



UNIVERZITET U NIŠU
ELEKTRONSKI FAKULTET



Dejan V. Milić

**KARAKTERIZACIJA
TERMOELEKTRIČNIH MODULA
PRIMENJENIH ZA NAPAJANJE ČVOROVA
BEŽIČNIH SENZORSKIH MREŽA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Niš, 2018.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF ELECTRONIC ENGINEERING



Dejan V. Milić

**CHARACTERIZATION OF
THERMOELECTRIC MODULES FOR
APPLICATION IN ENERGY HARVESTING
WIRELESS SENSOR NODES**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2018.

Podaci o doktorskoj disertaciji

Mentor: dr Aneta Prijić, vanredni profesor, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet u Nišu

Naslov: Karakterizacija termoelektričnih modula primenjenih za napajanje čvorova bežičnih senzorskih mreža

Rezime: Predmet istraživanja disertacije obuhvata karakterizaciju više komercijalnih termoelektričnih modula namenjenih hlađenju/grejanju sa ciljem izbora najpogodnijeg za primenu kao generatora u čvoru samonapajajućih bežičnih senzorskih mreža. Razmatrani su moduli različitih dimenzija, strukturnih i tehnoloških parametara. Analiza je bazirana na rezultatima numeričkih simulacija pomoću softvera ANSYS 18.0 Workbench u tri termički različita radna stanja (kao samostalne komponente, sa hladnjakom i unutar bežičnog senzorskog čvora) i korišćenjem električnog SPICE kompatibilnog modela senzorskog čvora za stacionarni režim rada. Razmatrana je vrednost napona, odnosno snage koju generator predaje potrošaču pri različitim temperaturnim pobudama. Rezultati dobijeni simulacijama upoređeni su sa analitičkim aproksimacijama i termovizijskim i električnim eksperimentalnim merenjima. Ispitan je i uticaj temperature okoline kao i brzine strujanja vazduha na funkcionisanje termoelektričnog bežičnog senzorskog čvora.

Naučna oblast: Elektrotehničko i računarsko inženjerstvo
Naučna disciplina: Mikroelektronika i mikrosistemi

Ključne reči: Samonapajajući sistemi, Bežični senzorski čvor, Termoelektrični generator

UDK: ((621.91+681.586):621.391):621.313.52

CERIF klasifikacija: T 171 Mikroelektronika

Tip licence Kreativne zajednice: **CC BY-NC-ND**

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor:	PhD Aneta Prijić, Associate Professor, University of Niš, Faculty of Electronic Engineering
Title:	Characterization of thermoelectric modules for application in energy harvesting wireless sensor nodes
Abstract:	<p>The subject of the dissertation includes characterization of the several commercial thermoelectric cooling/heating modules with the aim to select preferable ones for use as generators in energy harvesting wireless sensor nodes. Modules of different dimensions, structural and technological parameters were considered. The analysis is based on the results of numerical simulations using the ANSYS 18.0 Workbench software under three thermally different operating conditions (as standalone devices, with a heatsink and inside the wireless sensor node), and using a steady-state SPICE compatible electrical model of the wireless sensor node. The voltage and power transferred to the load at various temperature differences are discussed. Results obtained by the simulation are compared with an analytical approximation, thermovision imaging and electrical measurements. The influence of ambient temperature and air velocity on the thermoelectric characteristics of the wireless sensor node was also examined.</p>
Scientific Field:	Electrical and Computer Engineering
Scientific Discipline:	Microelectronics and Microsystems
Key Words:	Energy harvesting systems, Wireless sensor node, Thermoelectric generator
UDC:	((621.91+681.586):621.391):621.313.52
CERIF Classification:	T 171 Microelectronics
Creative Commons License Type:	CC BY-NC-ND

Zahvalnost

Veliku zahvalnost, u prvom redu, dugujem svom mentoru prof. dr Aneti Prijić koja mi je pružila svu neophodnu pomoć pri izradi doktorske disertacije, i što je uvek imala strpljenja i vremena za moja brojna pitanja.

Takođe, zahvaljujem se i prof. dr Zoranu Prijiću kao i svim kolegama sa Katedre za mikroelektroniku na pruženoj pomoći, velikom razumevanju i profesionalnim savetima.

Posebu zahvalnost dugujem svojoj majci Milici, bratu Draganu, supruzi Ireni i sinovima Marku i Vukašinu. Njihova podrška mi je uvek davala podstrek i energiju da istrajem u svojoj nameri.

Autor

2018. god

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. BEŽIČNE SENZORSKE MREŽE	5
2.1. Primena bežičnih senzorskih mreža	6
2.2. Arhitektura čvora bežične senzorske mreže	10
2.3. Napajanje čvorova bežične senzorske mreže	13
2.4. Termoelektrični generator kao izvor napajanja čvora bežične senzorske mreže	15
2.5. Termoelektrični efekti	19
2.5.1. Zibekov efekat	19
2.5.2. Peltijev efekat	19
2.5.3. Tomsonov efekat	20
2.5.4. Džulov efekat	20
2.6. Analitički model TEG-a	22
2.7. Karakteristični parametri TEG-a	24
2.8. Opis razmatranog WSN čvora	26
3. KARAKTERIZACIJA TERMOELEKTRIČNIH MODULA	28
3.1. Postupak 3D numeričke simulacije	29
3.1.1. Kreiranje baze materijala	29
3.1.2. Kreiranje 3D modela bežičnog senzorskog čvora	30
3.1.3. Dodeljivanje materijala i kreiranje diskretizacione mreže	33
3.1.4. Postavljanje graničnih uslova i definisanje opterećenja	34
3.1.5. Pokretanje, definisanje i post-procesiranje rezultata simulacije	35
3.2. Rezultati simulacije	36
3.2.1. Simulacija TEG-a kao samostalne komponente - Slučaj 1	36
3.2.2. Simulacija TEG-a sa montiranim hladnjakom na hladnoj strani - Slučaj 2	37
3.2.3. Simulacija TEG-a unutar samonapajajućeg bežičnog senzorskog čvora – Slučaj 3	38
3.3. Eksperimentalna verifikacija	39
3.3.1. Samostalni TEG – Eksperiment 1	39
3.3.2. TEG unutar WSN čvora – Eksperiment 2	41
3.4. Rezultati karakterizacije	42
3.4.1. Rezultati za prvi slučaj	42
3.4.2. Poređenje rezultata dobijenih analitičkim modelom i simulacijom za samostalan TEG	43
3.4.3. Rezultati za drugi slučaj	46
3.4.4. Rezultati za treći slučaj	47

3.4.5. Razmatranje ponašanja TEG-ova sa aspekta primene u WSN čvoru	48
4. UTICAJ AMBIJENTALNIH USLOVA NA RADNE KARAKTERISTIKE WSN ČVORA	52
4.1. Postavka simulacije	52
4.2. Proračun koeficijenta hlađenja - konvekcione korelacije.....	55
4.2.1. Prirodna konvekcija – horizontalna površina.....	56
4.2.2. Prirodna konvekcija – vertikalna površina.....	57
4.2.3. Prirodna konvekcija – površine pod nagibom.....	58
4.2.4. Prirodna konvekcija – horizontalne cilindrične površine.....	59
4.2.5. Prinudna konvekcija – horizontalna ravan	60
4.2.6. Prinudna konvekcija – horizontalna cilindrična površina	61
4.3. Prirodna konvekcija – rezultati i diskusija	62
4.4. Prinudna konvekcija – rezultati i diskusija	64
5. SPICE KOMPATIBILNI MODEL WSN ČVORA ZA STACIONARNI REŽIM RADA	72
5.1. Ekvivalentni elektro-termički model TEG-a.....	72
5.2. Modeliranje WSN čvora u LTSpice.....	75
5.3. Rezultati simulacije	77
5.4. Ispitivanje uticaja Džulovog i Peltijevog efekta na vrednost generisanog napona	80
6. ZAKLJUČAK.....	82
7. LITERATURA	86
8. BIOGRAFIJA AUTORA	92
9. SPISAK OBJAVLJENIH NAUČNIH RADOVA	93

SPISAK SLIKA

Slika 2.1 Bežična senzorska mreža	6
Slika 2.2 Oblasti primene bežičnih senzorskih mreža.....	7
Slika 2.3 Monitoring vitalnih parametara pacijenta	8
Slika 2.4 Detektovanje broja vozila na putu [42].....	9
Slika 2.5 Koncept pametne zgrade (<i>smart home</i>) [43].....	10
Slika 2.6 Arhitektura senzorskog čvora	11
Slika 2.7 Izvori napajanja za bežične senzorske mreže	14
Slika 2.8 Blok šema termoelektričnog bežičnog senzorskog čvora	15
Slika 2.9 Struktura termoelektričnog generatora.....	16
Slika 2.10 Izgled jednog termopara.....	16
Slika 2.11 Temperaturno područje primene termoelektričnih materijala p-tipa [49]	18
Slika 2.12 Temperaturno područje primene termoelektričnih materijala n-tipa [49]	18
Slika 2.13 Zibekov efekat.....	19
Slika 2.14 Elektrotermički procesi unutar termoelektričnog modula kada radi kao TEG	21
Slika 2.15 Osnovni elektro-termički model TEG-a sa potrošačem.....	22
Slika 2.16 Čvor bežične senzorske mreže: (a) realizovani sistem [55] (b) simulacioni model	26
Slika 2.17 Električna šema WSN čvora	27
Slika 3.1 Kreiranje projekta u okviru softverskog paketa ANSYS Workbench	29
Slika 3.2 Izgled korisničkog interfejsa u okviru ANSYS-a u kome se nalazi biblioteka materijala – Engineering Data (Postavljanje temperaturne zavisnosti Zibekovog koeficijenta)	30
Slika 3.3 Modeliranje 31 termopara za TEG5.....	31
Slika 3.4 Završni izgled modeliranog TEG5.....	31
Slika 3.5 Izgled modeliranog TEG5 sa hladnjakom	32
Slika 3.6 Konačni izgled modeliranog WSN čvora sa TEG5	32
Slika 3.7 Izgled korisničkog interfejsa u okviru ANSYS-a nakon poboljšanja mreže čvorova	33
Slika 3.8 Izgled mreže čvorova za TEG5 (a) 30000 čvorova (b) 60000 čvorova.....	34
Slika 3.9 Izgled korisničkog interfejsa u okviru ANSYS-a nakon definisanja ulaznih parametara WSN čvora sa TEG5	35
Slika 3.10 Raspodela temperature (a) i električnog potencijala (b) unutar TEG5 za $T_{topla} = 45^{\circ}\text{C}$, $T_{hladna} = 30^{\circ}\text{C}$ i $I_L = 12\text{mA}$	36
Slika 3.11 Raspodela temperature (a) i električnog potencijala (b) unutar TEG5 i hladnjaka za $T_{topla} = 45^{\circ}\text{C}$, $T_{okoline} = 30^{\circ}\text{C}$ i $I_L = 12\text{mA}$	37
Slika 3.12 Raspodela temperature (a) i električnog potencijala (b) za TEG5 unutar WSN čvora pri $T_{topla} = 45^{\circ}\text{C}$, $T_{okoline} = 30^{\circ}\text{C}$ i $I_L = 12\text{mA}$	39
Slika 3.13 Raspodela temperature za TEG5 dobijena (a) simulacijom i (b) eksperimentom pri $T_{topla} = 45^{\circ}\text{C}$, $T_{hladna} = 30^{\circ}\text{C}$ i $I_L = 12\text{mA}$	40
Slika 3.14 Raspodela temperature za TEG5 unutar WSN čvora dobijena (a) simulacijom i (b) eksperimentom (realni uslovi rada) pri $T_{topla} = 45^{\circ}\text{C}$, $T_{okoline} = 30^{\circ}\text{C}$ i $I_L = 12\text{mA}$	41
Slika 3.15 Zavisnost napona na potrošaču V_L od struje kroz termoeletrično kolo I_L sa $\Delta T = T_{topla} - T_{hladna}$ ($T_{hladna} = 30^{\circ}\text{C}$) kao parametar za samostalni TEG1; ulazna strujno naponska karakteristika kola LTC3108 sa odnosom transformacije 1:100 (isprekidana linija)	42
Slika 3.16 Zavisnost napona V_L (puna linija) i snage P_L (isprekidana linija) na potrošaču od otpornosti potrošača R_L za $T_{topla} = 45^{\circ}\text{C}$, $T_{hladna} = 30^{\circ}\text{C}$ za samostalne TEG-ove	43
Slika 3.17 Zavisnosti napona na potrošaču $V_L = f(I_L)$ za tri različite vrednosti temperature T_{topla} (40°C , 45°C i 50°C) uz fiksnu temperaturu $T_{hladna} = 30^{\circ}\text{C}$, dobijene analitički i simulacijom za TEG1	44

Slika 3.18 Zavisnosti razlike napona na potrošaču V_L dobijenog analitički i simulacijom za tri različite vrednosti ΔT (zavisnosti koje nisu prikazane za TEG1, TEG2 i TEG5 nalaze se u opsegu zavisnosti između TEG3 i TEG6).....	44
Slika 3.19 Zavisnost napona V_L (puna linija) i snage P_L (isprekidana linija) od temperaturne razlike $\Delta T = T_{topla} - T_{hladna}$ ($T_{hladna} = 30^\circ\text{C}$) za samostalne TEG-ove.....	45
Slika 3.20 Zavisnost napona V_L (puna linija) i snage P_L (isprekidana linija) od temperaturne razlike $\Delta T_a = T_{topla} - T_{okoline}$ ($T_{okoline} = 30^\circ\text{C}$) za TEG-ove sa hladnjakom.....	46
Slika 3.21 Zavisnost napona V_L (puna linija) i snage P_L (isprekidana linija) od temperaturne razlike $\Delta T_a = T_{topla} - T_{okoline}$ ($T_{okoline} = 30^\circ\text{C}$) za TEG-ove unutar WSN čvora.....	48
Slika 3.22 Zavisnost napona V_L od temperaturne razlike $\Delta T = T_{topla} - T_{hladna}$ ($T_{hladna} = 30^\circ\text{C}$) za samostalne TEG-ove.....	49
Slika 3.23 Zavisnost napona V_L od temperaturne razlike $\Delta T_a = T_{topla} - T_{okoline}$ ($T_{okoline} = 30^\circ\text{C}$) za TEG-ove sa hladnjakom.....	49
Slika 3.24 Zavisnost napona V_L od temperaturne razlike $\Delta T_a = T_{topla} - T_{okoline}$ ($T_{okoline} = 30^\circ\text{C}$) za TEG-ove unutar WSN čvora.....	50
Slika 3.25 Zavisnost snage P_L od temperaturne razlike $\Delta T_a = T_{topla} - T_{okoline}$ ($T_{okoline} = 30^\circ\text{C}$), dobijena simulacijom (puna linija) i eksperimentom (tačkasti prikaz) za TEG5 unutar WSN čvora.....	51
Slika 4.1 Oblik i orijentacija površina simulacione strukture WSN čvora na koje se primenjuju konvekcione korelacije.....	55
Slika 4.2 Šematski prikaz geometrije i parametara konvekcioni korelacija za prirodnu konvekciju sa gornje površine ravne horizontalne površine.....	56
Slika 4.3 Šematski prikaz geometrije i parametara konvekcioni korelacija za prirodnu konvekciju sa ravne vertikalne površine.....	57
Slika 4.4 Šematski prikaz geometrije i parametara konvekcioni korelacija za prirodnu konvekciju sa ravne površine pod nagibom.....	58
Slika 4.5 Šematski prikaz geometrije i parametara konvekcioni korelacija za prirodnu konvekciju sa dugačke horizontalne cilindrične površine.....	59
Slika 4.6 Šematski prikaz geometrije i parametara konvekcioni korelacija za prinudnu konvekciju sa gornje strane ravne horizontalne površine.....	60
Slika 4.7 Šematski prikaz geometrije i parametara konvekcioni korelacija za prinudnu konvekciju sa horizontalne cilindrične površine.....	61
Slika 4.8 Slobodna konvekcija: Raspodela temperature (a) i električnog potencijala (b) za TEG5 unutar WSN čvora pri $T_{topla} = 45^\circ\text{C}$, $T_{okoline} = 30^\circ\text{C}$ i $I_L = 12\text{mA}$	62
Slika 4.9 Zavisnost napona na potrošaču V_L od temperature okoline i temperaturne razlike ΔT_a za WSN čvor sa TEG5 pri uslovima slobodne konvekcije; $I_L = 12\text{mA}$	63
Slika 4.10 Termalna slika koja prikazuje hladnjak i gornju PCB ploču pod uticajem strujanja vazduha.....	64
Slika 4.11 Prinudna konvekcija: Sinhronizovani prikaz raspodele temperatura za dva posmatrana slučaja pri brzinama strujanja vazduha od (a) 1m/s i (b) 2m/s za TEG5 unutar WSN čvora pri $T_{topla} = 40^\circ\text{C}$, $T_{okoline} = 25^\circ\text{C}$ i $I_L = 12\text{mA}$	65
Slika 4.12 Temperaturna razlika za dva posmatrana slučaja pri brzinama strujanja vazduha od 1m/s i 2m/s za TEG5 unutar WSN čvora pri $T_{topla} = 40^\circ\text{C}$, $T_{okoline} = 25^\circ\text{C}$ i $I_L = 12\text{mA}$	66
Slika 4.13 Prinudna konvekcija: Zavisnost napona na potrošaču od brzine strujanja vazduha za WSN čvor sa TEG4; $T_{topla} = 45^\circ\text{C}$, $I_L = 12\text{mA}$	67
Slika 4.14 Prinudna konvekcija: Zavisnost napona na potrošaču od brzine strujanja vazduha za WSN čvor sa TEG5; $T_{topla} = 45^\circ\text{C}$, $I_L = 12\text{mA}$	67
Slika 4.15 Relativna promena napona na potrošaču pri prinudnoj konvekciji u odnosu na prirodnu konvekciju u zavisnosti od temperaturne razlike ΔT_a za WSN čvor sa TEG5; $T_{topla} = 45^\circ\text{C}$, $I_L = 12\text{mA}$	68

Slika 4.16 Zavisnost termičke otpornosti R_{th} od brzine strujanja vazduha v za hladnjak ATS-50350B-C2-R0	69
Slika 4.17 Minimalna temperaturna razlika ΔT_a potrebna za dobijanje napona $V_L = 40\text{mV}$ pri $T_{okoline} = 30^\circ\text{C}$ i $I_L = 12\text{mA}$ za WSN čvor sa TEG4 i TEG5	70
Slika 5.1 Ekvivalentni elektrotermički model TEG-a sa potrošačem i primenjenom temperaturnom razlikom	73
Slika 5.2 Delovi WSN čvora predstavljeni odgovarajućim elementima u ekvivalentnom elektro-termičkom modelu	75
Slika 5.3 Zavisnost napona na potrošaču V_L od temperaturne razlike između tople strane i okoline za posmatrane TEG-ove (LTSpice - puna linija, ANSYS - isprekidana linija)	78
Slika 5.4 Zavisnost snage na potrošaču P_L od temperaturne razlike između tople strane WSN čvora i okoline za posmatrane TEG-ove (LTSpice - puna linija, ANSYS - isprekidana linija i eksperimentalni rezultati za TEG2).....	79
Slika 5.5 Relativna promena snage prenete potrošaču $\delta P_L(\%)$ u zavisnosti od temperaturne razlike između tople strane WSN čvora i okoline sa izostavljenim Peltijevim efektom	80

SPISAK TABELA

Tabela 2.1 Dostupna energija iz najčešće korišćenih izvora.....	14
Tabela 2.2 Karakteristični geometrijski, električni i termički parametri razmatranih TEG-ova.	25
Tabela 3.1 Minimalna temperaturna razlika koja je potrebna za dobijanje $V_L=40$ mV (pri temperaturama T_{hladna} i $T_{okolina}$ postavljenim na 30 °C).....	50
Tabela 3.2 Uporedni prikaz rezultata dobijenih simulacijom i eksperimentom za TEG5 unutar WSN čvora za tri vrednosti temperaturne razlike ΔT_a i $I_L = 12$ mA.....	51
Tabela 4.1 Kriterijumi sličnosti [62].....	53
Tabela 4.2 Uporedni rezultati dobijeni simulacijom i eksperimentom za WSN čvor sa TEG5 ($\Delta T_a = 18$ °C, $I_L = 12$ mA)	69
Tabela 5.1 Analogija između električnih i termičkih veličina [67].....	72
Tabela 5.2 Dimenzije i termičke karakteristike elemenata WSN čvora	76

1. UVOD

Toplota koja nastaje kao nusproizvod u svim sferama današnjeg života – u industriji, domovima i transportu, predstavlja vid „izgubljene“ energije. Novija istraživanja idu u tom pravcu da se ta „izgubljena“ energija reciklira i pretvori u oblik pogodan za dalje korišćenje [1-3]. Takođe, postoji i energija iz naše okoline koja može biti efikasno iskorišćena (solarna, toplotna, mehanička, hemijska, elektromagnetna). Za proces pri kome se deo te energije prevodi u električnu, skladišti i koristi u sistemu, u literaturi se najčešće koristi termin *energy harvesting*, koji u doslovnom prevodu znači „žetva energije“. Ovim načinom dobija se električna energija koja je dovoljna za napajanje elektronskih sistema koji za svoj rad zahtevaju male količine energije [4]. Velika prednost koju ima *energy harvesting* jeste da predstavlja ekološki čist i stalni izvor napajanja, a takođe ne zahteva održavanje odnosno nema potrebe za zamenom baterija.

