegova frekvencija odgovarala frekvenciji okolišnih vibracija čija energija se prikuplja ili kako bi se povećao frekvencijski opseg EH-a [36].

Tablica 4.4. Usporedba različitih mehanizama za prikupljanje mehaničke energije [36]

Vrsta	Prednosti	Mane
Elektromagnetski	Nema vanjski naponski izvor Nisu potrebna mehanička ograničenja Jaka izlazna struja	Komplicirano izvesti u MEMS tehnologiji Slaba radna svojstva kod mikro izvedbe Niski izlazni napon
Piezoelektrični	Jednostavne strukture Bez vanjskog naponskog izvora Kompatibilan s MEMS tehnologijom Visoki izlazni napon Nisu potrebna mehanička ograničenja	Slaba povezanost kod tankih filmova Loša mehanička svojstva Visoka izlazna impedancija Curenje naboja Slaba izlazna struja
Elektrostatski	Laka integracija u MEMS proizvodnom procesu Visoki izlazni napon	Potrebna su mehanička ograničenja Potreban vanjski izvor napona ili pred nabijeni elektricitet Visoka izlazna impedancija Slaba izlazna struja
Magnetostriktivni	Vrlo visoki koeficijent povezanosti Vrlo fleksibilan	Nelinearni efekti Komplicirana integracija u MEMS proizvodnom procesu

Svaka od tri navedene metode može ponuditi iskoristivu količinu energije, a piezoelektrični su materijali najzanimljiviji istraživačima zbog direktne pretvorbe mehaničke energije deformacija u električnu energiju. Jedna od prednosti piezoelektričnih materijala u odnosu na druge dvije metode je u jednostavnom jednodijelnom dizajnu, za razliku od elektromagnetske indukcije i elektrostatske generacije čiji je dizajn relativno kompleksniji i sastoji se od dva ili više dijelova [10].

Svojstvo određenih materijala odnosno kristala da pretvore mehaničku energiju u električnu energiju i obratno naziva se piezoelektričnost. Otkrili su je 1880. godine Pierre Curie i Jacques Curie u materijalima kao što su turmalin i kvarc. Kada vanjska sila uzrokuje deformaciju, piezoelektrični materijal postaje električki polariziran. Stupanj polarizacije proporcionalan je deformaciji. Suprotni efekt također je moguć, kada na piezoelektrik djeluje vanjsko električno polje dolazi do deformacije materijala [37].

Odnos između primijenjene sile kao pobude i posljedičnog odziva piezoelektričnog materijala ovisi o tri faktora [38]:

- dimenzijama i geometriji materijala,
- piezoelektričnim svojstvima materijala i
- smjeru mehaničke ili električne pobude.

To se zbiva prema relaciji [38]:

$$D = dX + \epsilon^X E \quad (3.1)$$

$$x = s^E X + dE \quad (3.2)$$

gdje je:

- D – vektor električnog pomaka, C/m<sup>2</sup>
- X – primijenjeno mehaničko naprezanje, N/m<sup>2</sup>
- E – generirano električno polje, N/C
- d – konstanta proporcionalnosti, C/N
- $\epsilon^X$  – dielektrična konstanta pri konstantnom naprežanju F/m
- $s^E$  – elastična podatljivost pri konstantom električnom polju, m<sup>2</sup>/N

### 4.3 Sustavi za prikupljanje energije iz temperaturnog gradijenta

Prikupljanje toplinske energije (TEH) je proces pretvorbe toplinskog gradijenta u električnu energiju korištenjem tehnologija i principa prikupljanja i pretvorbe toplinske energije navedenih u tablici 4.5. U ovom završnom radu bit će detaljnije obrađene termoelektrične tehnologije odnosno termoelektrični generatori (TEG) čiji je sastavni dio termopar.

Tablica 4.5. Tehnologije i principi prikupljanja i pretvorbe toplinske energije [39]

Vrsta	Značajke
Termoelektrični	<ul style="list-style-type: none"> <li>— potreban toplinski gradijent <math>\left(\frac{dT}{dx} \neq 0\right)</math>; <math>K/m</math></li> <li>— temelji se na Seebackovom efektu</li> <li>— materijali: poluvodiči</li> </ul>
Termomagnetski	<ul style="list-style-type: none"> <li>— potrebna temperaturna fluktuacija <math>\left(\frac{dT}{dt} \neq 0\right)</math>; <math>K/s</math> i promjenjivo magnetsko polje</li> <li>— materijali: feromagnetici</li> </ul>
Termoelastični	<ul style="list-style-type: none"> <li>— potrebna temperaturna fluktuacija <math>\left(\frac{dT}{dt} \neq 0\right)</math> i izmjenično naprezanje</li> <li>— materijali: legure s memorijom oblika (engl. <i>shape memory alloys</i>)</li> </ul>
Piroelektrični	<ul style="list-style-type: none"> <li>— potrebna temperaturna razlika <math>\left(\frac{dT}{dt} \neq 0\right)</math> i izmjenično električno polje</li> <li>— materijali: feroelektrici</li> </ul>

Termoelektrični (TE) efekt rezultat je četiri različita fenomena: (1) Jouleove topline; (2) Seebeckova efekta; (3) Peltierovog efekta i (4) Thomsonovog efekta. Jouleova toplina je toplina koja nastaje prolaskom struje  $I$  kroz vodič električnog otpora  $R$  u određenom vremenskom intervalu  $t$ . Proporcionalna je kvadratu jakosti struje, električnom otporu vodiča i vremenu. Ostala tri efekta biti će opisana u slijedećim poglavljima.

#### 4.3.1 Seebeckov efekt

Ako se spoje zajedno dva električki različita materijala, vodiča ili poluvodiča, te ako postoji temperaturna razlika na spoju između ta dva materijala, doći će do stvaranja elektromotorne sile (EMF). Ovaj fenomen naziva se Seebeckov efekt, a prvi ga je opazio Thomas Johann Seebeck 1821. godine. Inducirani napon naziva se Seebeckov EMF, a proporcionalan je temperaturnoj razlici. Postojanje izlaznog napona  $V_{out}$  (V) uvjetuje postojanje temperaturnog gradijenta  $\Delta T$  (K), a njihov omjer naziva se Seebeckov koeficijent,  $\alpha$  :

$$\alpha_{ab} = \frac{V_{out}}{\Delta T} \quad (4.4)$$

gdje indeks  $ab$  predstavlja dva vodiča, A i B, koji tvore termopar. Svi materijali u određenoj mjeri pokazuju termoelektrična svojstva. Vrijednosti Seebeckova koeficijenta kreću se između 100 i 1000  $\mu V/K$  za većinu poznatih materijala. Seebeckov koeficijent je temperaturno ovisan i njegove vrijednosti se nelinearno mijenjaju s promjenom temperature[39].