Sistemi koji baziraju svoj rad na ovom principu nazivaju se samonapajajući sistemi. Intenzivan razvoj elektronskih komponenti izuzetno male potrošnje, kao i napredak u oblasti tehnologije mikrosistema, uslovio je intenzivnija istraživanja u ovoj oblasti. Najčešće, ovi sistemi predstavljaju čvorove bežične senzorske mreže (*Wireless Sensor Network* - skraćeno WSN) i dizajnirani su sa ciljem da vrše telemetrijske funkcije [5]. Čvorovi se napajaju električnom energijom dobijenom konverzijom nekog drugog vida dostupne energije iz njihove okoline. U praksi se mogu naći sistemi koji konvertuju solarnu, termalnu, mehaničku, hemijsku ili elektromagnetnu energiju [6]. U zavisnosti od raspoloživih izvora energije u svojoj okolini, ovi sistemi mogu koristiti energiju jednog izvora ili više njih (*multi-harvesting*) [6-9]. Iako mogu da koriste razne fizičke fenomene [10-13], u praksi je većina sistema koji pretvaraju toplotnu energiju u električnu bazirana na termoelektričnim generatorima (TEG-ovima) [14]. Ovi generatori pretvaraju temperaturnu razliku u električni napon koristeći takozvani Zibekov efekat. Osim od temperaturne razlike, generisani napon zavisi i od materijala, dimenzija i konstrukcije generatora. Dizajn generatora zavisi od oblasti primene: da li je to industrijska primena, autoindustrija ili komercijalna upotreba [15, 16]. U novije vreme postoje povećana interesovanja za fleksibilne TEG-ove za industrijsku primenu [17], primenu u medicini gde se temperatura tela koristi kao izvor toplote [18, 19], kao i za *on-chip* TEG-ove [20].

U samonapajajućim senzorskim sistemima se teži ka kompaktnosti i što manjim dimenzijama, tako da se TEG-ovi obično ugrađuju u hibridne funkcionalne blokove čime je njihov rad podređen termičkim karakteristikama bloka čiji je sastavni deo [21]. Tokom postupka projektovanja ovih sistema potrebno je imati što više parametara vezanih za ponašanje odabranog TEG-a pri različitim pobudama i ograničenjima.

Karakterizacija TEG-ova pri različitim radnim uslovima, bazirana na podacima iz tehničkih specifikacija, može biti realizovana analitički, eksperimentalno ili putem numeričkih simulacija. Analitički model TEG-a je baziran na sistemu nelinearnih diferencijalnih jednačina koje se u zatvorenom obliku mogu rešiti samo uz određene pretpostavke vezane za specifične termičke uslove rada [14, 22, 23]. Eksperimentalne metode podrazumevaju ekstrakciju termoelektričnih parametara ili određivanje napona otvorenog kola i predate snage potrošaču od strane TEG-a [14, 23, 24]. Sveobuhvatno numeričko modelovanje zahteva višestruke simulacije u spregnutim fizičkim domenima [25, 26]. Modelovanje TEG-ova u simulatorima električnih kola tipa SPICE se bazira na međusobno interagujućim električnim i ekvivalentnim termičkim kolima [14, 23, 24, 27].

Cilj ove doktorske disertacije je da pokaže da i široko dostupni komercijalni termoelektrični moduli, koji su prvenstveno namenjeni hlađenju/grejanju, mogu efikasno zameniti specijalno projektovane i skupe termoelektrične generatore [28, 29] namenjene samonapajajućim sistemima. U istraživanje je uključeno 6 komercijalnih termoelektričnih modula sa ciljem izbora najpogodnijeg za napajanje čvora bežične senzorske mreže. Izabrani su moduli različitih dimenzija, strukturnih i tehnoloških parametara. Parametri koji pokazuju njihovu efikasnost kada se koriste kao generatori određeni su iz podataka navedenih od strane proizvođača [30, 31]. Kako bi se izbegao dugotrajan i skup koncept eksperimentalnih proba i grešaka, rad TEG-ova simuliran je softverom za numeričko modelovanje – *ANSYS 18.0 Multiphysics Workbench* [32]. Za razliku od razmatranja koja se mogu naći u literaturi, karakterizacija TEG-ova je izvršena u tri temperaturno različita uslova rada: kao samostalne komponente, sa montiranim hladnjakom na hladnoj strani i unutar samonapajajućeg bežičnog senzorskog čvora.

Na osnovu rezultata simulacije određen je kriterijum za izbor najpogodnijeg TEG-a za primenu u konkretnom čvoru. Urađeno je poređenje rezultata dobijenih simulacijom sa analitičkim modelom da bi se odredila korespondencija između dve metode karakterizacije. Istraživan je i uticaj ambijentalnih uslova na performanse WSN čvora, koristeći 3D

numeričku simulaciju kompletnog sistema. U analizi su uključena tri različita TEG-a radi poređenja rezultata. Analizirani su slučajevi prirodne i prinudne konvekcije primenom korelacija konvekcije koje opisuju prenos toplote između čvora i okoline. Kao dodatna metoda karakterizacije, projektovan je i SPICE kompatibilni model WSN čvora za stacionarni režim rada sa ciljem ispitivanja uticaja pojedinih termoelektričnih efekata unutar TEG-ova.

Da bi se potvrdili rezultati dobijeni simulacijom, urađeni su i termovizijski snimci raspodele temperature na TEG-ovima kao i na celom WSN čvoru. Izvršena su i električna merenja snage predate kolu za skladištenje i upravljanje prikupljenom energijom unutar čvora pri različitim temperaturnim pobudama u laboratorijskim uslovima.

Disertacija se sastoji od uvoda, četiri poglavlja, zaključnih razmatranja, spiska korišćene literature i spiska objavljenih radova.

U uvodnom delu date su osnovne napomene o predmetu istraživanja i dat je kratak prikaz istraživanja sprovedenih u okviru disertacije.

U okviru drugog poglavlja dati su osnovni pojmovi o bežičnim senzorskim mrežama (WSN), oblastima njihove primene, arhitekturi bežičnih senzorskih čvorova, kao i o mogućnostima za njihovo napajanje. U drugom delu ovog poglavlja detaljnije je opisan termoelektrični generator (TEG) kao izvor napajanja u WSN čvoru. Detaljno je prikazan analitički model TEG-a, kao i opis svih termoelektričnih efekata koji utiču na njegov rad. Posebno je istaknut značaj i opisan način određivanja parametara bitnih za karakterizaciju TEG-ova na osnovu podataka navedenih od strane proizvođača.

Treće poglavlje podeljeno je na četiri potpoglavlja: postupak 3D numeričke simulacije, rezultati simulacije, eksperimentalna verifikacija i rezultati karakterizacije. U prvom potpoglavlju dat je detaljan opis modelovanja TEG-a i WSN čvora upotrebom softvera za numeričko modelovanje ANSYS 18.0 Multiphysics Workbench. U drugom potpoglavlju prikazani su rezultati simulacije TEG-ova u tri temperaturno različita uslova rada – tri različita slučaja (kao samostalni TEG, TEG sa hladnjakom na hladnoj strani i TEG unutar WSN čvora). U trećem potpoglavlju, pored detaljnih opisa eksperimentalnih rezultata, data je i uporedna analiza rezultata dobijenih simulacijama i eksperimentom za jedan izabrani TEG. U četvrtom potpoglavlju predstavljeni su rezultati karakterizacije dobijeni simulacijama za sva tri slučaja. Za slučaj samostalnog TEG-a urađeno je i poređenje rezultata dobijenih simulacijom sa analitičkim modelom da bi se odredila korespondencija između ova dva metoda karakterizacije. U drugom slučaju analiziran je rad TEG-a sa hladnjakom i proces

prirodne konvekcije sa svih slobodnih površina hladnjaka kao dominantnog mehanizma odvođenja toplote sa generatora. Ispitana je i održivost analitičkog modela u ovom slučaju. U trećem slučaju razmatran je uticaj ostalih komponenata unutar WSN čvora na efikasnost samog TEG-a. Dat je uporedni prikaz zavisnosti napona i snage predate potrošaču od temperaturne razlike za sve TEG-ove dobijene simulacijama kao i eksperimentom. U sva tri slučaja određeni su kriterijumi za izbor najpogodnijeg TEG-a za primenu u konkretnom senzorskom čvoru. Na kraju poglavlja određene su minimalne vrednosti temperaturne razlike neophodne za pravilno funkcionisanje WSN čvora.

U četvrtom poglavlju razmatran je uticaj efekata koji se neizbežno nalaze u prirodnom radnom okruženju WSN čvora, kao što su variranje temperature okoline i strujanje vazduha, na generisani napon TEG-a. Funkcionisanje čvora simulirano je korišćenjem potpuno integrisanog numeričkog elektrotermičkog modela sa konvektivnim korelacijama.

U petom poglavlju opisan je način projektovanja SPICE kompatibilnog modela WSN čvora za stacionarni režim rada. Detaljno je opisan način formiranja elektrotermičkog modela TEG-a kao i modeliranje WSN čvora. Rezultati su upoređeni sa rezultatima dobijenim multifizičkim simulacijama i eksperimentima. Takođe, upotrebom ovog modela ispitan je uticaj pojedinih termoelektričnih efekata unutar odabranih TEG-ova.

U šestom poglavlju data su zaključna razmatranja i sumirani rezultati istraživanja. Istaknut je naučni doprinos doktorske disertacije i predloženi pravci daljeg istraživanja.

Zadnja tri poglavlja daju spisak korišćene literature, biografiju autora i objavljene naučne radove iz oblasti disertacije.

2. BEŽIČNE SENZORSKE MREŽE

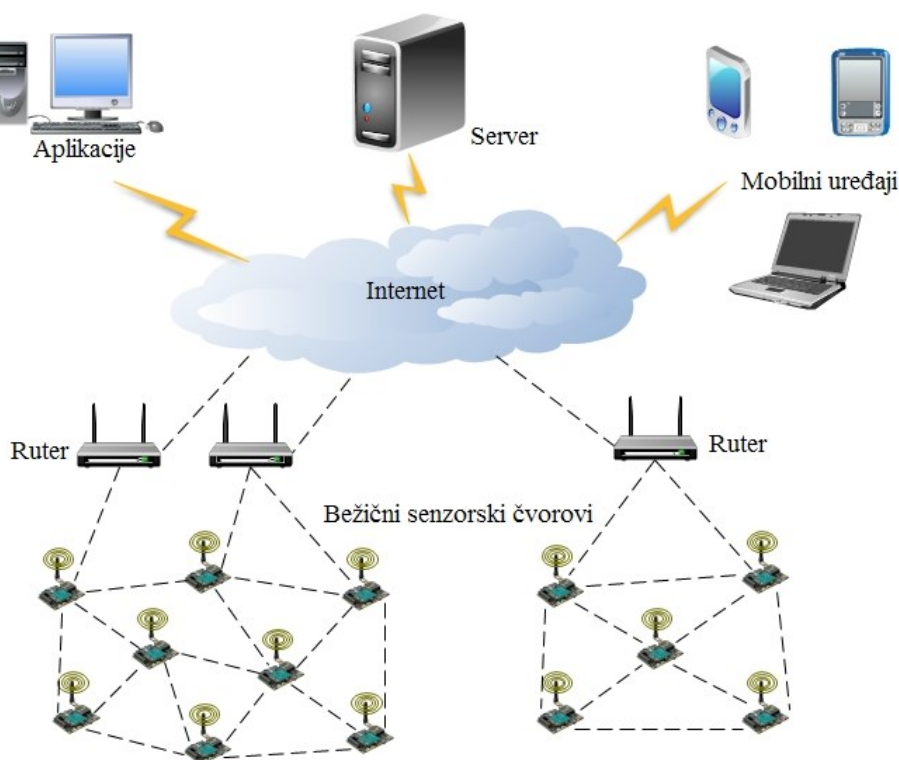
Bežične senzorske mreže (WSN), kao polje delovanja mnogih naučnika iz područja elektrotehnike, biologije, medicine i drugih oblasti, postoji unazad već tridesetak godina. Razvoj bežičnih senzorskih mreža direktno je uslovljen razvojem poluprovodničke tehnologije (tranzistori), koji svojom veličinom uslovljavaju snagu, delotvornost, a time i iskorišćenje bežičnih senzorskih mreža. U poluprovodničkoj industriji broj tranzistora na komercijalno isplativom čipu se gotovo udvostručuje iz godine u godinu, što izrazito pogoduje razvoju bežičnih senzorskih mreža. Kao vrlo važan faktor u njihovom razvoju, treba navesti kretanje cena poluprovodničkih komponenti od kojih su građene WSN. U prošlosti, bilo je vrlo bitno da WSN budu cenom prihvatljive, kako bi se mogle komercijalizovati i koristiti u naučnim disciplinama koje nisu direktno povezane sa vojnom industrijom. Danas se sve više takve težnje ostvaruju. Takođe i veliki napredak u razvoju mikro elektro-mehaničkih sistema (*Micro Electro-Mechanical Systems* – MEMS) i senzorskih tehnologija, kao i ubrzani razvoj bežičnih komunikacionih tehnologija, doprineli su ubrzanom razvoju WSN-a.

Bežična senzorska mreža predstavlja skup velikog broja autonomnih, prostorno razuđenih senzorskih čvorova koji imaju sposobnost samoorganizacije u vidu topologije mreže. Senzorski čvorovi detektuju događaje i prikupljaju podatke iz okruženja i međusobno saraduju na obradi i prenosu podataka. U zavisnosti od interakcije između izvora i odredišta, kao i prirode događaja koji se posmatra, postoji nekoliko standardnih načina prikupljanja podataka:

- Detekcija događaja (svi čvorovi šalju podatke nadređenom samo kada se dogodi neka promena u nadgledanom regionu),
- Periodično javljanje (svi čvorovi šalju podatke o nagledanoj pojavi u tačno određenim vremenskim periodima. Dužina te periode zavisi od tipa aplikacije, kao i od prirode nadgledane pojave),
- Kontinualno nadgledanje (kontinualno praćenje nekog objekta, čoveka ili životinje u nadgledanom regionu i to u vremenu i prostoru),
- Predviđanje događaja (svi podaci koje čvorovi prikupljaju sa različitih mesta mogu se posmatrati kao promenljive određene funkcije definisane za to mesto. Na osnovu vremenskih ili prostornih aproksimacija tih postavljenih funkcija moguće je predvideti neke buduće događaje poput lokacije, putanje,

ili osobine nadgledanog objekta kao i izrada temperaturne mape u regionu koji se posmatra.

Čvorovi bežičnih senzorskih mreža su često osposobljeni za merenje različitih parametara iz okruženja. Na primer, mogu da mere temperaturu, pritisak, vlažnost vazduha, zvuk, hemijske supstance, ultrazvuk, infracrvene zrake, magnetno i električno polje itd. Nakon merenja, podaci se u izvesnoj meri obrađuju i nakon toga šalju bežičnim putem do servera, aplikacije ili mobilnih uređaja (Slika 2.1). Svaki pojedinačni čvor može slati podatke direktno ili preko drugih bežičnih čvorova koji se nalaze u njegovoj okolini (multihop komunikacija – prenos informacije od jednog do drugog čvora u skokovima).



Slika 2.1 Bežična senzorska mreža

2.1. Primena bežičnih senzorskih mreža

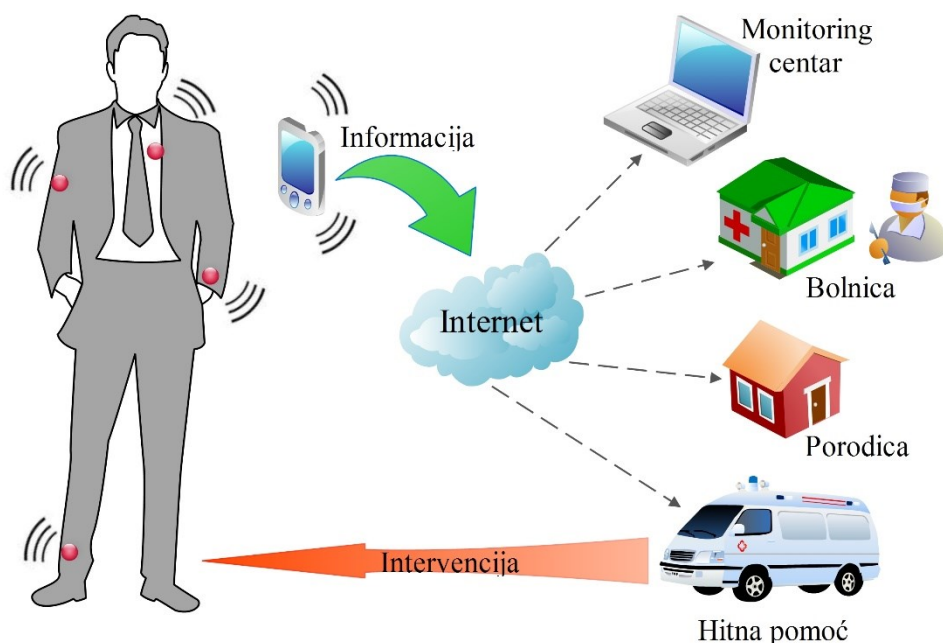
U zavisnosti od okruženja u kome se primenjuju, bežične senzorske mreže se mogu koristiti za pojedinačna ili periodična merenja, praćenje promena ili određivanje graničnih vrednosti posmatrane veličine. Takođe se koriste za vremensko i prostorno praćenje objekata i ciljeva i prenos informacija do pristupnih uređaja. Ovi sistemi našli su primenu u skoro svim segmentima društvenog života (Slika 2.2).



Slika 2.2 Oblasti primene bežičnih senzorskih mreža

U vojnoj industriji koriste se za: Praćenje i osmatranje ljudstva, opreme i municije; Prepoznavanje protivničkih jedinica i pokreta na kopnu i moru; Sistemi za detekciju izvora protivničkih projektila; Sistemi za navođenje projektila; Detekcija nuklearnih, hemijskih i bioloških pretnji; Nadgledanje bojišta; Sistemi za komandu, komunikaciju i kontrolu; Sistemi osmatranja i nadgledanja; Sistemi za procenu nanešene štete.

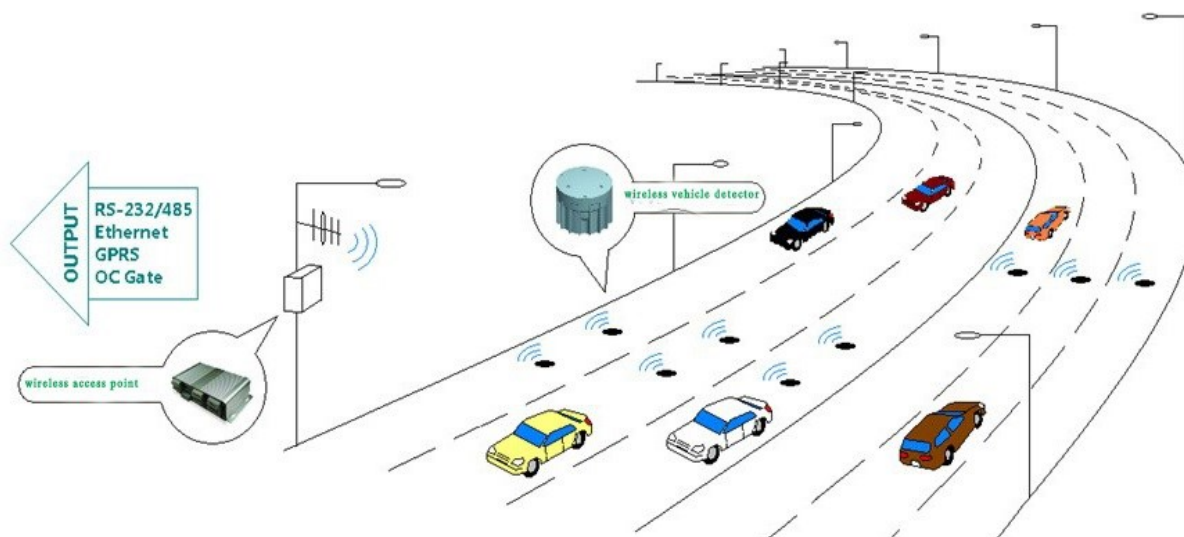
Medicina i zdravstvena kontrola Pogotovo je medicina doživela pravi napredak sa dolaskom bežičnih senzorskih mreža. Pacijentima su otvorene mogućnosti za svakodnevnu redovnu brigu i analizu zdravstvenog stanja, kao i mogućnost stalne konsultacije sa umreženim medicinskim osobljem i momentalno delovanje medicinskih aparata. Moguće je i kontinuirano praćenje vitalnih funkcija pacijenata (pritisak, EKG, puls, procenat kiseonika, temperatura) (Slika 2.3). Neke od primena su: Kontrola i praćenje medicinskog osoblja i pacijenata unutar bolničkog kruga; Praćenje količine, izdavanja i korišćenja lekova u bolnicama; Nadgledanje lokacije i zdravstvenog stanja osoba; Pružanje pomoći nepokretnim i hendikepiranim osobama; Biomedicinske primene i umrežavanje instrumenata; Brza reakcija i praćenje nastradalih u nesrećama (izbor kritičnih slučajeva); Kontrola vitalnih funkcija pacijenata; Post-operativna nega; Nadzor dece i starijih osoba.



Slika 2.3 Monitoring vitalnih parametara pacijenta

Nadzor životne sredine i prirodnih staništa: Sistemi za upozoravanje na prirodne katastrofe (seizmička aktivnost, vulkan [33], cunami, tornado itd.); Detekcija požara, poplava, hemijskih i bioloških otrova; Nadgledanje oblasti nesreće; Praćenje nivoa opasnih supstanci i gasova u vazduhu; Praćenje zagađenja vazduha [34, 35]; Praćenje kvaliteta vode [36, 37]; Monitoring zemljišta [38, 39]; Praćenje objekata i detekcija mogućih krađa; Zaštita i sigurnost objekata i dobara; Akustična detekcija buke; Senzori koji kontrolišu nedostupna mesta ili je opasno ljudsko prisustvo; Svaki čvor meri temperaturu koja predstavlja podatke “temperaturne mape” na osnovu koje se predviđa kako se požar širi.

Primena u saobraćaju: Praćenje, detekcija i lokalizacija mesta nesreća; Koordinisano praćenje vozila; Kontrola i detekcija zagušenja u saobraćaju; Detekcija slobodnih parking mesta i organizacija parkiranja [40, 41]; Prevoz opasnih materija; Kontrola pritiska u točkovima; Monitoring i kontrola stanja u avionskom saobraćaju; Kontrola rada delova motora i detekcija mogućih kvarova; Umreženi automobili; Automobili kao senzorski uređaji; Bolja kontrola saobraćaja na osnovu informacija o prolazu i stanju na raskrsnicama dobijenim putem senzorske mreže (Slika 2.4).



Slika 2.4 Detektovanje broja vozila na putu [42]

Industrijska primena: Nadgledanje i kontrola industrijske opreme i procesa; Nadgledanje proizvodnje; Kontrola fabričkih procesa; Industrijska automatizacija; Praćenje i nadgledanje kvaliteta proizvoda; Praćenje stanja u skladištima; Praćenje robe u prodavnicama; Detekcija provala u industrijskim postrojenjima; Kontrola curenja otrovnih materija; Opremanje transportnih dobara (“kontejner”) sa senzorskim čvorom; Logističko praćenje kretanja i stanje robe u svakom trenutku; Nadzor i preventivno održavanje mašina.

Inteligentne zgrade – intergrirani kućni sistemi: Racionalno grejanje, hlađenje i provetravanje prostorija; Automatizacija kancelarija i kuće; Kontrola životne sredine u kućama i zgradama; Urbanističko planiranje (otpadne i podzemne vode, procenat CO₂); Smanjivanje potrošnje energije, video nadzor, upravljanje rasvetom, audio i video uređajima (*smart home* - Slika 2.5); Određivanje zauzetosti prostorija; Kontrola životnih uslova (temperatura, vlažnost, pritisak ili kvalitet vazduha i vode); Kontinuirani nadzor mehaničkih naprezanja (posebno za vreme ili posle zemljotresa); Protivpožarna zaštita. Inteligentna kuća se može kontrolisati putem računara, pametnim telefonom, tabletom ili nekim namenskim upravljačem predviđenim za taj sistem.

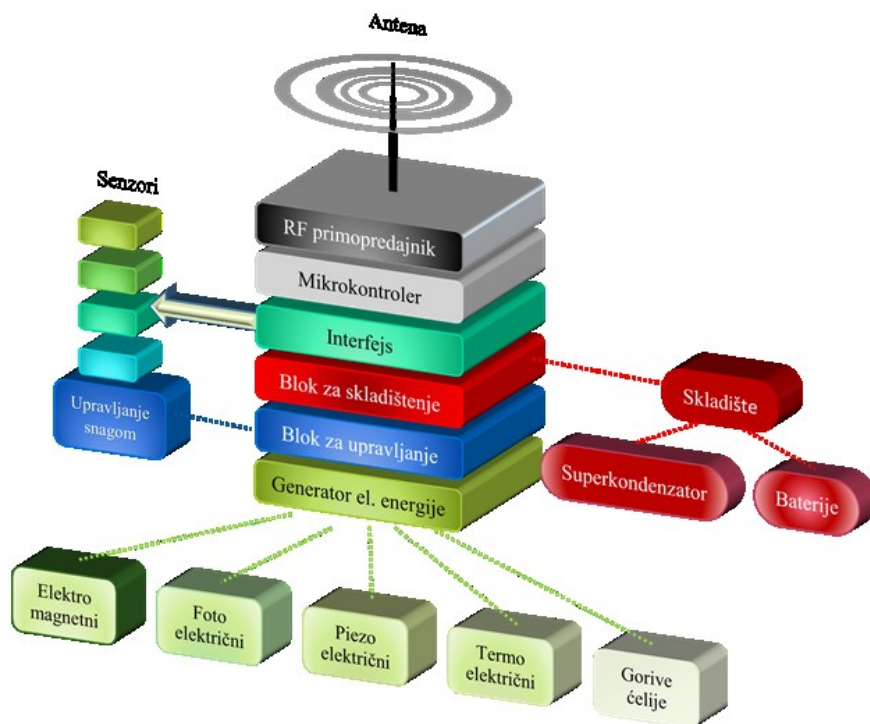
Slika 2.5 Koncept pametne zgrade (*smart home*) [43]

U preciznoj poljoprivredi: Automatski sistem za navodnjavanje [44]; Kontrola uslova u voćarstvu, poljoprivredi i stočarstvu; Određivanje mikro-klimatskih uslova; Nadgledanje zemljišta (temperatura, vlaga, pesticidi, herbicidi, pH); Nadgledanje i kontrola fizičkog okruženja; Implementacija virtuelnih ograda u stočarstvu uz akustični stimulans koji se daje životinjama koje prelaze granicu virtuelne ograde; Monitoring grožđa - koristi se za istraživanje uslova koji utiču na rast vinove loze (temperatura, vlaga u tlu, svetlost i vlažnost). Određivanje optimalnog dana za berbu - kada je procenat šećera najveći; Precizna biljna zaštita (prilagođavanje količine vode, đubriva i pesticida potrebama pojedinih biljaka); Zaštita od smrzavanja; Zaštita od insekata i štetočina [45, 46].

2.2. Arhitektura čvora bežične senzorske mreže

Presudnu ulogu u dizajnu čvora bežične senzorske mreže imaju zahtevi koji se postavljaju u odnosu na konkretnu primenu. U najvećem broju slučajeva senzorski čvor bi trebao da ima sledeće osobine: male dimenzije i težinu, nisku cenu, malu potrošnju energije, opremljenost odgovarajućim sensorima, neophodnim računarskim resursima i sredstvima za komunikaciju. Bez obzira na različite zahteve, arhitektura senzorskog čvora je slična kod većine primena. Uobičajeno se sastoje od mikrokontrolera, RF komunikacione jedinice, RF

antene, baterije ili nekog drugog vida napajanja (generator električne energije) i senzora. Slika 2.6 prikazuje arhitekturu tipičnog senzorskog čvora.



Slika 2.6 Arhitektura senzorskog čvora

Senzor (jedan ili više njih) su stvarna veza sa spoljašnjim svetom, pomoću koje se nadgleda okolina i na nju utiče. Široka oblast primene WSN ukazuje na veliki broj različitih vrsta senzora. Senzori bi mogli da se podele u tri grupe: pasivni neusmereni senzori (termometri, svetlosni senzori, mikrofoni, senzori vlažnosti, vibracija, mehaničkog opterećenja, hemijski senzori, detektori dima), pasivni usmereni senzori (sa jasno definisanim smerom merenja kao što je kamera) i aktivni senzori (aktivno ispituju okruženje, recimo sonar, radar, neke grupe seizmičkih senzora).

Mikrokontroler ima zadatak da prikuplja podatke od senzora, odlučuje kada i kome da ih pošalje, prima podatke od drugih senzorskih čvorova i donosi odluke o ponašanju senzora. Posедуje veliku fleksibilnost prilikom povezivanja sa drugim uređajima (senzorima) i prilikom programiranja, širokog je skupa instrukcija (koji odgovara vremenski zahtevnim izračunavanjima) i male potrošnje energije (mogućnost ulaska u stanja smanjene potrošnje).

Takođe je potrebno da ima što veću toleranciju na vrednost napona napajanja, tako da može ispravno funkcionisati i kada baterije izgube svoj puni kapacitet.

Generator električne energije ima zadatak da prikupi energiju iz spoljašnjeg izvora i pretvori u električnu energiju kojom napaja čvor WSN-a. Najčešći izvori energije su svetlost, toplota, vibracije i RF zračenje.

Blok za upravljanje energijom ima zadatak da obezbedi nivo napona koji je potreban za rad ostalih delova čvora. Pošto je električni napon koji dobija od generatora izuzetno mali (reda mV), obično se koriste *step-up* konvertori koji na svom izlazu daju napone od 2-5V dovoljne za napajanje ostalih delova kola.

Blok za skladištenje energije ima zadatak da obezbedi skladištenje električne energije koja bi se koristila za rad čvora u situacijama kada nema izvora napajanja. Obično su to punjive baterije i superkondenzatori visokih kapacitivnosti. Hemijske reakcije punjivih (sekundarnih) baterija su po prirodi reverzibilne. Njihovim jednostavnim dopunjavanjem produžuje se životni vek čvora, a samim tim i cele bežične senzorske mreže. Superkondenzatori se nazivaju još i električni dvoslojni kondenzatori (EDLC) i pripadaju grupi elektrohemijskih kondenzatora koji nemaju konvencionalno čvrste dielektrike. Karakteristike superkondenzatora kao što su velika gustina energije, brzo punjenje, podrška za veliki broj ciklusa punjenja, temperaturna stabilnost, mala serijska otpornost i mala struja curenja pogoduju načinu rada većine bežičnih senzorskih čvorova. Takođe, oni su sposobni da u kratkom vremenskom intervalu predaju veliku snagu što se savršeno uklapa u način napajanja čvorova gde je potrebno da oni u što kraćem intervalu pošalju prikupljene podatke radio komunikacijom koja zahteva najviše energije. Kombinacija superkondenzatora i baterija daje najbolje performanse za upotrebu uskladištene električne energije u bežičnim senzorskim čvorovima.

Uređaj za komunikaciju se koristi za prenos podataka bežičnim putem. Za primenu u WSN se najčešće koristi RF komunikacija. Ona obezbeđuje relativno veliki domet i brzinu prenosa, prihvatljiv nivo pouzdanosti prenosa podataka, prihvatljivu potrošnju energije i ne zahteva optičku vidljivost pošiljaoca i primaoca. Za komunikaciju u WSN se obično koriste frekvencije iz nelicenciranih frekventnih opsega: 433, 868 i 915 MHz i 2.4 GHz. RF primopredajnik je uređaj za bežičnu komunikaciju koji kombinuje RF predajnik i RF prijemnik. Kao takav on je najveći pojedinačni potrošač energije u WSN-u. Potrošnja energije je značajna i na prijemu kao i pri predaji signala. Efikasnost izlaznog RF stepena definiše se

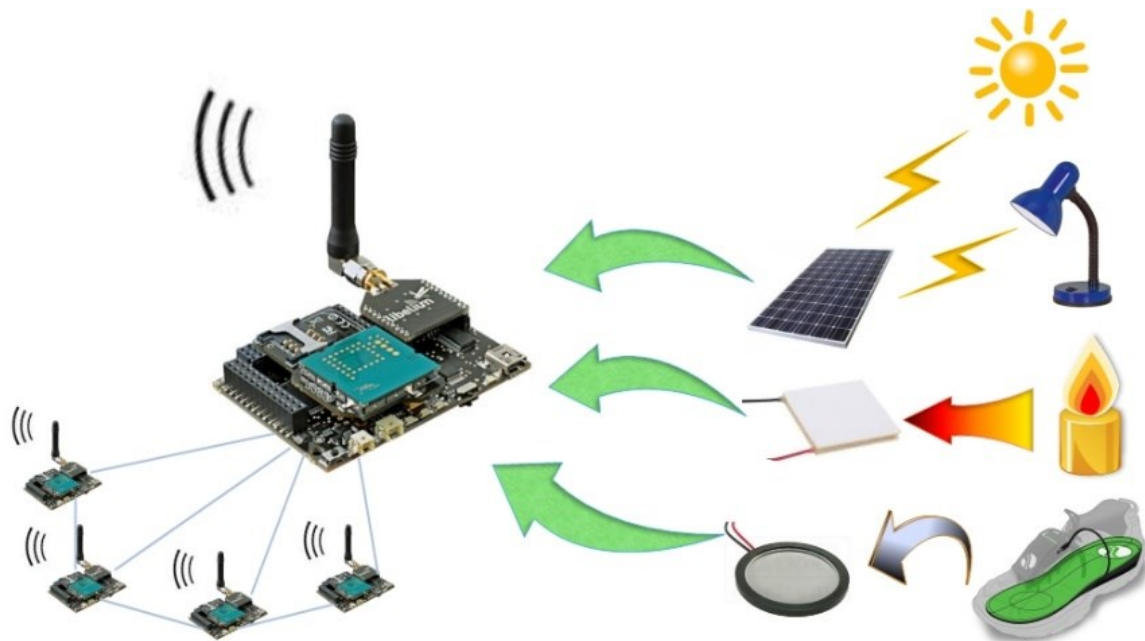
odnosom emitovane snage i ukupne snage koja se troši u izlaznom stepenu primopredajnika. Kao RF antena obično se koristi omnidirekciona antena pomoću koje čvorovi komuniciraju podjednako u svim pravcima. Brzina prenosa podataka (engl. *bitrate*) od 10 do 100 Kbps je zadovoljavajuća u bežičnim senzorskim mrežama, pri čemu veće brzine prenosa podataka zahtevaju kraće intervale u kojima je komunikaciona jedinica aktivna, čime se povećava energetska efikasnost.