Većina metala ima Seebeckov koeficijent od 10  $\mu V/K$  ili manje, dok je kod poluvodiča Seebeckova konstanta veća od 100  $\mu V/K$ , zbog čega se oni često koriste u termoelektričnim modulima. Poluvodiči s većinskim nosiocima elektronima n-tipa imaju negativni Seebeckov koeficijent,  $\alpha_n$ , a poluvodiči sa šupljinama kao većinskim nosiocima p-tipa imaju pozitivan Seebeckov koeficijent  $\alpha_p$ . Efektivna vrijednost Seebeckova koeficijenta za termoelektrični par koji se sastoji od jednog p-tip i jednog n-tip poluvodičkog elementa dana je jednadžbom[39]:

$$\alpha_{pn} = \alpha_p - \alpha_n \quad (4.5)$$

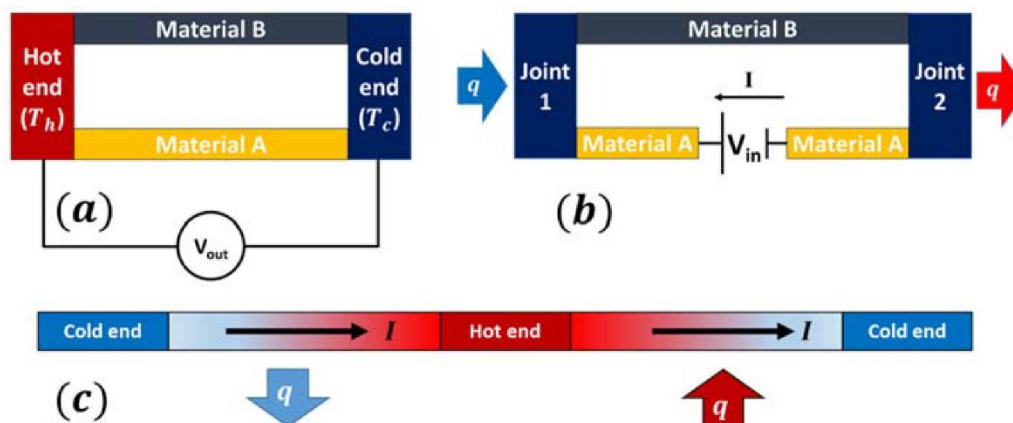
#### 4.3.2 Peltierov učinak

Peltierov učinak je reverzan Seebeckovom efektu, a otkrio ga je Jean Charles Athanase Peltier 1834. godine. Peltierov učinak manifestira se kao hlađenje ili zagrijavanje na spoju dva različita termoelektrična (TE) materijala kada postoji tok električne struje kroz spoj (Slika 4.4.(b)). Količina Peltierovog zagrijavanja proporcionalna je struji koja teče kroz spoj, a smjer struje utjecati će na predznak zagrijavanja, odnosno hoće li biti riječ o zagrijavanju ili hlađenju. Količina razvijene ili apsorbirane topline,  $q$ , je direktno proporcionalna električnoj struji kruga te glasi [39]:

$$q = (\pi_a - \pi_b)I \quad (4.6)$$

#### 4.3.3 Thomsonov efekt

Thomsonov efekt javlja se kod neravnomjerno zagrijanih termoelektričnih (TE) materijala obzirom da Seebeckov koeficijent ovisi o temperaturi. U prisutstvu električne struje koja teče kroz TE materijal i toplinskog gradijenta javlja se Thomsonova toplina kao rezultat kontinuiranog Seebeckova i Peltierovog učinka. Thomsonova toplina proporcionalna je jačini električne struje, a smjer struje određuje hoće li TE materijal primiti ili predati toplinu ( $q$ ). Važno je napomenuti da se Seebeckov i Peltierov efekt javlja kod TE parova gdje postoji PN spoj, a Thomsonov kod vodiča – Slika 4.4 .(c) [39].



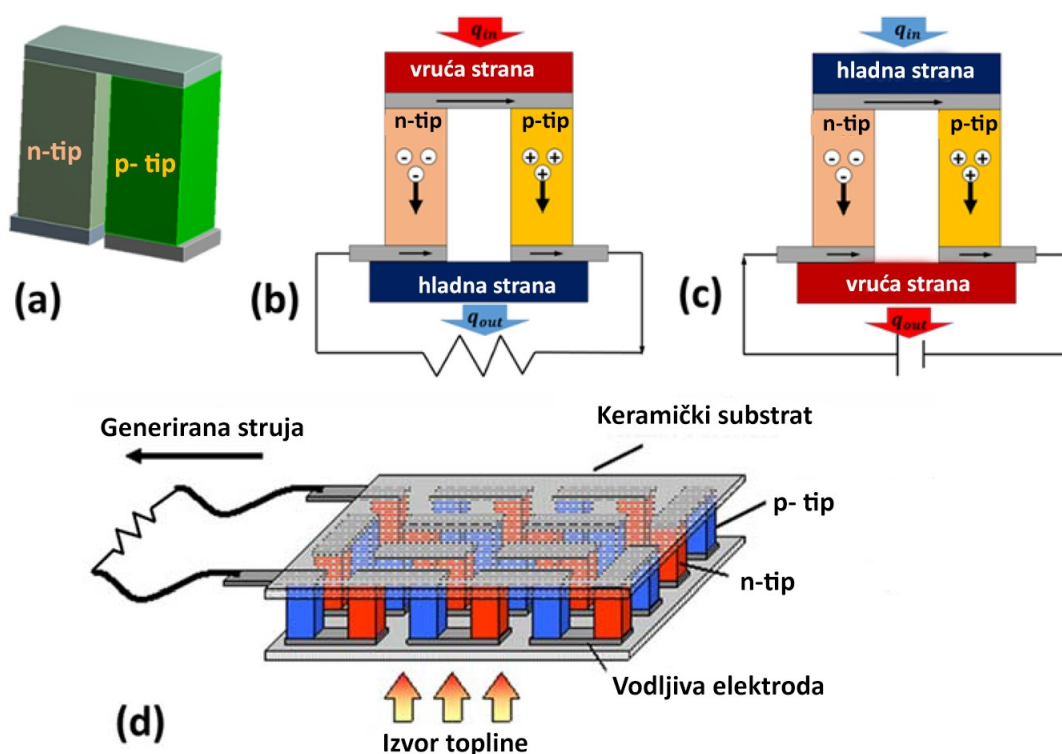
Slika 4.4. **(a)** Seebeckov efekt: dva termoelektrična materijala spojena na toplim i hladnim spojevima, koji se održavaju na temperaturama  $T_h$  i  $T_c$  (temperaturna razlika  $\Delta T = T_h - T_c$ ). Seebeck EMF od  $V_{out}$  se dobiva preko spojeva; **(b)** Peltierov učinak: dva termoelektrična materijala spojena na dva kraja. Električna struja  $I$  prolazi kroz krug i toplina  $q$  se razvija na jednom kraju, a apsorbira na drugom; **(c)** Thomsonov efekt: zbog prostornog gradijenta temperature i struje javlja se kontinuirana verzija Peltierovog efekta, što rezultira Thomsonovom toplinom [39]

#### 4.3.4 Princip rada

Kombinacijom jednog p-tipa i jednog n-tipa poluvodiča u krutom obliku ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , bizmut-telurid) električno povezanih u seriju, a toplinski u paralelu, dobiva se termoelektrični par odnosno termoelektrični članak koji je prikazan na Slici 4.5(a). Termoparovi su obično  $\pi$  oblika, a dva poluvodička elementa se nazivaju krakovi termopara. Na Slici 4.5.(b) prikazan je način rada u kojem termopar proizvodi električnu energiju. Termoelektrični članak se tu spaja na vanjski strujni krug dok postoji toplinski gradijent između dvije suprotne strane. U poluvodičkom kraku p-tipa su šupljine većinski nosioci naboja, a u n-tipu elektroni. Elektroni i šupljine se kreću s tople strane ka hladnoj, u kraku n-tipa odnosno u kraku p-tipa, što rezultira električnom strujom koja teče u vanjskom strujnom krugu od kraka p-tipa ka kraku n-tipa.



TEG (Slika 4.5(d)) se sastoji od nekoliko termoelektričnih parova povezanih pomoću vodljivih metalnih elektroda. Kako bi se spriječila međusobna difuzija između TE materijala i materijala elektroda te kako bi se smanjio kontaktni otpor, obično se na sučelju koriste slojevi difuzijske barijere od Ti, Mo, CrSi ili Ni. Potom se, kako bi se električno izolirao sustav, nizovi termoparova montiraju između tankih keramičkih podloga, kao što su  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (aluminij) i  $\text{AlN}$  (aluminijev nitrid) [39].