2.3. Napajanje čvorova bežične senzorske mreže

Za funkcionisanje čvorova bežičnih senzorskih mreža vrlo bitan faktor je njihovo stabilno napajanje. Takođe, bitna stavka u razvoju WSN je obezbeđenje sigurnog rada u najrazličitijem okruženju. Napredak u poluprovodničkoj tehnologiji je omogućio konstruisanje jeftinih, efikasnih i energetski prilagodljivih WSN čvorova. Ovi čvorovi su uređaji male potrošnje koji su najčešće napajani baterijama. Glavni izazov u korišćenju baterija za njihovo napajanje je taj što broj čvorova u mreži stalno raste. Zamena ili dopuna baterija je najčešće nepraktično rešenje jer zahteva angažovanje ljudskih resursa i vremena, kao i potrebu za odlaganjem iskorišćenih baterija. Takođe i baterije većeg kapaciteta (pokušaj da se poveća broj radnih sati) povećavaju dimenzije celog sistema (baterije dominiraju u sistemu) pa samim tim smanjuju opseg primene WSN čvora. Noviji pristup napajanja WSN čvorova bazira se na iskorišćenju nekog drugog vida dostupne energije iz njihove okoline i pretvaranje u električnu. Proces uzimanja energije iz prirode, tj. iz okruženja čvora, i njeno pretvaranje u odgovarajuću električnu energiju poznat je pod terminom *energy harvesting* ili *power scavenging*.

Postoje različiti prirodni resursi koji se mogu koristiti kao potencijalna energija za napajanje čvora (Slika 2.7) Svaki od njih ima različiti stepen iskorišćenja koji opet zavisi u mnogome od tipa aplikacije. U različite prirodne izvore koji se mogu iskoristiti za prikupljanje energije spadaju: energija vetra i tečnosti, energija od svih oblika izvora svetla, toplotna energija iz peći i drugih izvora grejanja, mehanička energija usled vibracija, ljudska energija koja potiče od kretanja, toplote kože i krvi, elektromagnetna energija koja se nalazi u induktorima, kalemovima i transformatorima i hemijska energija iz prirode ili bioloških procesa. Dostupne količine energije iz ovih izvora kao i energija koja se može efektivno iskoristiti prikazuje Tabela 2.1. Generatori svoj rad zasnivaju na različitim fizičkim

fenomenima, a u disertaciji je akcenat stavljen na termoelektrične generatore koji svoj rad baziraju na termoelektričnim efektima.



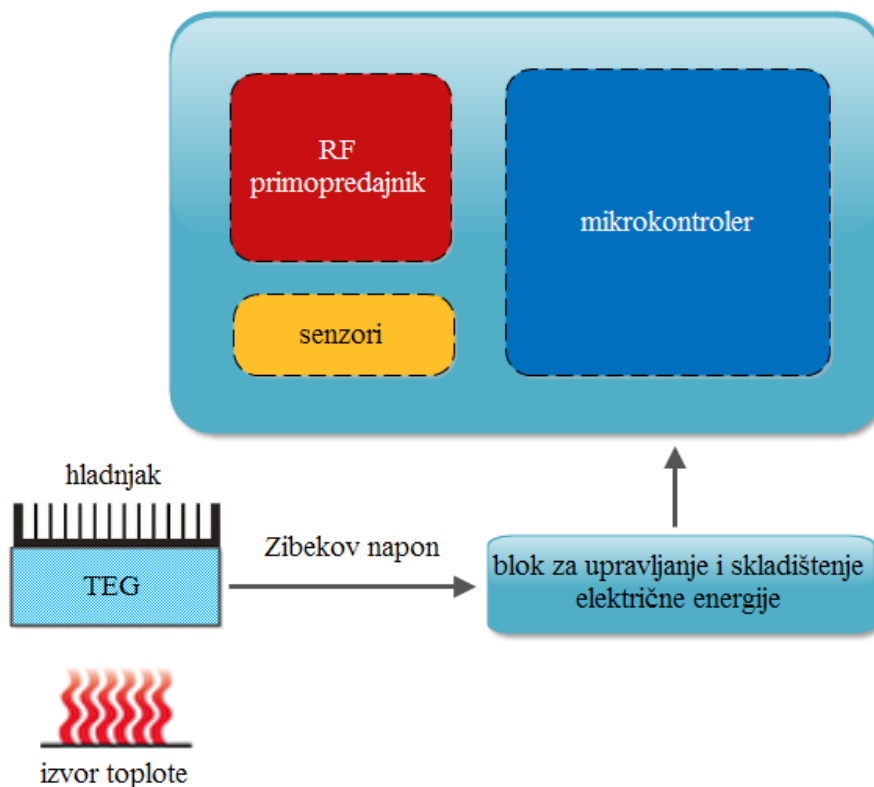
Slika 2.7 Izvori napajanja za bežične senzorske mreže

Tabela 2.1 Dostupna energija iz najčešće korišćenih izvora

Izvor energije	Snaga izvora	Iskorišćena snaga
Svetlost		
Unutrašnja	0,1 mW/cm ²	10μW/ cm ²
Spoljašnja	100 mW/cm ²	10mW/ cm ²
Vibracija/Pokret		
Čovek	0,5 m pri 1Hz	4 μW/ cm ²
	1m/s ² pri 50Hz	
Mašina	1m pri 5Hz	100 μW/ cm ²
	10m/s ² pri 1kHz	
Toplota		
Čovek	20 mW/cm ²	30 μW/ cm ²
Mašina	100 mW/cm ²	1-10 mW/ cm ²
RF		
GSM	0,3 μW/ cm ²	0,1 μW/ cm ²

2.4. Termoelektrični generator kao izvor napajanja čvora bežične senzorske mreže

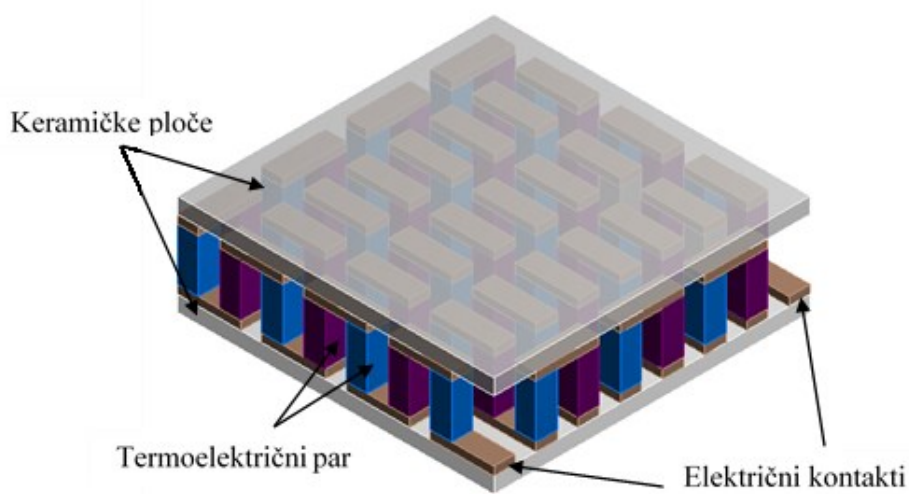
U praksi, sistemi koji pretvaraju toplotnu energiju u električnu najčešće sadrže termoelektrične generatore (TEG-ove). Osnovnu blok šemu termoelektričnog bežičnog senzorskog čvora prikazuje Slika 2.8. Jedna strana TEG-a je izložena izvoru toplote, dok se druga strana drži na nižoj temperaturi ili slobodno razmenjuje toplotu sa okolinom. Kao posledica temperaturne razlike između tople i hladne strane, TEG generiše potencijalnu razliku (električni napon) koristeći takozvani Zibekov efekat.



Slika 2.8 Blok šema termoelektričnog bežičnog senzorskog čvora

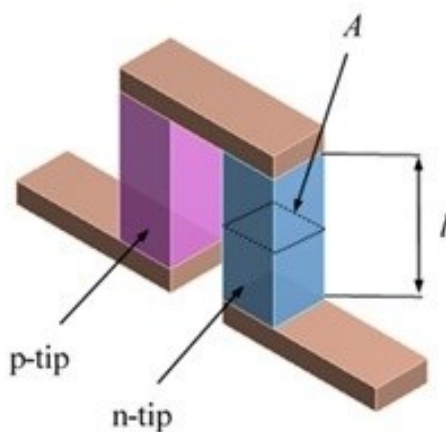
S obzirom na to da je vrednost generisanog napona pri temperaturnim razlikama od nekoliko desetina °C reda stotina mV, što je nedovoljno za napajanje elektronskih komponenti, ovaj napon se uvodi u kolo za skladištenje i upravljanje prikupljenom energijom. Ovo kolo dalje vrši napajanje ostalih sastavnih elemenata bežičnog senzorskog čvora.

TEG se sastoji od niza termoelektričnih parova smeštenih između dve keramičke ploče kao što prikazuje Slika 2.9.



Slika 2.9 Struktura termoelektričnog generatora

Svaki termopar predstavlja sistem od 2 elementa načinjena od p- i n-tipa materijala koji poseduju termoelektrične osobine i spojena su bakarnim elektrodama (Slika 2.10). Termoparovi su vezani redno u električnom, a paralelno u termičkom smislu.



Slika 2.10 Izgled jednog termopara

Za generisanje Zibekovog napona potrebno je da strane termopara budu na različitim temperaturama. Keramičke ploče, koje poseduju visoku termičku i zanemarljivu električnu provodnost, postavljene su na bakarne spojeve termopara i predstavljaju toplu i hladnu stranu TEG-a. Kontakti prvog i poslednjeg termopara u nizu predstavljaju pozitivan i negativan izvod generatora. Materijali koji se često koriste kod termoparova su dopirane poluprovodne

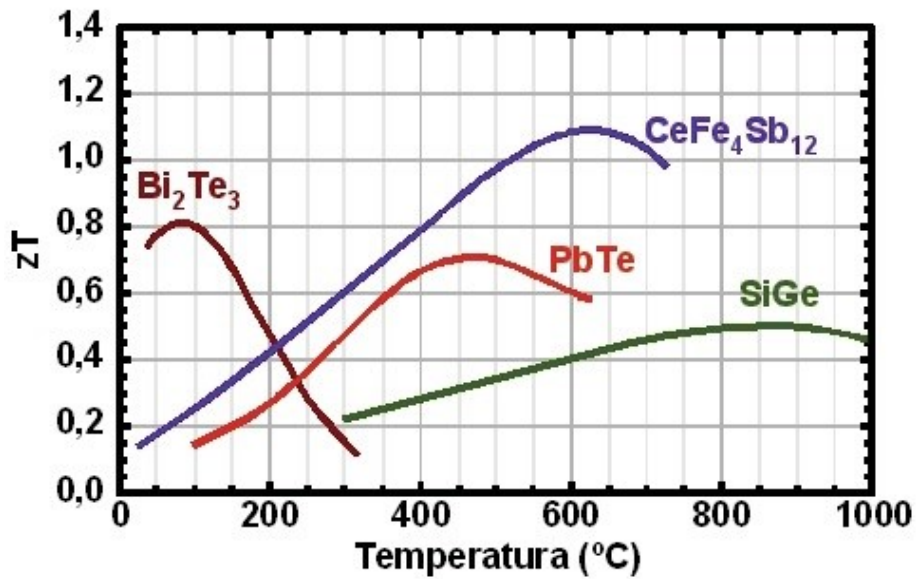
legure čiji su Zibekovi koeficijenti suprotnog znaka (α_p pozitivan za p-tip i α_n negativan za n-tip) i pri tom imaju nisku termičku provodnost.

Podobnost nekog materijala da bude korišćen za primenu kod termoelektričnih generatora opisan je faktorom efikasnosti ZT [47]:

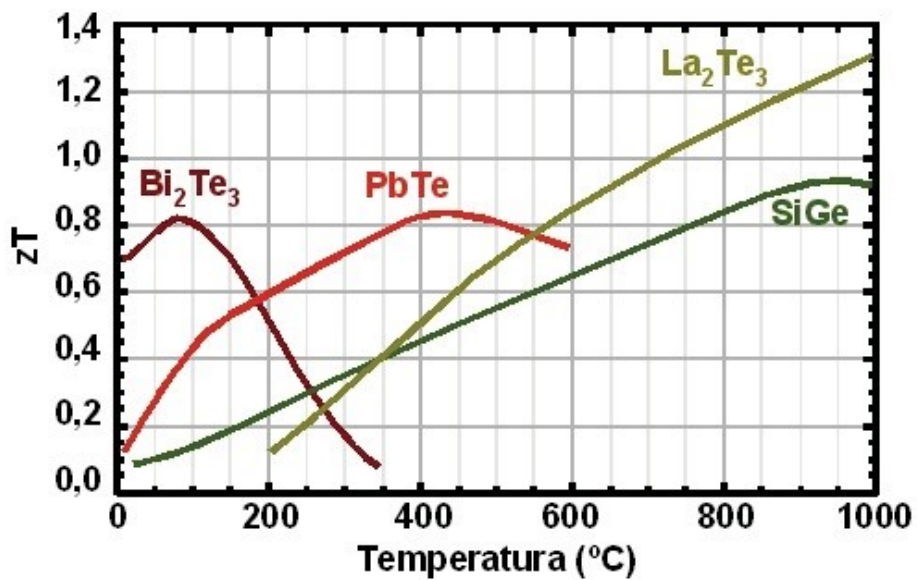
$$ZT = \frac{\alpha_{pn}^2 T}{4\rho\lambda}, \quad (2.1)$$

gde $\alpha_{pn} = \alpha_p - \alpha_n$ predstavlja Zibekov koeficijent termopara, ρ specifičnu električnu otpornost ($\rho_p \approx \rho_n \approx \rho$) i λ termičku provodljivost termoelektričnog materijala. T predstavlja apsolutnu temperaturu okoline. Faktor efikasnosti omogućava nam izbor najboljeg materijala za izradu termoelektričnog generatora. Od materijala koji je pogodan za izradu moraju se dobiti dve vrste provodnosti, elektronska i šupljinska. Poluprovodnici imaju to svojstvo. Svojstvo materijala opisuje se Peltijevim koeficijentom Π , odnosno Zibekovim koeficijentom α , koji mora biti što veći. Materijal ne sme pružati otpor protoku struje, zbog njegovog zagrevanja te je poželjno je da termoelektrični materijal ima što bolju električnu provodnost, odnosno što manju električnu otpornost. Takođe i zbog postojanja temperaturnog gradijenta duž provodnika potrebno je da materijal ima što manju toplotnu provodnost. Veoma je teško pronaći materijal koji ima dobar faktor efikasnosti jer svaki materijal koji dobro provodi naelektrisanje, dobro provodi i toplotu.

Za termoelektrične primene do danas su se najbolje pokazale legure iz porodice telurida. U termoelektričnim modulima najviše se koristi legura bizmuta i telurida (Bi_2Te_3) [48], mada ovde treba istaći da ne postoji jedan materijal koji je pogodan za primenu u svim temperaturnim područjima koja su od interesa. Zato se koriste i drugi materijali, u zavisnosti od primene, kao što su: olovo-telurid (PbTe), silicijum-germanijum (SiGe), bizmut-antimon legure (BiSb). Bizmut-telurid je najpogodniji u temperaturnom području u kojem ima najviše primena hlađenja i grejanja (Slika 2.11 i Slika 2.12).



Slika 2.11 Temperaturno područje primene termoelektričnih materijala p-tipa [49]



Slika 2.12 Temperaturno područje primene termoelektričnih materijala n-tipa [49]

2.5. Termoelektrični efekti

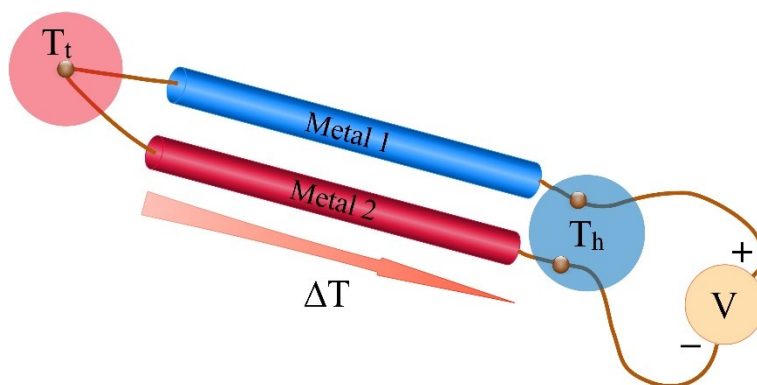
Efekti vezani za istovremeno delovanje električnog polja i gradijenta temperature u nekom materijalu nazivaju se termoelektrični efekti. Oni predstavljaju kombinaciju tri različita efekta: Zibekovog, Peltijevog i Tomsonovog efekta.

2.5.1. Zibekov efekat

Efekat je prvi otkrio nemački fizičar *Thomas Johanna Seebeck* 1821. godine. Primetio je pojavu magnetnog polja oko dve metalne trake različitih električnih provodnosti kada su se trake nalazile na različitim temperaturama. Svoja istraživanja je objavio naredne godine a fenomen je postao poznat kao Zibekov efekat. Iako nije identifikovao uzrok magnetnog polja, ustanovio je da između krajeva ova dva metala postoji potencijalna razlika uzrokovana razlikom temperatura. Generisani napon je nazvan Zibekovim naponom i matematički je predstavljen jednačinom:

$$V = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot (T_t - T_h) = \alpha \Delta T, \quad (2.2)$$

gde je V generisani Zibekov napon, $\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$ Zibekov koeficijent (α_1 i α_2 Zibekovi koeficijenti dva različita metalna provodnika koji mogu biti i negativni), T_t i T_h temperature na toplom i hladnom spoju dva provodnika i $\Delta T = T_t - T_h$ temperaturna razlika između toplog i hladnog spoja (Slika 2.13).



Slika 2.13 Zibekov efekat

2.5.2. Peltijev efekat

Francuski fizičar i časovničar *Jean Charles Athanase Peltier* je 1834. godine u svom eksperimentu primetio da kada kroz spojeve različitih provodnih materijala protiče električna struja provodni materijali na spojevima iz okoline preuzimaju ili odaju toplotu u zavisnosti

od smera struje. Ovaj efekat nazvan je Peltijev efekat. Količina toplote Q , koja se preuzima ili odaje na spojevima, proporcionalna je jačini električne struje I . Ova zavisnost se može izraziti kao:

$$Q = \pm \Pi_{AB} I t, \quad (2.3)$$

gde konstanta proporcionalnosti Π_{AB} predstavlja Peltijev koeficijent, a t vreme protoka struje. Kao i Zibek, Pelti nije uspeo da reši uzroke ovih dešavanja, kao ni da prepozna reverzibilnu prirodu ovog termoelektričnog fenomena.