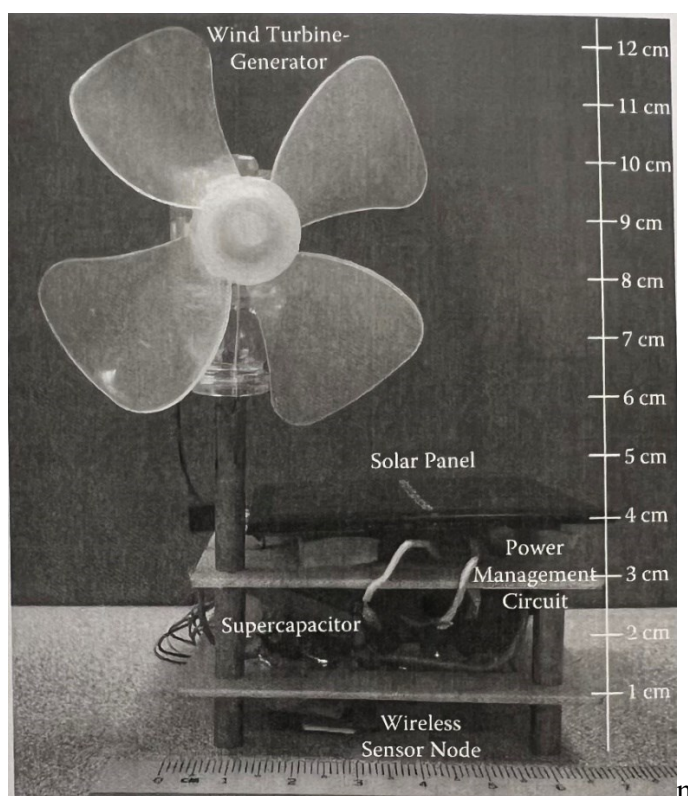


Slika 4.5. (a) Termoelektrični par s jednim krakom p-tipa i jednim krakom n-tipa; (b) Mehanizam termoelektrične generacije. Struja teče iz smjera kraka p-tipa ka kraku n-tipa. (c) Mehanizam termoelektričnog hlađenja. Vanjski izvor struje potiskuje nositelje da odvede toplinu sa hladne strane prema toploj strani; (d) Osnovni elementi termoelektričnog generatora (TEG) [39]

U ovom je poglavlju dan pregled principa i tehnologija za pretvorbu niskorazinske okolišne energije u električnu s naglaskom na fotonaponsku, piezoelektričnu i termoelektričnu pretvorbu.

## 5 HIBRIDNI SUSTAVI

Hibridni sustavi za prikupljanje energije (HEH sustavi skraćeno od engl. *hybrid energy harvesting systems*) koriste dvije ili više različitih metoda prikupljanja niskorazinske energije iz okoliša, poput onih opisanih u prethodnom poglavlju, čime se nastoji povećati pouzdanost dostupnosti energije koja je potrebna za rad bežičnog senzorskog čvora. Jedan od primjera je Sunčevo zračenje koje varira ovisno o godišnjem dobu, geografskom položaju, klimi i vremenskim prilikama, što utječe na izlaznu snagu fotonaponskog članka, dok je tijekom noći ona približno jednaka nuli. Ako se fotonaponskom članku doda još jedan uređaj za pretvaranje okolišne energije u električnu, kao što je primjerice vjetroturbina, dobit će se hibridni sustav koji se oslanja na energiju Sunca i energiju vjetra kao što je prikazano na Slici 5.1.



Slika 5.1. Sklopovski prototip bežičnog senzorskog čvora s hibridnim sustavom za prikupljanje ambijentalne energije [10]

## 6 KONSTRUKCIJSKI ZAHTJEVI

Kroz prethodna poglavlja dan je uvod u arhitekturu bežičnih senzorskih mreža i čvorova, opisani su principi i tehnologije prikupljanja niskorazinske energije iz okoliša, sve u cilju boljeg razumijevanja ovog multidisciplinarnog područja koje spaja strojarstvo, elektrotehniku i računarstvo.

Lista konstrukcijskih zahtjeva izrađuje se u svrhu pravilnog pristupa konstruiranju te kao temelj za ocjenjivanje konceptualnih rješenja koji će biti izrađeni. Konstrukcijski se zahtjevi mogu onda sažeti kao []:

- (I) Funkcionalna ispravnost u određenom vijeku trajanja.
- (II) Tehnološka ispravnost: oblik konstrukcije treba biti prilagođen postupku proizvodnje da bi izrada i obrada bile što jednostavnije i jeftinije, pa konstrukcija treba osigurati:
  - a. što manji broj dijelova i
  - b. što manju ukupnu masu.
- (III) Hibridni sustav za prikupljanje energije iz okoliša se nalazi unutar bežičnog senzorskog čvora (WSN) koji mjeri prisutnost vozila, temperaturu kolnika, informaciju o vlažnosti kolnika te odašilje podatke:
  - a. o prolasku vozila po događaju,
  - b. o temperaturi kolnika svakih 120 minuta i
  - c. o vlažnosti kolnika svakih 120 minuta.
- (IV) Autonomnost WSN-a: HEH sustav mora biti sposoban samostalno napajati WSN, čime se osigurava autonomnost WSN-a.
- (V) Sigurnost: uređaj mora biti siguran za ljude i vozila koji sudjeluju u cestovnom prometu.
- (VI) Jednostavnost instalacije.
- (VII) Jednostavnost zamjene.

Vrednovanje konceptualnih rješenja koja će se predložiti u sljedećem poglavlju će se izvršiti upravo u odnosu na tako definirane zahtjeve.

## 7 IDEJNA RJEŠENJA

Zadatak kroz ovaj završni je osmisliti i razraditi rješenja za kombiniranu upotrebu više različitih pretvaračkih principa s ciljem dobivanja hibridnog sustava, što bi rezultiralo većim iskorištenjem energije iz okoliša, a time i većom autonomijom mreže senzora.

U nastavku su opisana tri Idejna rješenja koja kombiniraju dva ili više principa prikupljanja i pretvorbe niskorazinske energije s cestovne infrastrukture.

### 7.1 Rješenje 1: FN/TEG/PEG

Prvo idejno rješenje koje se razmatra je kombinacija:

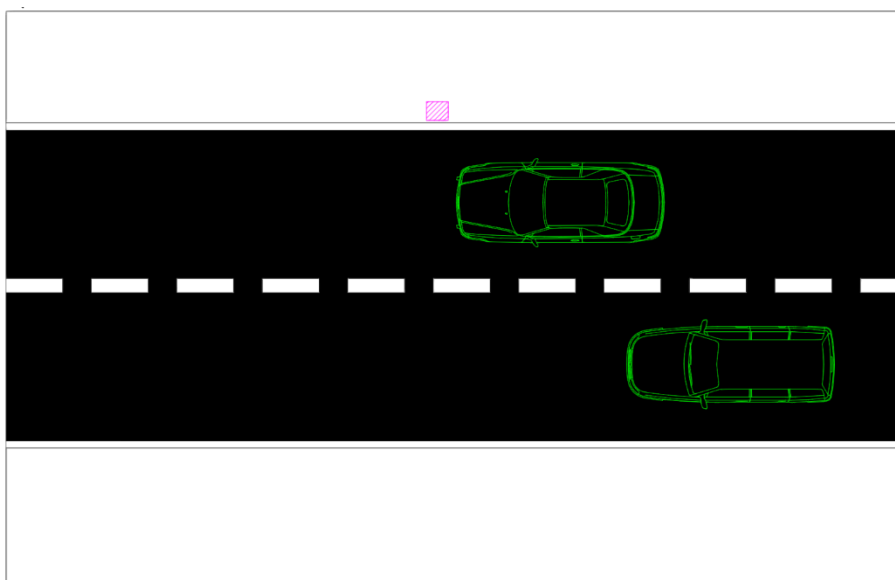
- **fotonaponskog modula (FN)** koji prikuplja energiju Sunčeva zračenja, instaliranog pod blagom kosinom  $\alpha$  i
- **termoelektričnog generatora (TEG)** koji se nalazi ispod FN
- **piezoelektričnog generatora (PEG)** koji prikuplja akustičnu energiju i/ili energiju turbulencija zraka prilikom prolaska vozila

a koja se nalazi unutar kućišta izrađenog od aluminijskog lima. U samom kućištu su smješteni sustavi za prikupljanje niskorazinske energije iz okoliša, sustav za upravljanje korištenjem i pohranom energije, mikrokontroler, senzori prolaska, brzine, temperature i vlage te komunikacijski uređaj.

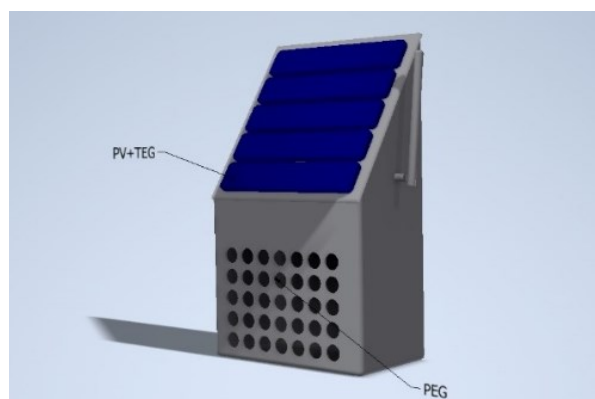
Montaža ovog sklopa vrši se u neposrednoj blizini prometne trake na cestovnoj ogradi, a prednost joj je jer nema potrebe za bilo kakvim intervencijama na asfaltu, čime se omogućuje brza instalacija na već postojećim cestama.

Na kosini koja se vidi na tlocrtu na Slici 7.1. postavljen je solarni panel širine 20 centimetara i duljine 12 centimetara, tako da ukupna površina solarnog panela iznosi 0.024 metara kvadratnih. Na prednjem dijelu nalaze se otvori kroz koje vibracije i zrak prodiru unutar kućišta do specijalno dizajniranih vibrirajućih površina čije se vibracije preko piezoelektričnih diskova pretvaraju u električnu energiju.

Budući da je ovaj tip uređaja smješten uz sigurnosnu ogradu uz cestu te nema direktnog doticaja s asfaltom, potrebno je pronaći optičke senzore prolaska i/ili koristiti akustični PEH u svrhu dobivanja informacija o prolasku automobila. Nedostatak ovog uređaja jest nemogućnost dobivanja informacija o istovremenom prolasku dvaju vozila kada je riječ o cesti s dvije prometne trake.



*Slika 7.1. Primjer pozicioniranja senzorskog čvora prema prvom konceptualnom rješenju neposredno uz cestu*



*Slika 7.2 Vanjski izgled bežičnog senzorskog čvora prvog idejnog rješenja*

## 7.2 Rješenje 2: PEG/TEG

Drugo idejno rješenje je kombinacija:

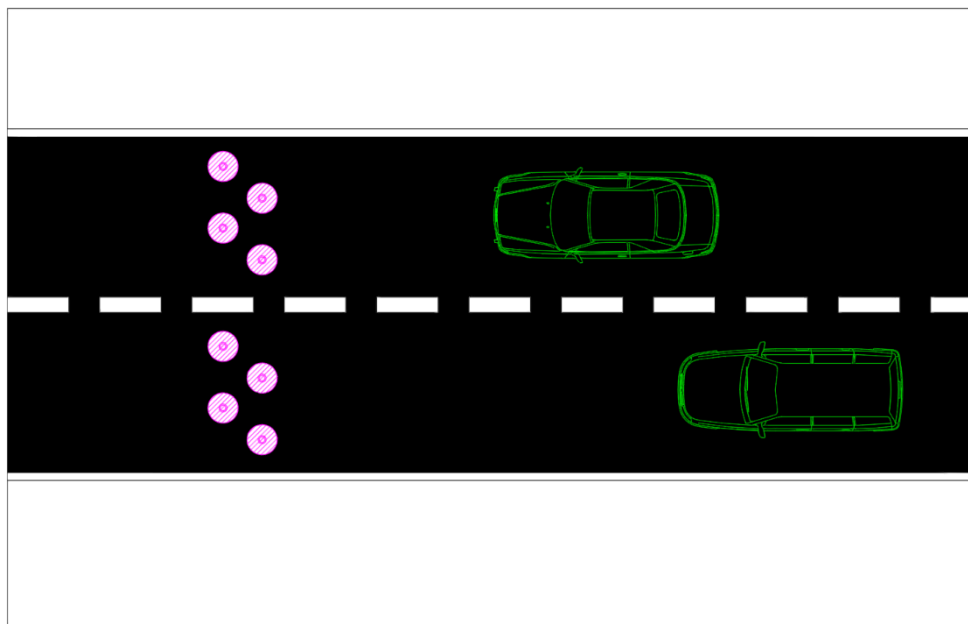
- **piezoelektričnog generatora (PEG)** koji pretvara udarna opterećenja, koja se javljaju uslijed prelaska vozila preko senzorskog čvora, u električnu energiju, odnosno tipkala koje pritišće piezoelektrični kristal; signal izlaznog napona se tu koristiti i u svrhu dobivanja informacija o prolasku vozila te
- **termoelektričnog generatora (TEG)** koji prikuplja energiju toplinskog gradijenta između površinskog sloja asfalta koji Sunce zagrije tijekom dana i dubljih slojeva.

Kod ovog tipa rješenja montaža je nešto kompleksnija jer zahtjeva prethodno bušenje rupa u koje se umeće cilindrično kućište unutar kojeg se nalazi sustav za prikupljanje niskorazinske energije s pripadajućim energetsko-upravljačkim sklopom, niz senzora i mikrokontroler (Slika 7.2.).

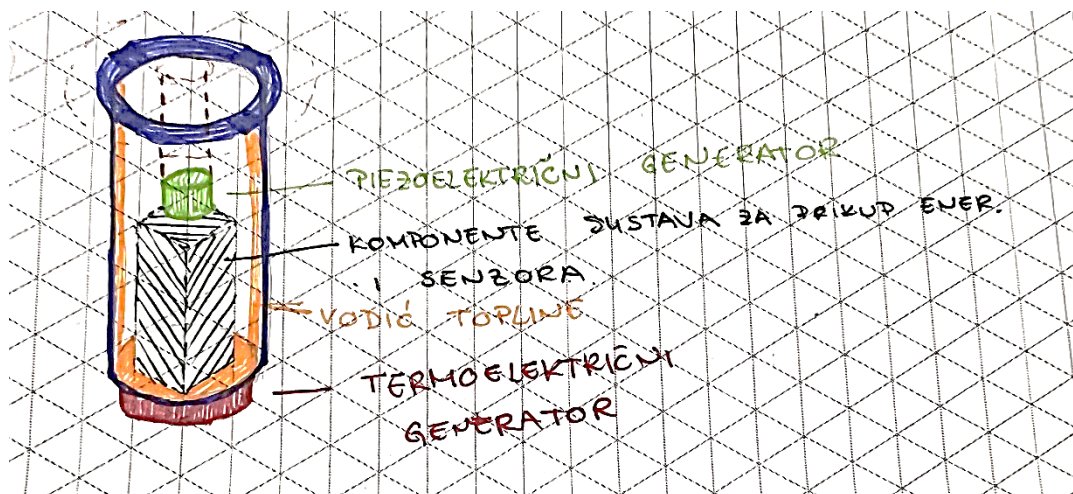
Kako je prikazano na Slici 7.3., sve komponente senzora i sustava za prikupljanje energije potrebno je pohraniti cilindrično kućište koje je toplinski izolirano. Unutar kućišta se nalazi toplinski vodič koji prenosi toplinu površine asfalta do dubine od 20 cm na kojoj se nalazi TEG, te je potrebno osmisliti mehanizam tipkala preko kojeg će se prenositi udarna opterećenja s kotača vozila na PEG.