2.5.3. Tomsonov efekat

Tek 1855. godine *William Thomson* ustanovio je vezu između Zibekovog i Peltijevog efekta, što je bio prvi značajan doprinos razumevanju termoelektričnih pojava. Tomson je dao sveobuhvatno objašnjenje i pokazao da postoji direktna veza između Zibekovog i Peltijevog efekta, odnosno da važi:

$$\Pi = \alpha \cdot T. \quad (2.4)$$

Pored toga, na osnovu termodinamičkih razmatranja, on je predvideo i ono što je postalo poznato kao Tomsonov efekat. To je pojava da kada kroz provodnik teče struja i temperatura duž njega opada ili raste, on preuzima ili odaje toplotu ka okolini, zavisno od smera struje. Provodnik će preuzimati toplotu ako struja teče ka kraju viših temperatura, a predavaće je okolini kada je smer struje ka kraju nižih temperatura. Količina razmenjene toplote Q , usled temperaturne razlike ΔT , može se izraziti kao:

$$Q = \pm \mu_T I \frac{\Delta T}{\Delta x} t, \quad (2.5)$$

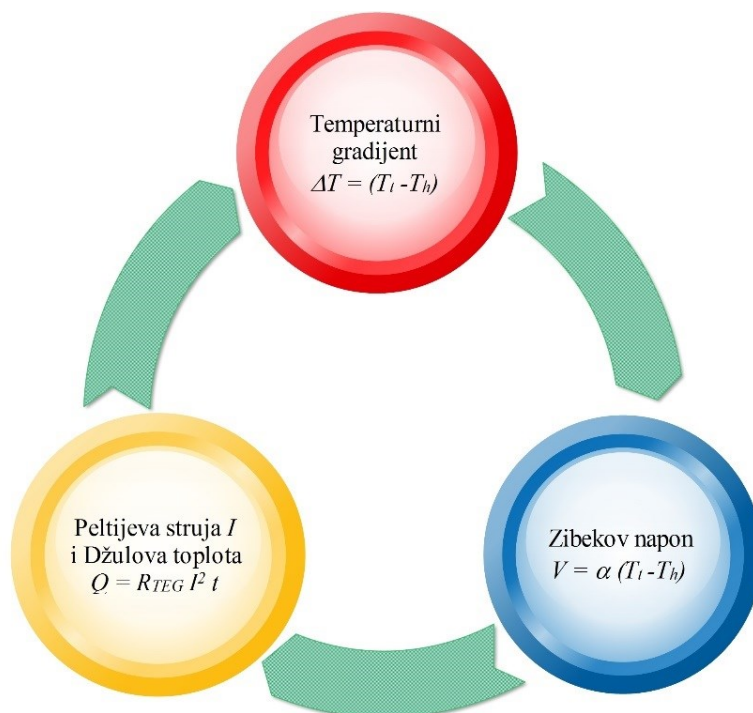
gde je μ_T Tomsonov koeficijent a $\Delta T/\Delta x$ gradijent temperature.

2.5.4. Džulov efekat

Efekat koji se suprotstavlja gore pomenutim efektima ukazuje na količinu toplote koju stvara električna struja koja protiče kroz provodnik. Džulov efekat nije reverzibilan i predstavlja oslobodjenu toplotu Q koja se javlja u materijalu koji ima svoju otpornost R kada kroz njega protiče električna struja I :

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t. \quad (2.6)$$

Kada se ovi efekti posmatraju u okviru procesa generisanja električne energije, moraju se uzeti u obzir i njihove međusobne elektrotermičke interakcije koje formiraju povratnu spregu prikazanu na Slici 2.14.



Slika 2.14 Elektrotermički procesi unutar termoelektričnog modula kada radi kao TEG

Temperaturni gradijent ΔT koji se javlja usled temperaturne razlike na stranama Peltijevog termoelektričnog modula uzrokuje pojavu Zibekovog napona V . Ako je na modul priključeno opterećenje R_L formiraće se električno kolo kroz koje protiče Peltijeva struja I . Proticanje struje imaće za posledicu Džulovo zagrevanje kao rezultat disipacije snage na unutrašnjoj otpornosti modula R_{TEG} . Ovo zagrevanje unosi određenu promenu raspodele temperature unutar modula i samim tim na temperaturni gradijent, što na kraju utiče i na generisani Zibekov napon. Nakon toga kreće novi ciklus.

U ovoj disertaciji, prilikom karakterizacije termoelektričnih modula kada se koriste kao TEG-ovi, razmatran je uticaj svih ovih efekata. Sam ANSYS uključuje u obzir uticaj Tomsonovog efekta, dok je temperaturna zavisnost Zibekovog koeficijenta (ne može biti zanemarena jer ima veliki uticaj na rad TEG-a [50]) uračunata, kao i temperaturna zavisnost specifične električne otpornosti materijala termopara. Inače, Tomsonov efekat nema značajan uticaj na rezultate i u poređenju sa ostalim efektima je zanemarljiv [51-53].

2.6. Analitički model TEG-a

Napon otvorenog kola V_G koji generiše TEG zbog postojanja temperaturne razlike između njegove tople i hladne strane $\Delta T = T_{topla} - T_{hladna}$ zavisi od broja termoparova N [23]:

$$V_G = N\alpha_{pn}\beta\Delta T. \quad (2.7)$$

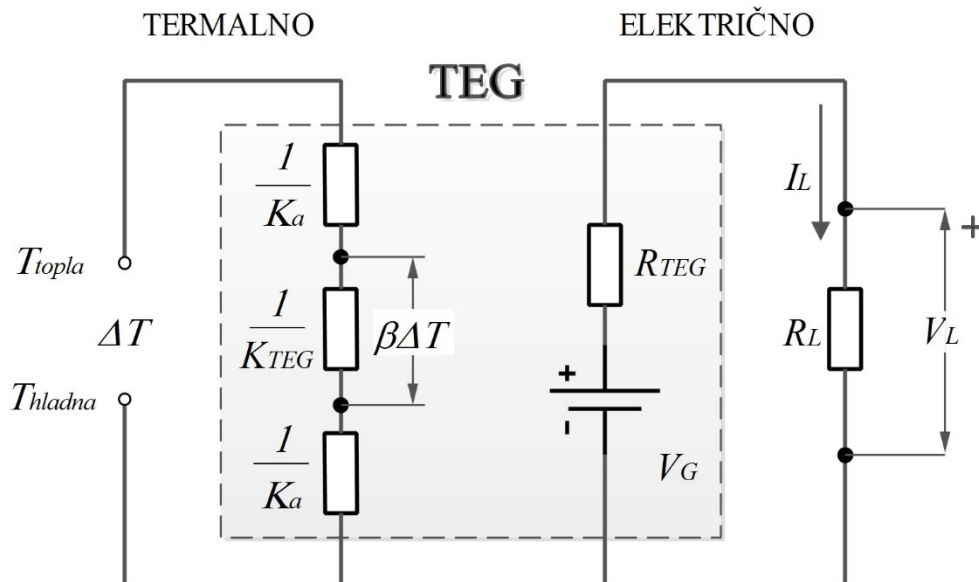
Koeficijent β uključuje uticaj konačne vrednosti termičke provodnosti keramičkih ploča K_a [23], u skladu sa ekvivalentnim elektro-termičkim modelom TEG-a prikazanim na Slici 2.15:

$$\beta = \frac{K_a}{K_a + 2K_{TEG}}, \quad (2.8)$$

gde je K_{TEG} unutrašnja termička provodnost svih termoparova TEG-a. Termičke provodnosti keramičkih ploča i termoparova zavise od termičkih provodljivosti njihovih materijala (λ_a i λ , respektivno) i odgovarajućih dimenzija na osnovu izraza:

$$K_a = \lambda_a \frac{A_{TEG}}{h_a}, \quad (2.9)$$

$$K_{TEG} = 2N\lambda \frac{A}{l} = 2N\lambda G. \quad (2.10)$$



Slika 2.15 Osnovni elektro-termički model TEG-a sa potrošačem

U relacijama (2.9) i (2.10) h_a i A_{TEG} predstavljaju debljinu i površinu keramičke ploče, respektivno, dok odnos površine A i visine l jednog elementa termopara, definiše faktor geometrije $G = A/l$ (Slika 2.10).

Električno kolo TEG-a predstavljeno je primenom Tevenenove teoreme (Slika 2.15) korišćenjem naponskog izvora V_G i unutrašnje električne otpornosti R_{TEG} definisane relacijom:

$$R_{TEG} = \frac{2N\rho l}{A} = \frac{2N\rho}{G} \quad (2.11)$$

Kada se na TEG priključi potrošač otpornosti R_L kroz električno kolo protiče struja I_L :

$$I_L = \frac{V_G}{R_L + R_{TEG}}, \quad (2.12)$$

dok je napon na potrošaču:

$$V_L = V_G - R_{TEG}I_L = N\alpha_{pn}\beta\Delta T - R_{TEG}I_L = R_L I_L, \quad (2.13)$$

i snaga koja se sa generatora preda potrošaču:

$$P_L = I_L V_L = \frac{V_G}{R_L + R_{TEG}} \cdot \frac{R_L}{R_L + R_{TEG}} V_G = \frac{R_L}{(R_L + R_{TEG})^2} (N\alpha_{pn}\beta\Delta T)^2. \quad (2.14)$$

Maksimalna vrednost predate snage se ostvaruje u uslovima prilagođenja otpornosti generatora i potrošača ($R_L = R_{TEG}$) [23], [55]:

$$P_{Lmax} = \frac{(N\alpha_{pn}\beta\Delta T)^2}{4R_{TEG}} = \frac{NG(\alpha_{pn}\beta\Delta T)^2}{8\rho}, \quad (2.15)$$

i faktor snage PF koji je nezavisan od temperaturne razlike definisan je kao:

$$PF = \frac{P_{Lmax}}{(\Delta T)^2} = \frac{(N\alpha_{pn}\beta)^2}{4R_{TEG}} = \frac{NG\alpha_{pn}^2\beta^2}{8\rho}. \quad (2.16)$$

Faktor snage i unutrašnja termička provodnost se najčešće koriste za procenu efikasnosti TEG-a. Veće vrednosti faktora snage PF obezbeđuju bolji prenos generisane snage, dok niže vrednosti termičke provodnosti obezbeđuju održavanje temperaturne razlike na spojevima. Iz relacije (2.16) se vidi da je poželjno imati TEG sa što većim brojem termoparova N i većim

faktorom geometrije G . Sa druge strane iz relacije (2.10) vidimo da je potreban što manji broj termoparova N i manji faktor geometrije G . Kao zaključak se može izvesti da je, za zadate dimenzije TEG-a, potrebno obezbediti optimalan broj termoparova, kao i vrednosti poprečnog preseka i visine elementa termopara.

2.7. Karakteristični parametri TEG-a

Samonapajajući senzorski sistemi često uključuju posebno projektovane i izrađene TEG-ove koji se karakterišu velikim brojem termoparova, malim poprečnim presekom elementa termopara kao i velikom unutrašnjom otpornošću i faktorom snage. Komercijalno dostupni moduli prvenstveno namenjeni grejanju/hlađenju (Peltijevi elementi) takođe mogu raditi kao TEG-ovi u ovim sistemima. Pri tome postoje određena ograničenja vezana za njihove karakteristike. Tabele i grafikoni dati u tehničkim specifikacijama komercijalnih modula ne sadrže parametre koji pokazuju njihovu efikasnost kada se koriste kao TEG-ovi. Zbog toga se parametri bitni za karakterizaciju ovih modula, moraju odrediti iz ostalih podataka navedenih od strane proizvođača. Ti parametri su karakteristike materijala, faktor snage i faktor efikasnosti.

U disertaciji je razmatrano šest termoelektričnih modula dva proizvođača [30, 31], baziranih na Bi-Te legurama. Izbor TEG-ova je bio baziran na njihovim malim dimenzijama, brojem termoparova, unutrašnjoj otpornosti ($1 - 3\Omega$), i prihvatljivoj ceni. Karakteristični parametri razmatranih TEG-ova preuzeti iz njihovih tehničkih specifikacija, i/ili proračunati na osnovu relacija (2.8 - 2.11, 2.16) i postupka opisanog u [54] prikazani su u Tabeli 2.2.

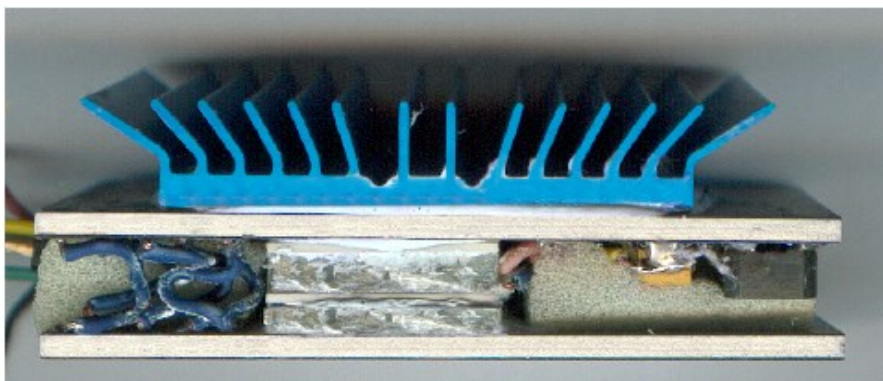
Tabela 2.2 Karakteristični geometrijski, električni i termički parametri razmatranih TEG-ova.

<u>Proizvođač i model</u>	MCPE-031-10-13 (TEG1)	ET-031-10-20 (TEG2)	MCPE-031-10-25 (TEG3)	MCPE-071-10-15 (TEG4)	CP 10,31,08 (TEG5)	CP 08,31,06 (TEG6)
Maksimalna temperaturna razlika pri $T_{topla} = 25^{\circ}\text{C}$ ΔT_{max} ($^{\circ}\text{C}$)*	72	75	73	72	67	67
Maksimalni kapacitet hlađenja Q_{max} (W)*	8,5	5,8	4,4	16,5	5,3	4,5
Maksimalna struja pri ΔT_{max} I_{max} (A)*	3,9	2,5	2,0	3,2	2,5	2,1
Maksimalni napon pri ΔT_{max} (V)*	3,8	3,8	3,8	8,8	3,8	3,7
Broj termoparova N^*	31	31	31	71	31	31
Spoljne dimenzije TEG-a $L \times W \times H$ (mm)*	15×15×3,6	15×15×4,3	15×15×4,8	20×20×3,8	15×15×3,8	12×12×3,3
Površina TEG-a A_{TEG} (mm ²)	225	225	225	400	225	144
Površina poprečnog preseka elementa termopara A (mm ²)*	1	1	1	1	1	0,64
Visina elementa termopara l (mm)*	1,3	2,0	2,5	1,5	2,0	1,5
Dimenzije Cu elektroda $l_e \times w_e \times h_e$ (mm)	3×1×0,4	3×1×0,4	3×1×0,4	2,7×1×0,4	3×1×0,3	2,4×0,8×0,3
Debljina keramičkih ploča h_a (mm)*	0,75	0,75	0,75	0,75	0,6	0,6
Zibekov koeficijent α_{pn} ($\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$)	396	396	396	396	378	378
Temperaturni koeficijent za α_{pn} ($1/^{\circ}\text{C}$)			1,9·10 ⁻³			
Termička provodljivost termopara λ (W/m ² °C)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,7	1,7
Termička provodljivost keramičkih ploča λ_a (W/m ² °C)			25			
Termička provodnost Cu elektroda (W/m ² °C)			401			
Spec. električna otpornost termopara ρ ($\mu\Omega\text{m}$)	11,4	11,4	11,4	11,4	10,6	10,6
Temperaturni koeficijent ρ ($1/^{\circ}\text{C}$)			3,4·10 ⁻³			
Spec. električna otpornost Cu elektroda ρ ($\mu\Omega\text{m}$)			0,017			
Termička provodnost keramičkih ploča K_a (W/ ² °C)	7,50	7,50	7,50	13,33	9,38	6,30
Unutrašnja termička provodnost K_{TEG} (W/ ² °C)	0,071	0,046	0,037	0,142	0,053	0,045
Koeficijent β	0,98	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99
Unutrašnja električna otpornost R_{TEG} (Ω)*	0,92	1,41	1,77	2,43	1,31	1,54
Faktor efikasnosti ZT pri temperaturi 25 ^o C	0,69	0,69	0,69	0,69	0,59	0,59
Faktor snage PF (W/ ² C2)	39,38	26,10	20,92	78,00	25,65	20,59

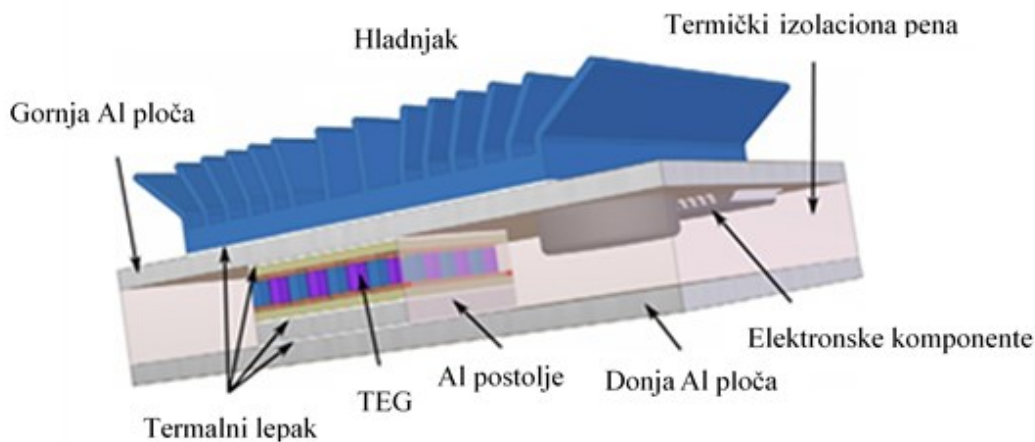
* Parametri preuzeti iz tehničke dokumentacije

2.8. Opis razmatranog WSN čvora

Karakterizacija TEG-ova je izvršena i za potrebe napajanja konkretnog senzorskog čvora [55]. WSN čvor je realizovan u kompaktnoj formi korišćenjem aluminijskih štampanih ploča (PCB) i prikazan je na Slici 2.16. Ove štampane ploče zbog velike termičke provodnosti aluminijuma pomažu u prikupljanju i odvođenju toplote. Razvijeni termoelektrični WSN čvor praktično se napaja zahvaljujući temperaturnoj razlici koja postoji između dve štampane ploče. Aluminijsko postolje odgovarajuće debljine ubačeno je u prostor između donje štampane ploče i TEG-a, da bi se prilagodilo visini komponenti. Donja ploča se izlaže toploti dok je na gornju postavljen aluminijski hladnjak za bolje odvođenje toplote u okolinu. Prostor između aluminijskih ploča popunjen je izolatorskom penom da bi se smanjila neželjena razmena toplote. Delovi sistema spojeni su termalnim lepkom.



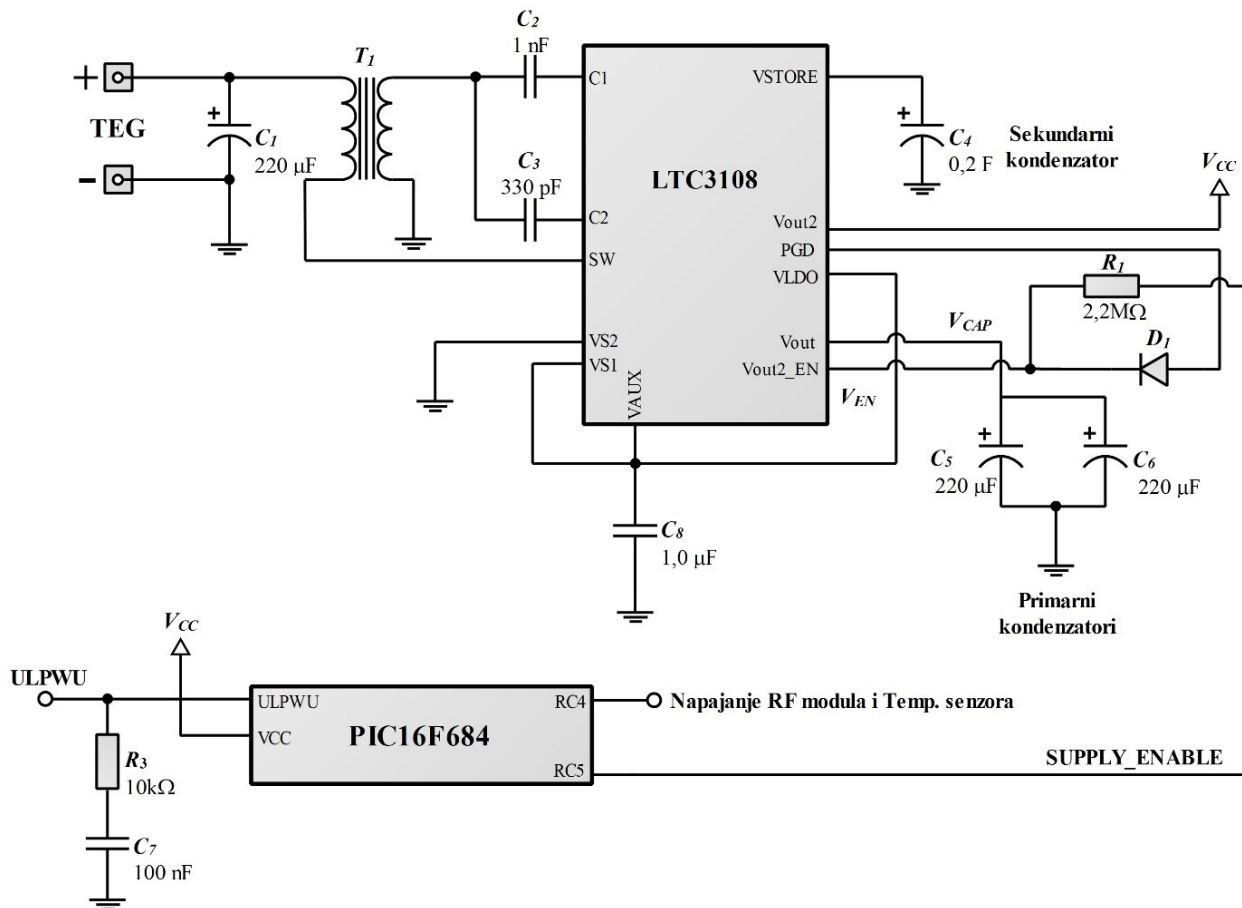
(a)



(b)

Slika 2.16 Čvor bežične senzorske mreže: (a) realizovani sistem [55] (b) simulacioni model

Blok za skladištenje i upravljanje električnom energijom (Slika 2.17) baziran je na step-up konvertoru LTC3108 sa ulaznim transformatorom odnosa transformacije 1:100 [56].



Slika 2.17 Električna šema WSN čvora

Za skladištenje električne energije iskorišćena su dva tantalova kondenzatora od 220 μF kao primarni i jedan superkondenzator vrednosti 0,2F kao sekundarni. Za akviziciju podataka sa temperaturnog senzora TMP102 i njihov prenos preko 434 MHz RF modula ST-TX03-ASK, implementiran je PIC mikrokontroler PIC16F684. Sve električne komponente postavljene su sa unutrašnje strane gornje ploče, osim temperaturnog senzora koji je postavljen sa unutrašnje strane donje ploče. Čvor je dizajniran sa ciljem da obezbedi pouzdano aktiviranje i produženu autonomiju rada u odsustvu toplotnog izvora [55].

3. KARAKTERIZACIJA TERMOELEKTRIČNIH MODULA

Karakterizacija termoelektričnih modula u ulozi termoelektričnih generatora je izvršena u tri stacionarna temperaturno različita uslova rada. U prvoj fazi simuliran je rad TEG-ova kao samostalne komponente, u drugoj fazi simuliran je rad TEG-ova sa hladnjakom i u trećoj fazi simuliran rad TEG-ova unutar opisanog WSN čvora.

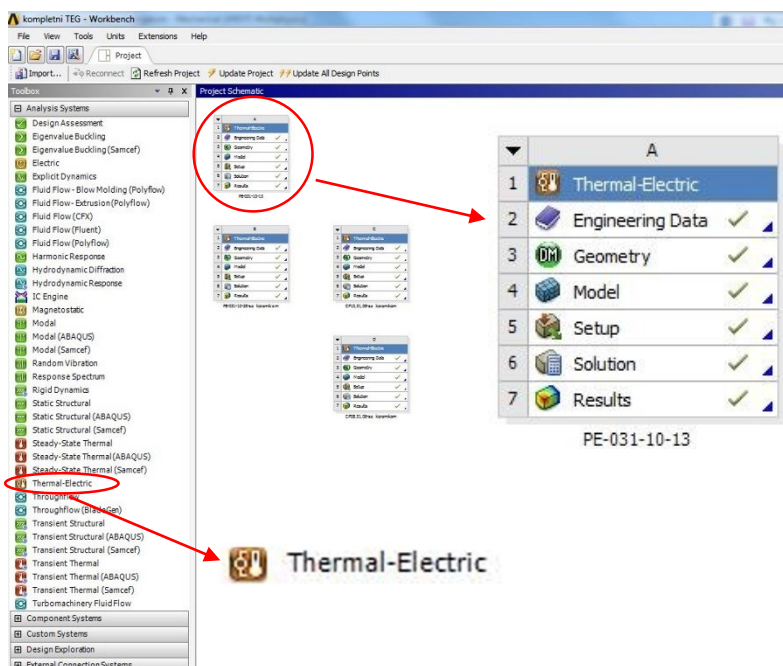
U prvoj fazi, TEG-ovi su analizirani kao samostalna komponenta sa fiksnom temperaturom i na toploj i na hladnoj strani. Izvršeno je i poređenje rezultata dobijenih simulacijom sa analitičkim modelom koji odgovara primenjenim graničnim uslovima. U drugoj fazi analiziran je rad TEG-ova sa montiranim niskoprofilnim aluminijumskim hladnjakom postavljenim na hladnoj strani, dok je na toploj strani temperatura bila fiksna, uz definisanu vrednost temperature okoline. Ispitana je i održivost analitičkog modela u ovom slučaju. U trećoj fazi analiziran je rad svakog TEG-a unutar opisanog kompaktnog WSN čvora. Kao deo čvora koji obezbeđuje razmenu toplote sa okolinom, implementiran je istovetan hladnjak kao u drugoj fazi. Struktura svih TEG-ova i sistema je detaljno modelirana, a kod vrednosti Zibekovog koeficijenta i specifične električne otpornosti materijala su uračunate i njihove temperaturne zavisnosti. Posmatran je i uticaj ostalih komponenti u sistemu na vrednost generisanog napona. Za potvrdu rezultata dobijenih simulacijom urađeno je termovizijsko snimanje raspodele temperature na TEG-u i WSN čvoru, kao i električna merenja snage predate potrošaču.

Rad svih TEG-ova simuliran je upotrebom softvera za numeričko modelovanje metodom konačnih elemenata u spregnutim domenima – ANSYS 18.0 Multiphysics Workbench [57]. Ovaj softver je namenjen realizaciji spregnutih mehaničkih, termičkih i elektromagnetnih analiza. ANSYS Workbench okruženje poseduje odgovarajući grafički interfejs kao intuitivni alat za realizaciju složenih simulacija zasnovanih na ANSYS Multiphysics APDL (Application Programming Design Language) bazičnom softverskom paketu. Osnovni moduli u okviru softvera su *Design Modeler* za kreiranje 3D geometrijskih modela analiziranih sistema i *ANSYS Mechanical* za postavljanje diskretizacione mreže, graničnih uslova i vrednosti opterećenja, kao i za izvršenje simulacije i post-procesiranje rezultata simulacije. Workbench se može povezati sa drugim CAD softverima za potrebe modeliranja geometrije kompleksnih sistema.

3.1. Postupak 3D numeričke simulacije

Da bi se uspešno izvršila simulacija WSN čvora potrebno je u softverskom paketu ANSYS Workbench kreirati projekat koji odgovara fizičkim domenima u okviru kojih se odvija funkcionisanje sistema (Slika 3.1). Razmatranom čvoru odgovara *Steady-State Thermal-Electric* tip simulacije koji obuhvata šest glavnih stavki:

- Kreiranje baze materijala – *Engineering Data*
- Kreiranje 3D modela WSN čvora – *Geometry*
- Dodeljivanje materijala elementima geometrijskog modela, podešavanje parametara diskretizacione mreže i preciznost simulacije – *Model*
- Postavljanje graničnih uslova i definisanje opterećenja – *Setup*
- Pokretanje simulacije i definisanje rezultata simulacije koji se posmatraju – *Solution*
- Post-procesiranje rezultata simulacije – *Results*.

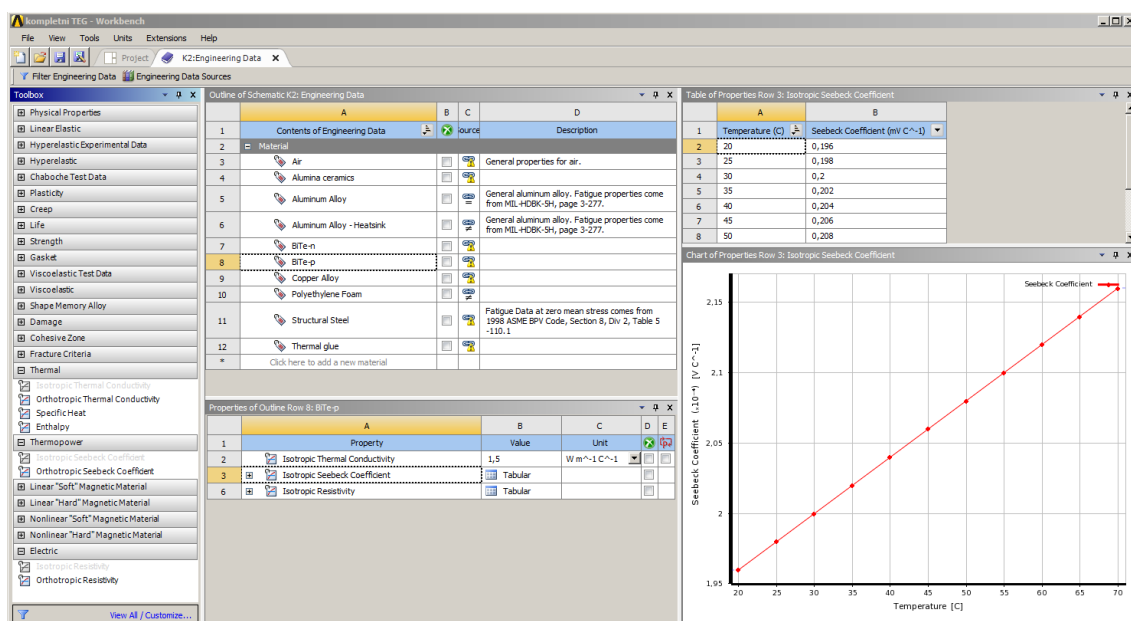


Slika 3.1 Kreiranje projekta u okviru softverskog paketa ANSYS Workbench

3.1.1. Kreiranje baze materijala

U okviru stavke *Engineering Data* se, kroz adekvatan korisnički interfejs, definišu fizički, termički, električni i magnetni parametri materijala koji konstituišu razmatrani čvor (Slika 3.2). ANSYS u svojoj biblioteci poseduje standardni set materijala koji se mogu

prilagoditi potrebama korisnika. Pored toga, mogu se definisati i novi materijali. Za elemente termopara iz biblioteke su izabrani p i n tip materijala Bi_2Te_3 i zadate vrednosti i temperaturne zavisnosti njegovih parametara. Od interesa su Zibekov koeficijent, termička provodljivost i specifična električna otpornost (Tabela 2.2). Za keramičke ploče izrađene od alumine dodeljene su vrednosti termičke provodljivosti i specifične električne provodnosti, dok je za bakarne kontakte preuzeta specifikacija iz biblioteke. Niskoprofilni aluminijumski hladnjak definisan je sa termičkom provodljivošću od $209 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. Dobra termička provodnost spojeva obezbeđena je pomoću termalnog lepka čija je toplotna provodnost postavljena na vrednost $1,1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. Termoizolacionoj peni je dodeljena termička provodljivost od $0,4 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ kako bi se uračunala neidealna popunjenost prostora između aluminijumskih štampanih ploča i disipacija toplote od strane elektronskih komponenata.

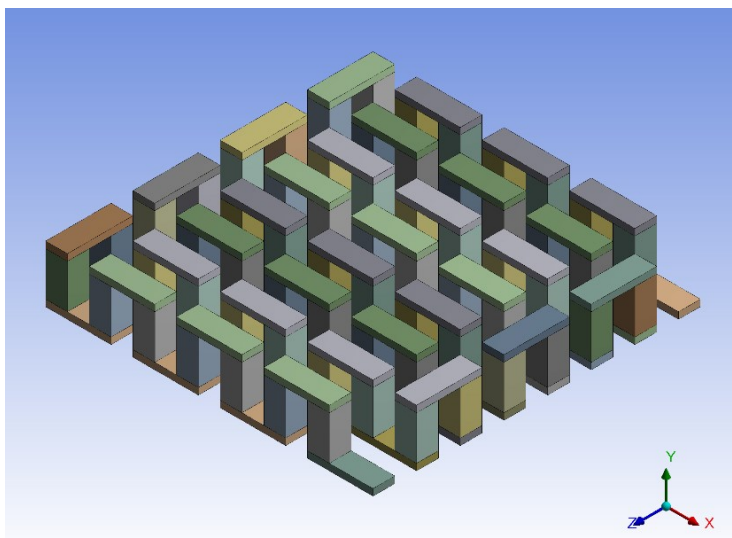


Slika 3.2 Izgled korisničkog interfejsa u okviru ANSYS-a u kome se nalazi biblioteka materijala – Engineering Data (Postavljanje temperaturne zavisnosti Zibekovog koeficijenta)

3.1.2. Kreiranje 3D modela bežičnog senzorskog čvora

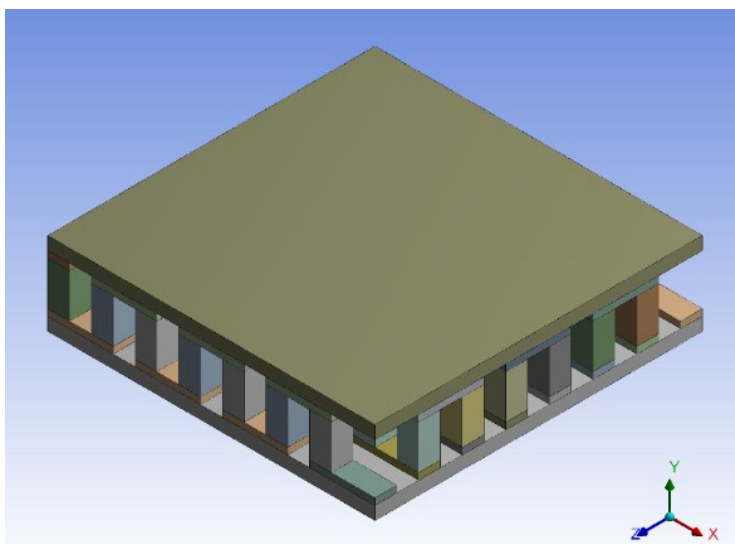
Modeliranje bežičnog senzorskog čvora urađeno je kroz više etapa korišćenjem modula *Design Modeler* u okviru softverskog paketa ANSYS. Prvo je modelovan samo TEG. Za svaki od šest razmatranih TEG-ova korišćeni su podaci iz tehničkih specifikacija dobijenih od proizvođača (Tabela 2.2). Na osnovu datih dimenzija i broja termoparova dobijeni su modeli svih TEG-ova. Slike 3.3 – 3.6, prikazuju proces modeliranja za TEG5 i celokupan WSN čvor kroz više etapa. U prvoj etapi, modeliran je jedan termopar sa odgovarajućim

kontaktima (Slika 2.10), a zatim je izvršeno multipliciranje i povezivanje 31 termopara identičnim rasporedom kao što je to u realnom TEG-u.



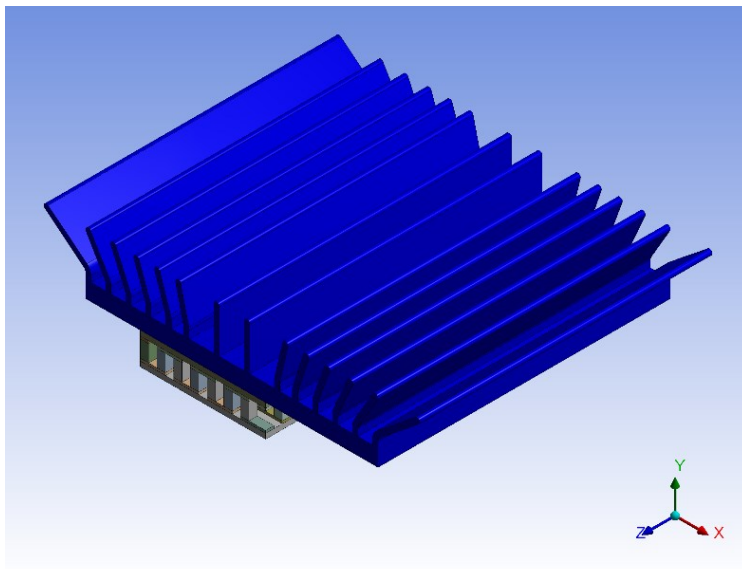
Slika 3.3 Modeliranje 31 termopara za TEG5

Zatim su dodate keramičke ploče sa donje i gornje strane. Sa ovakvim modelom urađen je set simulacija i analiza rada za svih šest TEG-ova (Slika 3.4).