Ovaj koncept manjih je dimenzija u odnosu na preostala dva rješenja, zbog čega je potrebno napraviti malo kompleksniji dizajn kako bi se omogućilo provođenje topline s gornjeg dijela čvora, koji se nalazi na površini asfalta, do dubine od cca. 20 centimetara uz istovremeni prijenos udarnih opterećenja koja nastaju prilikom prolaska automobila preko tipkala na PEG.

Nedostatak samog rješenja jest relativno mala površina tipkala čime se smanjuje vjerojatnost da će vozilo koje vozi cestom prijeći preko senzora, prikupiti energiju i odaslati informaciju o prolasku vozila.



Slika 7.3. Primjer pozicioniranja 4 senzorska čvora na jednoj prometnoj traci kako bi se postigla veća vjerojatnost prelaska auta preko jednog od njih



Slika 7.4. Skica senzorskog čvora bez gornjeg tipkala

### 7.3 Rješenje 3: PEG/TEG/FN

Treće idejno rješenje bi se moglo primjenjivati za senzorske čvorove koji se montiraju direktno na asfalt ceste, a sastoji se od:

- **piezoelektričnog generatora (PEG)** koji pretvara udarna opterećenja, do kojih dolazi uslijed prelaska vozila preko senzorskog čvora, u električnu energiju, odnosno tipkala koje pritišće piezoelektrični kristal; signal izlaznog napona može se i tu koristiti u svrhu dobivanja informacija o prolasku vozila, a uz umjeravanja i daljnja istraživanja;
- **fotonaponskog modula (FN)** koji prikuplja energiju Sunčeva zračenja: budući da se FN instalira direktno na površinu asfalta, potrebno je gornji dio kućišta napraviti od kaljenog stakla jer on mora biti otporan na velika opterećenja prilikom prolaska vozila, a može doći i do zaprljanja što znatno smanjuje konverzijsku učinkovitost i
- **termoelektričnog generatora (TEG)** koji prikuplja energiju toplinskog gradijenta između površinskog sloja asfalta koji Sunce zagrije tijekom dana i dubljih slojeva.

Modularno rješenje kombinira dva modula:

#### 1. Osnovni modul

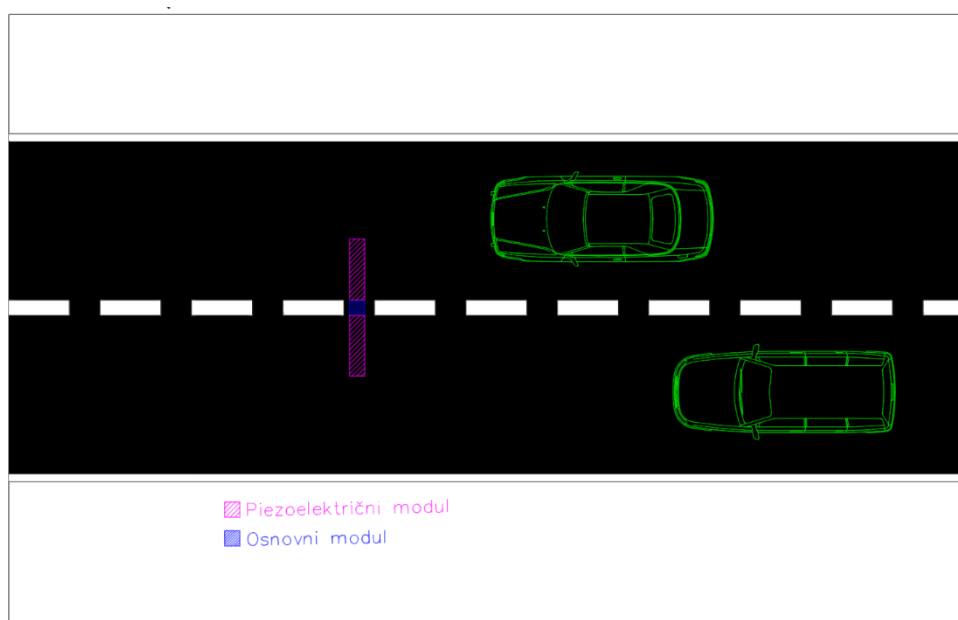
Sastoji se od fotonaponskog (FN) panela na gornjoj strani kućišta i termoelektričnog generatora koji je smješten na dnu modula. U osnovnom modulu smješten je sustav upravljanja energijom, mikrokontroler, senzori vlage i temperature i komunikacijski uređaj.

#### 2. Piezoelektrični modul ( $\check{S} = 30 \text{ cm} \times D = 120 \text{ cm} \times V = 20 \text{ cm}$ )

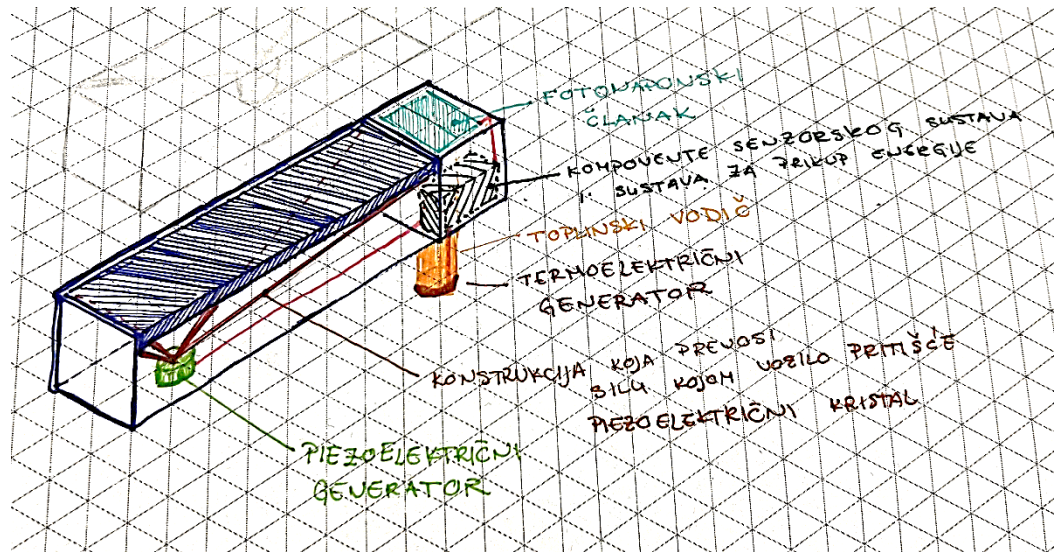
Piezoelektrični modul se sastoji od dva niza piezoelektričnih diskova, konstrukcije kojom se prenosi opterećenje kojim auto pritišće gornju površinu modula na piezoelektrični modul, pokrova koji se nalazi na konstrukciji.



Ovo rješenje pogodno je za instalaciju i montažu prilikom gradnje novih cesta, dok prilikom montaže u postojeće ceste potrebna je priprema u vidu bušenja i rezanja asfalta. Predviđeno je da se osnovni modul montira na sredini ceste, odnosno između dvije prometne trake ako je riječ o autocesti čime se povezivanjem jednog osnovnog modula i dva piezoelektrična modula može postići kontrola prolaska vozila nad dvije prometne trake. Nedostatak rješenja je relativno velika masa, kompleksna instalacija, mogućnost neevidentiranja motocikala ili drugih vozila na dva kotača.