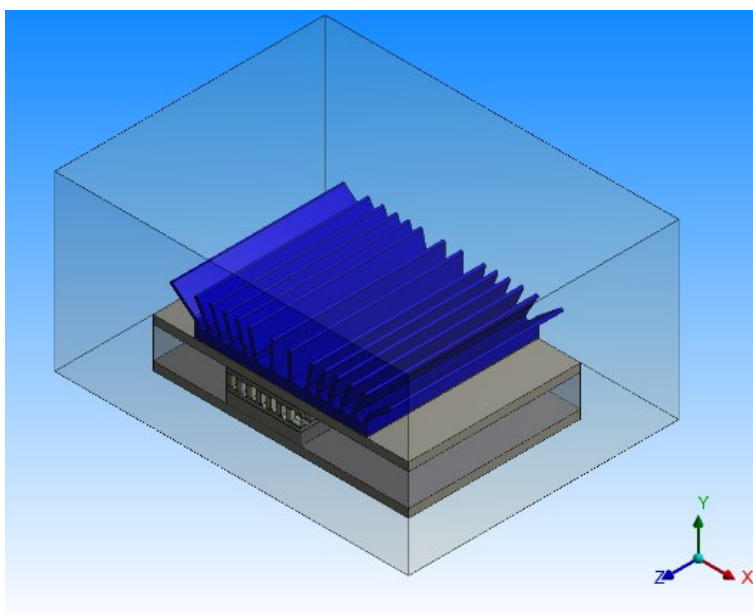
Slika 3.4 Završni izgled modeliranog TEG5

U sledećoj etapi modeliran je aluminijumski hladnjak po podacima iz tehničke specifikacije i dodat na gornju keramičku ploču (Slika 3.5).



Slika 3.5 Izgled modeliranog TEG5 sa hladnjakom

Na kraju modelirane su i dodate i ostale komponente sistema: alumijumske PCB ploče, termoizolaciona pena, termalni lepak, aluminijsko postolje i okolina (Slika 3.6).

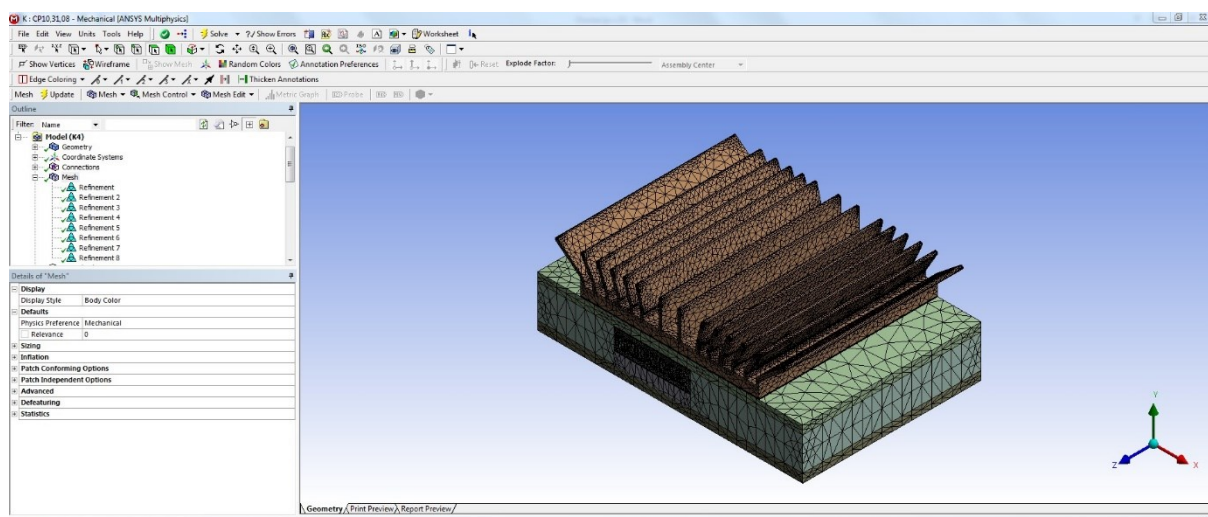


Slika 3.6 Konačni izgled modeliranog WSN čvora sa TEG5

Kreiran 3D model se prosleđuje modulu *ANSYS Mechanical* u kome se realizuju svi ostali koraci simulacione procedure.

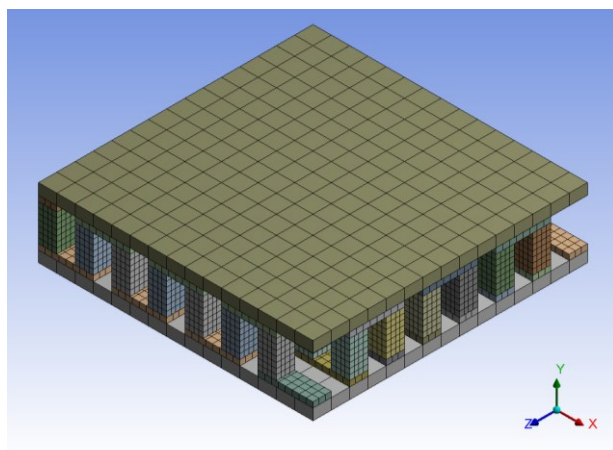
3.1.3. Dodeljivanje materijala i kreiranje diskretizacione mreže

Pre simulacije samog bežičnog senzorskog čvora potrebno je svakom elementu (geometrijskoj figuri) od koga se njegov model sastoji dodeliti karakteristike materijala. Ovaj korak se realizuje u okviru stavke *Model* preko komande *Assignment* na svakom elementu (ili grupi elemenata) u okviru podstavke *Geometry*. Postavljanje diskretizacione mreže se realizuje kroz podstavku *Mesh*. *Meshing* predstavlja definisanje čvorova i konačnih elemenata u okviru modela. Mreža čvorova za simulaciju je primarno postavljena kroz *ANSYS Mechanical* modul i naknadno poboljšana na spoljašnjim površinama sistema – opcija *Refinement* (Slika 3.7).

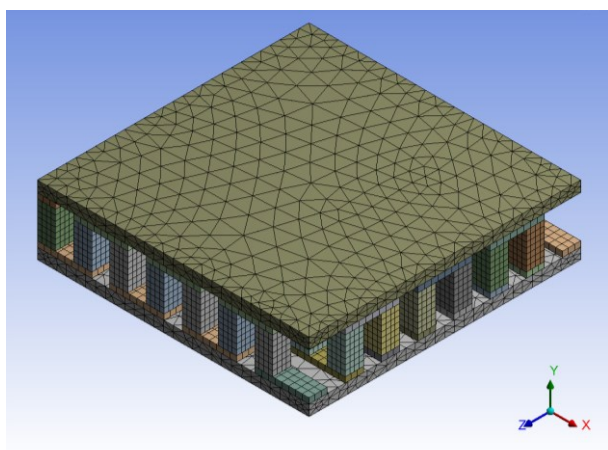


Slika 3.7 Izgled korisničkog interfejsa u okviru ANSYS-a nakon poboljšanja mreže čvorova

Gustina mreže se može menjati u skladu sa potrebama korisnika. Finija mreža (mreža sa više čvorova) daje veću tačnost simulacije, ali zahteva više vremena i kvalitetniju računarsku opremu. Optimalna mreža je obično ona sa najmanjom gustinom koja zadovoljava zadatu tačnost dobijenih rešenja. Na Slici 3.8 dati su primeri mreže sa manjom (a) i većom (b) gustinom čvorova.



(a)



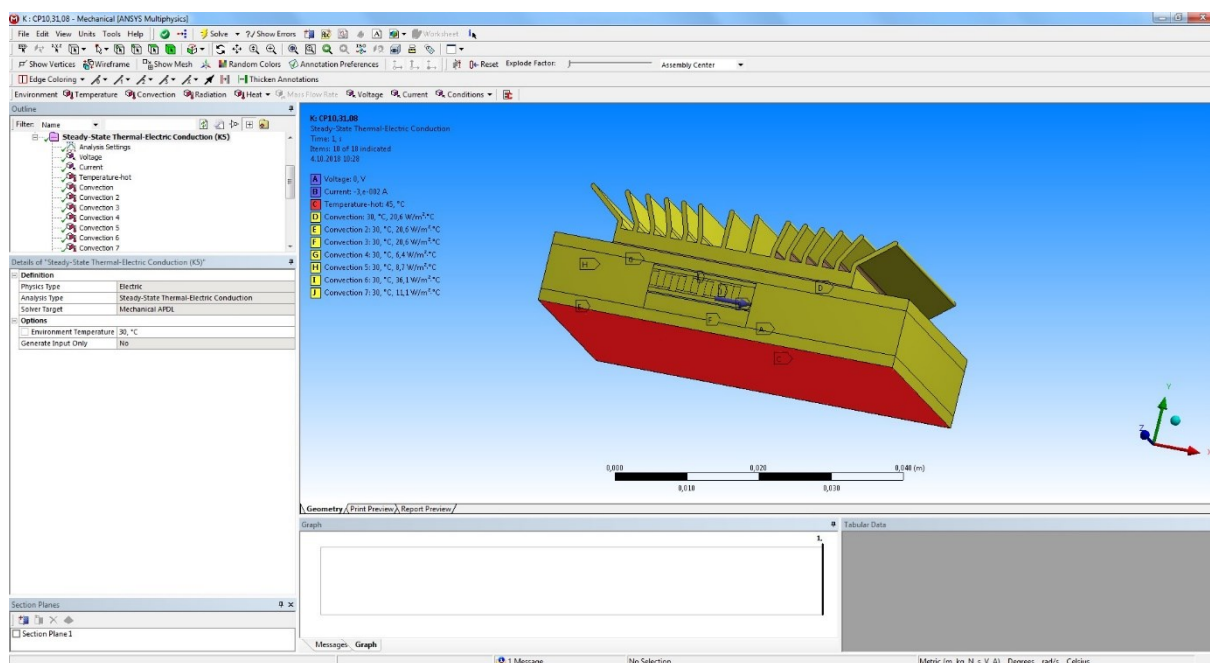
(b)

Slika 3.8 Izgled mreže čvorova za TEG5 (a) 30000 čvorova (b) 60000 čvorova

3.1.4. Postavljanje graničnih uslova i definisanje opterećenja

Kroz postavku *Steady-State Thermal Electric Conduction* stavke *Setup* se postavljaju granični uslovi i definišu opterećenja kojima je model izložen. Granični uslovi simulacije uključuju temperaturu okoline i fiksne vrednosti temperature i električnog potencijala na pojedinim površinama simulirane strukture. Opterećenje strukture je definisano promenljivim ulaznim parametrima: promenljiva vrednost temperature na pojedinim površinama, jačina električne struje koja protiče kroz termoparove i uslovi odvođenja toplote sa spoljašnjih površina sistema. U razmatranim simulacijama temperatura okoline je postavljena u opsegu 15-30°C, a temperatura tople strane je zadavana u granicama od 5°C do 30°C iznad temperature okoline. Jedna oblast električnog kontaktiranja je postavljena na

referentnu vrednost nultog potencijala, dok je dobijena vrednost potencijala na drugoj oblasti usvojena kao vrednost napona generisanog na potrošaču. Vrednost struje kroz TEG menjana je u opsegu od 0 A - kao uslov otvorenog kola, do maksimalnih 100 mA - kao uslov rada pri punom opterećenju. Odvođenje toplote je uslovljeno procesom konvekcije sa svih slobodnih površina sistema i definisano je konvektivnim korelacijama pri različitim uslovima strujanja vazduha. Na Slici 3.9 prikazan je izgled modela WSN čvora nakon definisanja ulaznih parametara za TEG5. Crvenom bojom označena je površina donje (tope) strane čvora na kojoj se zadaje fiksna temperatura, a žutom površine (sa zadatim koeficijentima konvekcije) sa kojih se vrši odvođenje toplote. Plava strelica pokazuje oblast električnog kontaktiranja.



Slika 3.9 Izgled korisničkog interfejsa u okviru ANSYS-a nakon definisanja ulaznih parametara WSN čvora sa TEG5

3.1.5. Pokretanje, definisanje i post-procesiranje rezultata simulacije

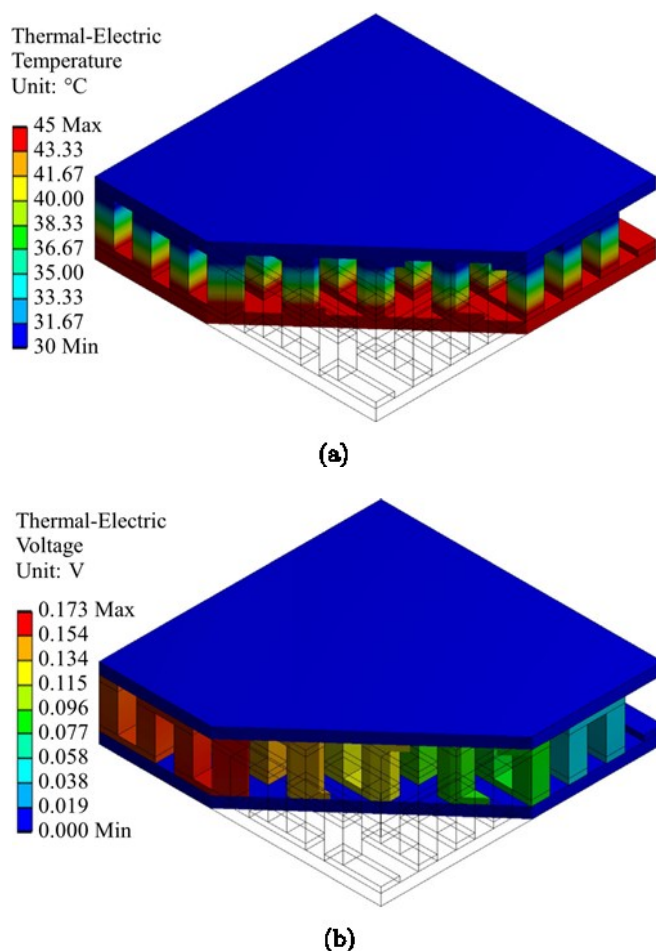
Nakon prethodno navedenih koraka pokreće se procedura simulacije komandom *Solve*. Sam ANSYS uključuje u obzir uticaj svih termoelektričnih efekata (Zibekov, Peltijev, Džulov i Tomsonov). Stavkom *Solution* definišu se rezultati simulacije koji se razmatraju. Mogu se posmatrati raspodele temperature i električnog potencijala unutar TEG-a, kao i vrednosti određenih električnih i termičkih veličina na površinama TEG-a. Rezultati simulacije se dobijaju numerički u vidu tabela ili grafički u vidu raspodele u zavisnosti od tipa analizirane veličine. Rezultati se po potrebi mogu posmatrati kroz odgovarajuće animacije.

3.2. Rezultati simulacije

Rad svih TEG-ova simuliran je u tri temperaturno različita režima rada: TEG kao samostalna komponenta, sa hladnjakom na gornjoj ploči i unutar kompaktnog WSN čvora.

3.2.1. Simulacija TEG-a kao samostalne komponente - Slučaj 1

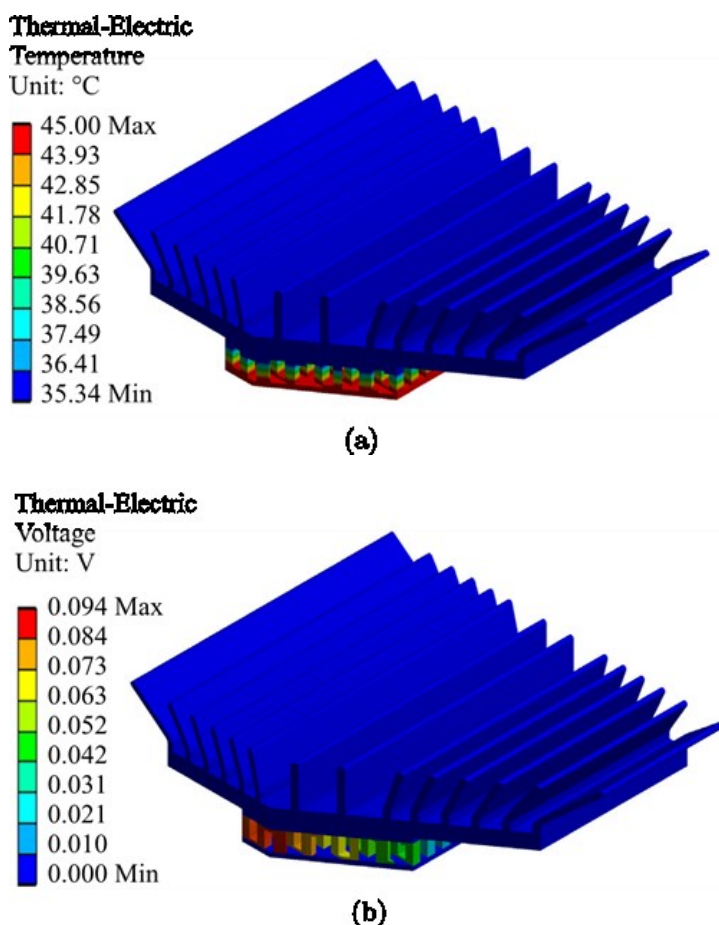
Kao granični uslov je postavljena temperatura gornje (hladne) ploče na $T_{hladna} = 30^{\circ}\text{C}$, dok je temperatura donje (tope) ploče T_{topla} menjana u opsegu $(32-50)^{\circ}\text{C}$. Slika 3.10 prikazuje raspodele temperature i električnog potencijala za TEG5 dobijene simulacijom za $\Delta T = T_{topla} - T_{hladna} = 15^{\circ}\text{C}$ i $I_L = 12\text{mA}$. Uočava se uniformna raspodela temperature od tople ka hladnoj ploči, kao i linearna raspodela potencijala od jedne ka drugoj oblasti kontaktiranja. Vrednost napona generisanog na potrošaču je određena maksimalnom vrednošću električnog potencijala u strukturi, odnosno potencijalom na odgovarajućoj kontaktnoj površini.



Slika 3.10 Raspodela temperature (a) i električnog potencijala (b) unutar TEG5 za $T_{topla} = 45^{\circ}\text{C}$, $T_{hladna} = 30^{\circ}\text{C}$ i $I_L = 12\text{mA}$

3.2.2. Simulacija TEG-a sa montiranim hladnjakom na hladnoj strani - Slučaj 2

Za razliku od prethodnog slučaja, simulacije TEG-ova urađene su sa niskoprofilnim aluminijumskim hladnjakom postavljenim na hladnoj strani generatora. Parametri koji opisuju hladnjak postavljeni su na sledeće vrednosti: termička provodljivost materijala – 209 W/m°C i termička otpornost - 11°C/W. Temperatura na toploj strani menjana je sa korakom od 5°C u opsegu od 35-60°C, uz definisanu vrednost temperature okoline $T_{okoline} = 30^{\circ}\text{C}$. Kao dominantan mehanizam odvođenja toplote sa TEG-a definisana je prirodna konvekcija sa svih slobodnih površina hladnjaka. Vrednosti koeficijenata konvekcije za sve površine hladnjaka izračunate su pomoću korelacija datih u potpoglavlju 4.2. U odnosu na prethodni slučaj, sa stanovišta korisnika, sada je mnogo pogodnije posmatrati temperaturnu razliku između tople ploče i okoline $\Delta T_a = T_{topla} - T_{okoline}$ umesto temperaturne razlike između ploča TEG-a ΔT . Simulacije su urađene za svih šest TEG-ova, a raspodele temperature i električnog potencijala za TEG5 pri $\Delta T_a = T_{topla} - T_{okoline} = 15^{\circ}\text{C}$ i $I_L = 12\text{mA}$ prikazane su na Slici 3.11.