*Slika 7.5 Primjer pozicioniranja osnovnog i dva piezoelektrična modula na cesti s dvije prometne trake.*



Slika 7.6 Skica senzorskog čvora prema konceptualnom rješenju broj tri

## 7.4 Evaluacija rješenja

Idejna rješenja dana u prethodnim potpoglavljima evaluirana su prema kriterijima navedenim u tablici 7.1. Kao najbolje rješenje pokazuje se konceptualno rješenje broj tri koje će biti razrađeno u idućem potpoglavlju.

Prilikom ocjenjivanja u obzir su uzeti konstrukcijski zahtjevi navedeni u poglavlju 6. i Tablici 7.1. u kojem su navedene ocjene svakog pojedinog rješenja. Gdje je 1 najmanja ocjena, a 5 najveća ocjena.

Kod kriterija (I), funkcionalne ispravnosti, rješenje 1 (R1) dobilo je ocjenu 3 jer ne zadovoljava u potpunosti traženu funkciju te zbog negativnog utjecaja vremenskih uvjeta na vijek trajanja; rješenje 2 (R2) ocjenjeno je 5 jer je riječ o robusnijem senzorskom čvoru; rješenje 3 (R3) također je ocjenjeno najvećom ocjenom budući da nema vanjskih utjecaja koji će negativno utjecati na funkcionalnu ispravnost u određenom vijeku trajanja.

Prilikom ocjenjivanja (II) tehnološke ispravnosti R1 i R3 ocjenjeni su ocjenom 3 budući da je R1 nešto kompleksnijeg dizajna koji je potrebno izraditi iz niza dijelova, dok je kod rješenja R3 zbog nešto veće veličine i potrebne konstrukcije nešto veća masa. R2 ocjenjeno je ocjenom 4 budući da se radi o nešto manjem senzorskom čvoru s manjom masom i manje dijelova.

Kada je riječ o kriteriju (III) sensorima, R1 je ocjenjen ocjenom 2 budući da ne može očitati vozila koja istovremeno prolaze pored, a nema direktnog dodira s asfaltom čime se za mjerenje temperature ne mogu koristiti kontaktni senzori temperature i vlage asfalta. R2 je ocjenjen ocjenom 3 zbog relativno niske vjerojatnosti prelaska automobila preko njega, a time i mjerenjem prolaska, R3 je nastao kao odgovor na navedene probleme te kao takav je ocjenjen ocjenom 5.

Kriterij (IV) autonomnosti je ocjenjen na temelju istraživanja literature, autor završnog rada smatra da bi sva tri senzora u određenoj granici mogla postići autonomnost, no da bi najvišu količinu energije prikupilo R3 budući da je će gotovo svako vozilo prijeći preko piezoelektričnog modula. Upitnik (?) u Tablici 7.1. označava da je riječ o pretpostavci razine autonomnosti.

Kada je riječ o kriteriju (V), sigurnosti, R1 se pokazalo kao najbolje budući da se ne nalazi direktno na kolniku, ostala dva rješenja potrebno je prilagoditi i konstruirati kako ne bi imala negativan utjecaj na vožnju zbog čega im je dana manja ocjena.

Kod ocjenjivanja kriterija (VI) instalacije i (VII) zamjene, najveću ocjenu dobilo je rješenje R1 budući da ne zahtjeva bušenje i rezanje asfalta, najmanju ocjenu dobilo je R3 budući da je za instalaciju potrebno rezati kolnik, a njegova zamjena je vrlo kompleksna.

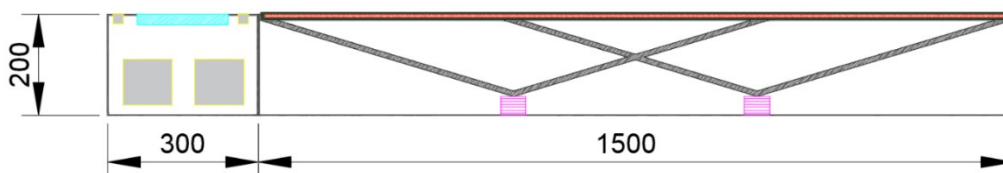
R3 pokazalo se kao najbolje sa zbrojnom ocjenom 27 te će kao takvo biti dodatno razrađeno u idućem potpoglavlju.

*Tablica 7.1. Evaluacija konceptualnih rješenja prema zadanim konstrukcijskim zahtjevima*

		<b>R1:</b> <b>FN/PEG</b>	<b>R2:</b> <b>PEG/TEG</b>	<b>R3:</b> <b>PEG/TEG/FN</b>
(I)	Funkcionalna ispravnost	3	5	5
(II)	Tehnološka ispravnost	3	4	3
(III)	Senzori	2	3	5
(IV)	Autonomnost	3	3	5
(V)	Sigurnost	5	4	4
(VI)	Instalacija	5	4	3
(VII)	Zamjena	5	3	2
<b>(VIII)</b>	<b>UKUPNO</b>	26	26	27

## 7.5 Razrada odabranog rješenja

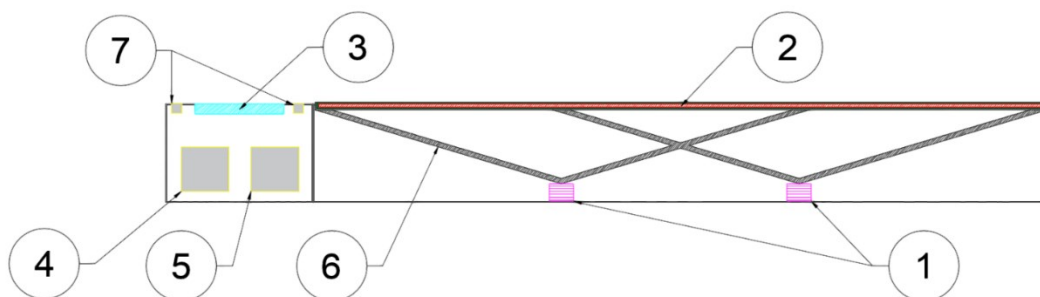
Odabrano rješenje je senzorski čvor modularnog dizajna s osnovnim baznim modulom dimenzija 300 mm x 300 mm x 200 mm s fotonaponskim panelom te piezoelektričnim modulom dimenzija 1500 mm x 300 mm x 200 mm što je prikazano na slici 7.6.



Slika 7.7 Dimenzije osnovnog i piezoelektričnog modula

Unutar osnovnog modula povezanog s jednim piezoelektričnim modulom (slika 7.7) nalaze se:

1. Dva stoga piezoelektričnih diskova
2. Gažena površina s uređajem za vođenje topline
3. Fotonaponski članak
4. Sustav za upravljanje energijom
5. Mikrokontroler za senzorski sustav
6. Konstrukcija kojom se prenose udarna opterećenja na piezoelektrični disk
7. Senzori i primopredajnici



Slika 7.8 Skica osnovnog i piezoelektričnog modula s osnovnim dijelovima.

Dva stoga piezoelektričnih diskova nalaze se unutar piezoelektričnog modula. Na dva stoga se prenose udarna opterećenja putem konstrukcije kojom se prenose udarna opterećenja. Te imamo gaženu površinu čija širina je predviđena da bude 300 mm kako bi se opterećenje koje vozilo stvara prema kolniku prenijelo na piezoelektrične generatore tj. stogove piezoelektričnog diska.

Na gornjem dijelu osnovnog modula postavljen je solarni panel, antene i senzorski sustavi, a unutar ovog modula nalazi se „srce“ bežičnog senzorskog čvora odnosno mikrokontroler koji je odgovoran za prikupljanje i slanje informacije te sustav za upravljanje energijom koji je odgovoran za prikupljanje niskorazinske energije iz okoliša i pohranu te energije.

U dnu koje se nalazi 200 mm ispod površine moguće je smjestiti termoelektrični generator uz napomenu da je potrebno konstruirati uređaj za vođenje topline ispod gažene površine na piezoelektričnom modulu te odvesti tu toplinu do donjeg dijela osnovnog modula.

Predviđeno je da osnovni modul bude postavljen na sredini kolnika, kako je prikazano na Slici 7.5. čime se izbjegava prelazak auta preko FN modula, te se na taj način smanjuju potencijalna oštećenja i prljavština koja negativno utječe na njegovu efikasnost.

## 8 ZAKLJUČAK

Razvojem pametnih gradova raste broj bežičnih senzorskih mreža, a prikupljanje i pretvorba niskorazinske energije iz okoliša predstavlja jedno od mogućih rješenja problema ograničenog životnog vremena i zamjene baterije te pridonosi većoj autonomiji bežičnog senzorskog čvora.

Bežični senzorski čvorovi, uređaji su koji se najčešće sastoje od mikrokontrolera, senzora, komunikacijskih uređaja i spremnika energije. Jedan od temeljnih ciljeva kod konstruiranja bežičnog senzorskog čvora je minimalizacija potrošnje energije zbog čega nastaju komunikacijski protokoli kao što su ZigBee i LoraWAN te tzv. „*low power*“ senzori i mikrokontroleri.

Prikupljanje niskorazinske energije iz okoliša jedna je od mogućnosti kojima senzorski čvor može postići veću autonomiju. Kroz rad obrađena fotoelektrična, piezoelektrična i termoelektrična pretvorba. Budući da su obnovljivi izvori energije nestalne prirodne, kako bi se povećao prinos energije dano je hibridno idejno rješenje koje se može implementirati na cestama u svrhu kontrole prometa i stanja na cestama.

Hibridni sustavi su za prikupljanje i pretvorbu niskorazinske energije iz okoliša mogu se temeljiti na dva ili više mehanizama za prikupljanje različitih vrsta energije. U ovom završnom radu predložena su tri idejna rješenja hibridnih sustava koja bi se mogla primjenjivati u bežičnim senzorskim čvorovima namijenjenim za kontrolu prometa i stanja na cestama.

Napredne ceste koje će koristiti bežične senzorske mreže imaju mogućnost autonomnu vožnju učiniti lakše ostvarivom. Kada bi ta pametna cesta imala mogućnost komunikacije s vozilima koja prometuju njome, mogla bi odašiljati informacije o stanju i prometu, upozorenja i naputke kojima bi se smanjilo vrijeme latencije koje je potrebno da bi se informacije koje prikuplja vozilo obradile u oblaku, a ograničavaju razvoj autonomne vožnje.

Daljnja istraživanja u području prikupljanje i pretvorbu niskorazinske energije iz okoliša i niskoenergetskih uređaja potrebna su kako bi se mogao konstruirati bežični senzorski čvor koji bi bio autonoman uz što manje dimenzije i cijenu.

Za izabrano, modularno rješenje potrebno je napraviti mjerenja izlazne snage svakog od tri korištena sustava za prikupljanje niskorazinske energije iz okoliša kako bi se dobio mogući energetska prinos kod korištenja hibridnog sustava. Potrebno je revidirati dizajn osnovnog modula kako bi se njegove dimenzije minimalizirale, a instalacija i spajanje s piezoelektričnim modulom što je moguće više pojednostavnile. Također je potrebno konstruirati osnovni modul da može funkcionirati kao samostalni (eng. *standalone*) autonomni bežični senzorski čvor čije su mogućnosti proširene kada je postavljen sa piezoelektričnim modulom.



## 9 LITERATURA

- [1] United Nations Department of Economic and Social Affairs, „World Urbanization Prospects: The 2018 Revision“. 2019.
- [2] K. J. Bwalya, „Ambient Intelligence in Smart City Environments: Topologies and Information Architectures“, u *Guide to Ambient Intelligence in the IoT Environment*, Z. Mahmood, Ur. Cham: Springer International Publishing, 2019, str. 3–22. doi: 10.1007/978-3-030-04173-1\_1.
- [3] D. H. Stolfi, E. Alba, i X. Yao, „Can I Park in the City Center? Predicting Car Park Occupancy Rates in Smart Cities“, *J. Urban Technol.*, sv. 27, izd. 4, str. 27–41, lis. 2020, doi: 10.1080/10630732.2019.1586223.
- [4] C. K. Toh, J. A. Sanguesa, J. C. Cano, i F. J. Martinez, „Advances in smart roads for future smart cities“, *Proc. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.*, sv. 476, izd. 2233, str. 20190439, sij. 2020, doi: 10.1098/rspa.2019.0439.
- [5] C. Yin, Z. Xiong, H. Chen, J. Wang, D. Cooper, i B. David, „A literature survey on smart cities“, *Sci. China Inf. Sci.*, sv. 58, izd. 10, str. 1–18, lis. 2015, doi: 10.1007/s11432-015-5397-4.
- [6] H. Karl i A. Willig, *Protocols and architectures for wireless sensor networks*. Hoboken, NJ: Wiley, 2005.
- [7] M. Srivastava, R. Muntz, i M. Potkonjak, „Smart kindergarten: sensor-based wireless networks for smart developmental problem-solving environments“, u *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*, Rome Italy, srp. 2001, str. 132–138. doi: 10.1145/381677.381690.
- [8] S. D. Indu, „Wireless Sensor Networks: Issues & Challenges“, *Int. J. Comput. Sci. Mob. Comput.*, sv. 3, izd. 6, str. 681–685, lip. 2014.
- [9] P. Pedamkar, „Types of Embedded Systems“, *EDUCBA*.
- [10] Y. K. Tan, *Energy harvesting autonomous sensor systems: design, analysis and practical implementation*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013.
- [11] J. Padgette i ostali, „Guide to Bluetooth Security“, National Institute of Standards and Technology, sij. 2022. doi: 10.6028/NIST.SP.800-121r2-upd1.
- [12] S. Sudevalayam i P. Kulkarni, „Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications“, *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, sv. 13, izd. 3, str. 443–461, 2011, doi: 10.1109/SURV.2011.060710.00094.
- [13] A. Djedouboum, A. Abba Ari, A. Gueroui, A. Mohamadou, i Z. Aliouat, „Big Data Collection in Large-Scale Wireless Sensor Networks“, *Sensors*, sv. 18, izd. 12, str. 4474, pros. 2018, doi: 10.3390/s18124474.

- [14] A. E. Akin-Ponnle i N. B. Carvalho, „Energy Harvesting Mechanisms in a Smart City—A Review“, *Smart Cities*, sv. 4, izd. 2, str. 476–498, tra. 2021, doi: 10.3390/smartsities4020025.
- [15] D. Todolí-Ferrandis, J. Silvestre-Blanes, S. Santonja-Climent, V. Sempere-Paya, i J. Vera-Pérez, „Deploy&Forget wireless sensor networks for itinerant applications“, *Comput. Stand. Interfaces*, sv. 56, str. 27–40, velj. 2018, doi: 10.1016/j.csi.2017.09.002.
- [16] M. Healy, T. Newe, i E. Lewis, „Wireless Sensor Node hardware: A review“, u *2008 IEEE Sensors*, Lecce, Italy, lis. 2008, str. 621–624. doi: 10.1109/ICSENS.2008.4716517.
- [17] J. N. Soliman i N. M. A. Azmy, „Energy Harvesting in Wireless Sensor Networks A Comprehensive Survey“, 2014, [Na internetu]. Dostupno na: [https://www.researchgate.net/publication/322420434\\_Energy\\_Harvesting\\_in\\_Wireless\\_Sensor\\_Networks\\_A\\_Comprehensive\\_Survey](https://www.researchgate.net/publication/322420434_Energy_Harvesting_in_Wireless_Sensor_Networks_A_Comprehensive_Survey)[https://www.researchgate.net/publication/322420434\\_Energy\\_Harvesting\\_in\\_Wireless\\_Sensor\\_Networks\\_A\\_Comprehensive\\_Survey](https://www.researchgate.net/publication/322420434_Energy_Harvesting_in_Wireless_Sensor_Networks_A_Comprehensive_Survey)
- [18] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors*. New York, NY: Springer New York, 2010. doi: 10.1007/978-1-4419-6466-3.
- [19] M. M. Ahsan, M. Hasanuzzaman, A. G. Olabi, i M. S. J. Hashmi, „Review of the Reliability and Connectivity of Wireless Sensor Technology“, u *Comprehensive Materials Processing*, Elsevier, 2014, str. 571–588. doi: 10.1016/B978-0-08-096532-1.01327-3.
- [20] „What is the Internet of Things (IoT)?“ <https://www.oracle.com/internet-of-things/what-is-iot/> (pristupljeno 08. ožujak 2023.).
- [21] M. A. Matin i M. M. Islam, „Overview of Wireless Sensor Network“, u *Wireless Sensor Networks - Technology and Protocols*, M. Matin, Ur. InTech, 2012. doi: 10.5772/49376.
- [22] „About Us | Who We Are | The Alliance“, *CSA-IOT*. <https://csa-iot.org/about/> (pristupljeno 09. ožujak 2023.).
- [23] „Chirp spread spectrum“, *Wikipedia*. 19. rujan 2022. Pristupljeno: 08. ožujak 2023. [Na internetu]. Dostupno na: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Chirp\\_spread\\_spectrum&oldid=1111168230](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Chirp_spread_spectrum&oldid=1111168230)
- [24] F. Duarte i A. Ferreira, „Energy harvesting on road pavements: state of the art“, *Proc. Inst. Civ. Eng. - Energy*, sv. 169, izd. 2, str. 79–90, svi. 2016, doi: 10.1680/jener.15.00005.
- [25] „The History of Solar“. U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy. Pristupljeno: 03. rujan 2023. [Na internetu]. Dostupno na: [https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar\\_timeline.pdf](https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf)
- [26] M. Aamir Iqbal i ostali, „Materials for Photovoltaics: Overview, Generations, Recent Advancements and Future Prospects“, u *Thin Films Photovoltaics*, B. Zaidi i C. Shekhar, Ur. IntechOpen, 2022. doi: 10.5772/intechopen.101449.
- [27] „Photoelectric effect“, *Wikipedia*. 28. veljača 2023. Pristupljeno: 09. ožujak 2023. [Na internetu]. Dostupno na: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Photoelectric\\_effect&oldid=1142115340](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Photoelectric_effect&oldid=1142115340)
-

- [28] Askari, Calise, i Vicidomini, „Design and Comparative Techno-Economic Analysis of Two Solar Polygeneration Systems Applied for Electricity, Cooling and Fresh Water Production“, *Energies*, sv. 12, izd. 22, str. 4401, stu. 2019, doi: 10.3390/en12224401.
- [29] J. Pastuszak i P. Węgierek, „Photovoltaic Cell Generations and Current Research Directions for Their Development“, *Materials*, sv. 15, izd. 16, str. 5542, kol. 2022, doi: 10.3390/ma15165542.
- [30] M. B. Hayat, D. Ali, K. C. Monyake, L. Alagha, i N. Ahmed, „Solar energy-A look into power generation, challenges, and a solar-powered future“, *Int. J. Energy Res.*, sv. 43, izd. 3, str. 1049–1067, ožu. 2019, doi: 10.1002/er.4252.
- [31] V. I. Klimov, „Mechanisms for Photogeneration and Recombination of Multiexcitons in Semiconductor Nanocrystals: Implications for Lasing and Solar Energy Conversion“, *J. Phys. Chem. B*, sv. 110, izd. 34, str. 16827–16845, kol. 2006, doi: 10.1021/jp0615959.
- [32] Suman, P. Sharma, i P. Goyal, „Evolution of PV technology from conventional to nano-materials“, *Mater. Today Proc.*, sv. 28, str. 1593–1597, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.846.
- [33] E. Bellini, „Six-junction III–V solar cell with 47.1% efficiency“, *pV-magazine*, 14. travanj 2020. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.pv-magazine.com/2020/04/14/six-junction-iii-v-solar-cell-with-47-1-efficiency/>
- [34] P. Glynne-Jones, M. J. Tudor, S. P. Beeby, i N. M. White, „An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems“, *Sens. Actuators Phys.*, sv. 110, izd. 1–3, str. 344–349, velj. 2004, doi: 10.1016/j.sna.2003.09.045.
- [35] B. D. Truong, C. Phu Le, i E. Halvorsen, „Analysis of Electrostatic Energy Harvesters Electrically Configured as Bennet’s Doublers“, *IEEE Sens. J.*, sv. 17, izd. 16, str. 5180–5191, kol. 2017, doi: 10.1109/JSEN.2017.2723571.
- [36] T. J. Kaźmierski i S. Beeby, Ur., *Energy Harvesting Systems*. New York, NY: Springer New York, 2011. doi: 10.1007/978-1-4419-7566-9.
- [37] „History of Piezoelectricity“, *PIEZO.COM*. <https://piezo.com/pages/history-of-piezoelectricity> (pristupljeno 09. ožujak 2023.).
- [38] S. Roundy i P. K. Wright, „A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics“, *Smart Mater. Struct.*, sv. 13, izd. 5, str. 1131–1142, lis. 2004, doi: 10.1088/0964-1726/13/5/018.
- [39] R. Kishore i S. Priya, „A Review on Low-Grade Thermal Energy Harvesting: Materials, Methods and Devices“, *Materials*, sv. 11, izd. 8, str. 1433, kol. 2018, doi: 10.3390/ma11081433.

## SAŽETAK

Ovaj završni radi bavi se bežičnim senzorskim mrežama i njihovoj primjeni u tehnologijama „pametnih gradova“ te pokušava odgovoriti na pitanje povećanja autonomije bežičnog senzorskog čvora primjenom tehnologija za prikupljanje niskorazinske tehnologije iz okoliša. Kroz rad obrađena je arhitektura bežičnog senzorskog čvora s naglaskom na minimalizaciju potrošnje energije kao i principi prikupljanja niskorazinske energije na kolniku od kojih detaljnije fotonaponska, piezoelektrična i termoelektrična pretvorba. U nastavku su predstavljena tri idejna rješenja hibridnih sustava za prikupljanje niskorazinske energije na kolniku te je odabrano i razrađeno jedno rješenje.

**Ključne riječi:** bežične senzorske mreže, pametni grad, bežični senzorski čvor, niskoenergetska bežična komunikacija, prikupljanje niskorazinske energije iz okoliša, fotonaponski članak, piezoelektrični sustavi za prikupljanje niskorazinske energije, sustavi za prikupljanje niskorazinske energije, hibridni sustavi za prikupljanje energije

## SUMMARY

This final thesis deals with wireless sensor networks and their application in "smart city" technologies while tries to answer the question of increasing the autonomy of a wireless sensor node by applying hybrid energy harvesters. The architecture of the wireless sensor node with an emphasis on the minimization of energy consumption and the principles of energy harvesting on the roadway, of which photovoltaic, piezoelectric, and thermoelectric conversion are discussed in detail. In the following, three conceptual designs of hybrid energy harvesting sensor nodes for collecting low-level energy on the pavement are presented, and one conceptual design was selected and developed.

**Keywords:** wireless sensor network, smart city, wireless sensor node, energy harvesting, photovoltaic cell, piezoelectric, thermoelectric, hybrid energy harvesting