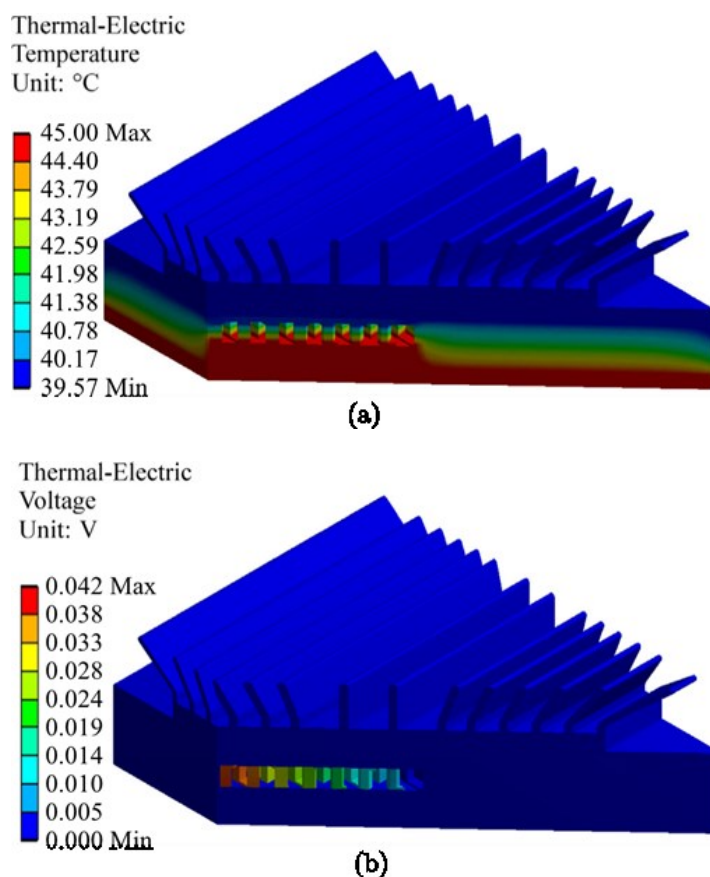


Slika 3.11 Raspodela temperature (a) i električnog potencijala (b) unutar TEG5 i hladnjaka za $T_{topla} = 45^{\circ}\text{C}$, $T_{okoline} = 30^{\circ}\text{C}$ i $I_L = 12\text{mA}$

Kao i u prvom slučaju, uočava se linearna raspodela temperature i električnog potencijala unutar TEG-a. Zbog promenjenih termičkih uslova (postavljen hladnjak), njihove vrednosti su različite u odnosu na prethodni slučaj. Iako je simulacijom postavljena fiksna temperaturna razlika na $\Delta T_a = 15^\circ\text{C}$, efektivna temperaturna razlika ΔT koja određuje vrednost generisanog termoelektričnog napona je sada $\Delta T = 9,5^\circ\text{C}$. Razlog smanjenja temperaturne razlike ogleda se u zavisnosti ΔT od K_{TEG} , K_a , termičke otpornosti hladnjaka kao i Peltijevog i Džulovog efekta. Zadnja dva efekta zavise od jačine električne struje koja protiče kroz TEG koja pak definiše ΔT . Temperatura takođe nije konstantna na samom hladnjaku (varijacije su manje od $0,5^\circ\text{C}$) zbog njegove velike termičke provodnosti.

3.2.3. Simulacija TEG-a unutar samonapajajućeg bežičnog senzorskog čvora – Slučaj 3

U trećem slučaju, rad TEG-ova je simuliran unutar kompaktnog WSN čvora. Kao deo čvora koji obezbeđuje razmenu toplote sa okolinom, primenjen je istovetan hladnjak kao u prethodnom slučaju. Termička provodljivost izolacione pene postavljena je na $0,4\text{W/m}^\circ\text{C}$. Ova vrednost uključuje i disipaciju snage i termičku provodnost ostalih elektronskih komponenata unutar čvora. Toplotna provodnost spojeva obezbeđena je pomoću termalnog lepka debljine $0,2\text{mm}$ i definisane termičke provodljivosti od $1,1\text{W/m}^\circ\text{C}$. Temperatura tople strane je, kao i u prethodnim slučajevima, povećavana do 60°C sa korakom od 5°C pri temperaturi okoline od 30°C . Slika 3.12 prikazuje raspodele temperature i električnog potencijala dobijene simulacijom za TEG5 unutar WSN čvora za $\Delta T_a = T_{topla} - T_{okoline} = 15^\circ\text{C}$ i $I_L = 12\text{mA}$. Iako su raspodele temperature i električnog potencijala unutar TEG-a ostale i dalje linearne, efektivna temperaturna razlika smanjena je na $\Delta T = 5,3^\circ\text{C}$ zbog termičke provodnosti unutar WSN čvora kao i konvekcije sa svih slobodnih površina.



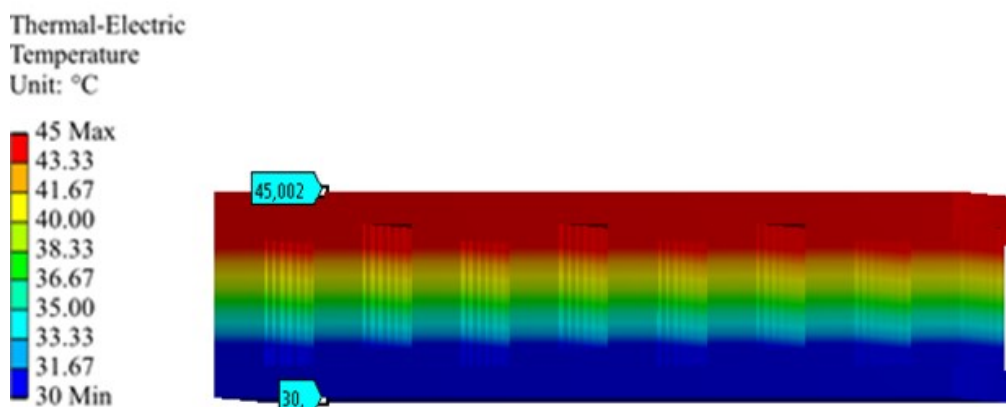
Slika 3.12 Raspodela temperature (a) i električnog potencijala (b) za TEG5 unutar WSN čvora pri $T_{topla} = 45^{\circ}\text{C}$, $T_{okoline} = 30^{\circ}\text{C}$ i $I_L = 12\text{mA}$

3.3. Eksperimentalna verifikacija

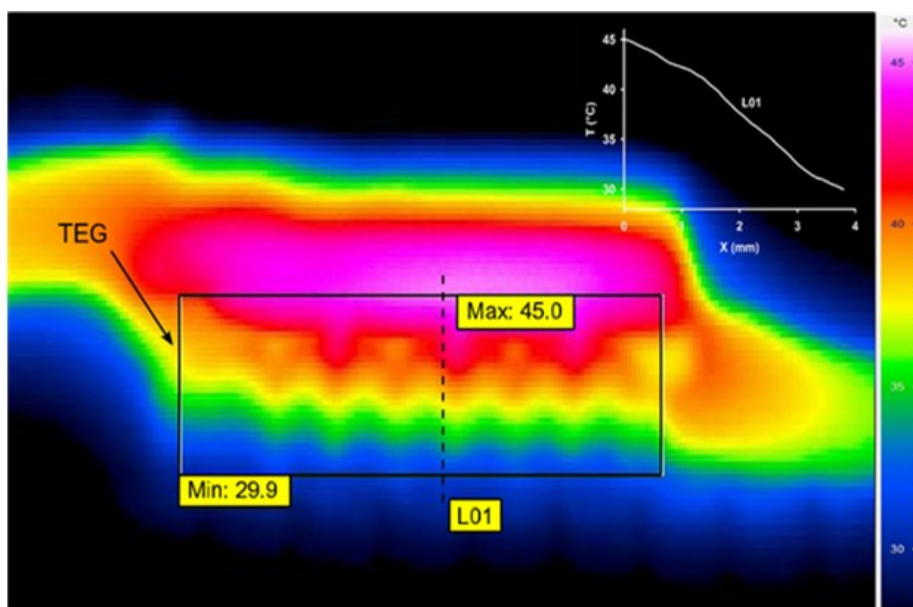
Za dobijanje raspodele temperature u TEG-u i u samom WSN čvoru eksperimentalnim putem korišćeno je termovizijsko snimanje. Da bi se dobio detaljniji pregled raspodele temperature korišćena je kamera Varioscans 3021ST sa rezolucijom $0,03^{\circ}\text{C}$ i vizuelno prikazivanje slika u 256 boja. Dobijene slike rezolucije 240×360 piksela, obrađene su softverom IRBIS V2.2 sa temperaturnom rezolucijom od $0,1^{\circ}\text{C}$. Propisana globalna emisivnost je podešena na 1,0 za temperaturu okoline od 30°C .

3.3.1. Samostalni TEG – Eksperiment 1

U prvom eksperimentu TEG je posmatran kao samostalna komponenta. Hladna strana TEG-a postavljena je na veliki hladnjak da bi se obezbedila konstantna vrednost temperature hladne ploče T_{hladna} . Za dobijanje konstantne temperature na toploj strani TEG-a T_{topla} , iskorišćen je drugi TEG kao grejač kontrolisan strujnim izvorom.



(a)



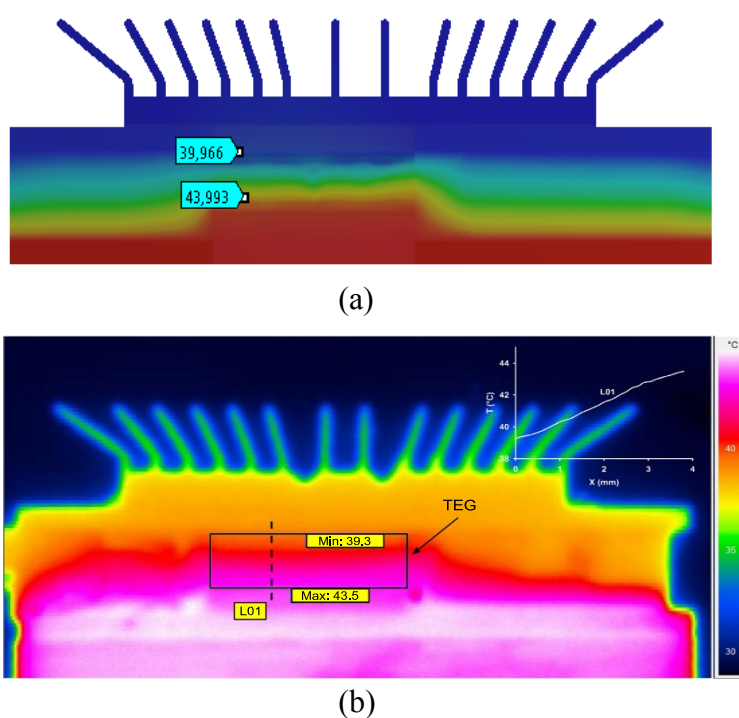
(b)

Slika 3.13 Raspodela temperature za TEG5 dobijena (a) simulacijom i (b) eksperimentom pri $T_{topla} = 45^{\circ}\text{C}$, $T_{hladna} = 30^{\circ}\text{C}$ i $I_L = 12\text{mA}$

Na izvode TEG-a priključeno je odgovarajuće opterećenje da bi se obezbedio protok struje željene vrednosti kroz termoelektrično kolo. Raspodela temperature unutar TEG-a dobijena eksperimentom vrlo je slična raspodeli dobijenoj simulacijom (Slika 3.13). Treba napomenuti da je funkcionisanje TEG-a prvenstveno određeno temperaturnom razlikom na njegovim stranama, dok je uticaj temperature okoline minimalan.

3.3.2. TEG unutar WSN čvora – Eksperiment 2

Da bi se dobili uslovi približno realnim uslovima rada WSN čvora on je postavljen horizontalno na grejno telo čija se temperatura podešavala računarski. Temperatura okoline je merena istovremeno sa temperaturom grejnog tela. Iako grejno telo zagreva okolni vazduh, što u stvari smanjuje efikasnost hladnjaka, njegova površina bila je približna površini donje ploče čvora pa je ovaj efekat zanemaren. Uporedne rezultate dobijene simulacijom i eksperimentom prikazuje Slika 3.14.



Slika 3.14 Raspodela temperature za TEG5 unutar WSN čvora dobijena (a) simulacijom i (b) eksperimentom (realni uslovi rada) pri $T_{topla} = 45^{\circ}\text{C}$, $T_{okoline} = 30^{\circ}\text{C}$ i $I_L = 12\text{mA}$

Kao što se vidi na slici gornja štampana ploča se ponaša kao produžetak hladnjaka što omogućava bolju razmenu toplote sa okolinom a samim tim i održavanje konstantne temperaturne razlike.

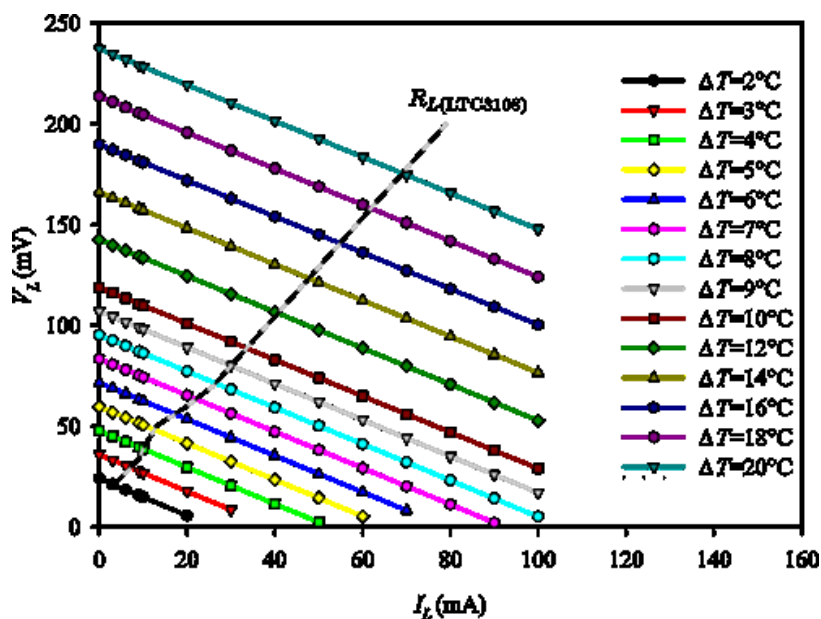
Kvalitativno, raspodele dobijene simulacijom i eksperimentom su vrlo slične. U oba slučaja postoje male kvantitativne razlike koje su manje od 1°C . Ova neslaganja se javljaju zbog pojednostavljene simulacione strukture i usvojenih mehanizama disipacije toplote. Dobijeni rezultati potvrđuju efikasnost termo-električne numeričke simulacije i opravdavaju upotrebu rezultata simulacije za karakterizaciju TEG-ova.

3.4. Rezultati karakterizacije

Izbor razmatranih TEG-ova za realizaciju WSN čvora ograničen je dimenzijama sistema kao i vrednostima generisanog termoelektričnog napona na potrošaču i snage prenete potrošaču pri različitim temperaturnim pobudama. Dimenzije čvora nameću izbor TEG-a sa malim brojem termoparova i malih spoljašnjih dimenzija. Sa druge strane vrednosti napona i snage zavise od otpornosti potrošača za koji TEG obezbeđuje napajanje (veće V_L za $R_L \gg R_{TEG}$ i P_{Lmax} za $R_L = R_{TEG}$).

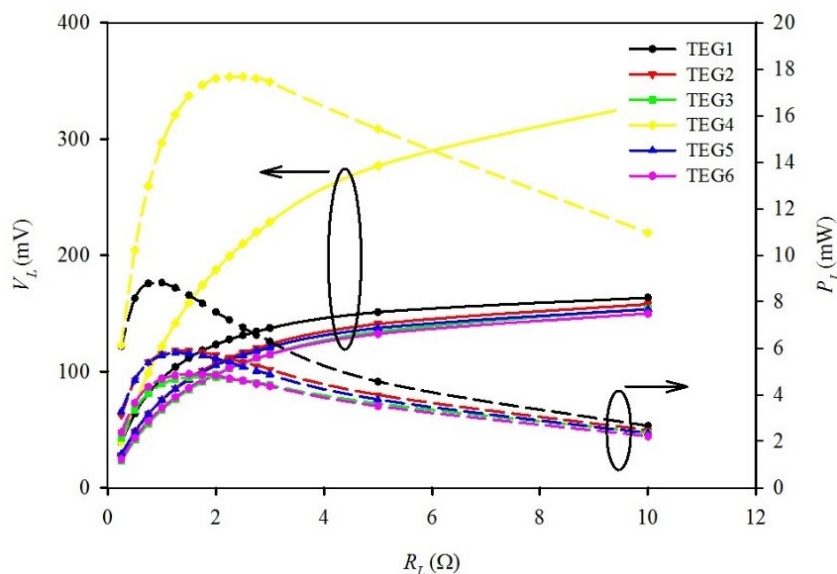
3.4.1. Rezultati za prvi slučaj

U prvom slučaju, simulacija je iskorišćena da bi se dobila zavisnost $V_L = f(I_L)$ uz ΔT kao parametar za sve TEG-ove kao samostalne komponente. Zavisnosti za TEG1 prikazuje Slika 3.15.



Slika 3.15 Zavisnost napona na potrošaču V_L od struje kroz termoeletrično kolo I_L sa $\Delta T = T_{topla} - T_{hladna}$ ($T_{hladna} = 30^\circ\text{C}$) kao parametar za samostalni TEG1; ulazna strujno naponska karakteristika kola LTC3108 sa odnosom transformacije 1:100 (isprekidana linija)

U preseku ovih zavisnosti sa radnim pravama za različite vrednosti R_L ($V_L = R_L \cdot I_L$) dobijene su zavisnosti V_L i P_L od R_L pri različitim ΔT . Slika 3.16 prikazuje skup ovih vrednosti za sve TEG-ove pri različitim vrednostima R_L i temperaturnoj razlici $\Delta T = 15^\circ\text{C}$.



Slika 3.16 Zavisnost napona V_L (puna linija) i snage P_L (isprekidana linija) na potrošaču od otpornosti potrošača R_L za $T_{topla} = 45^\circ\text{C}$, $T_{hladna} = 30^\circ\text{C}$ za samostalne TEG-ove

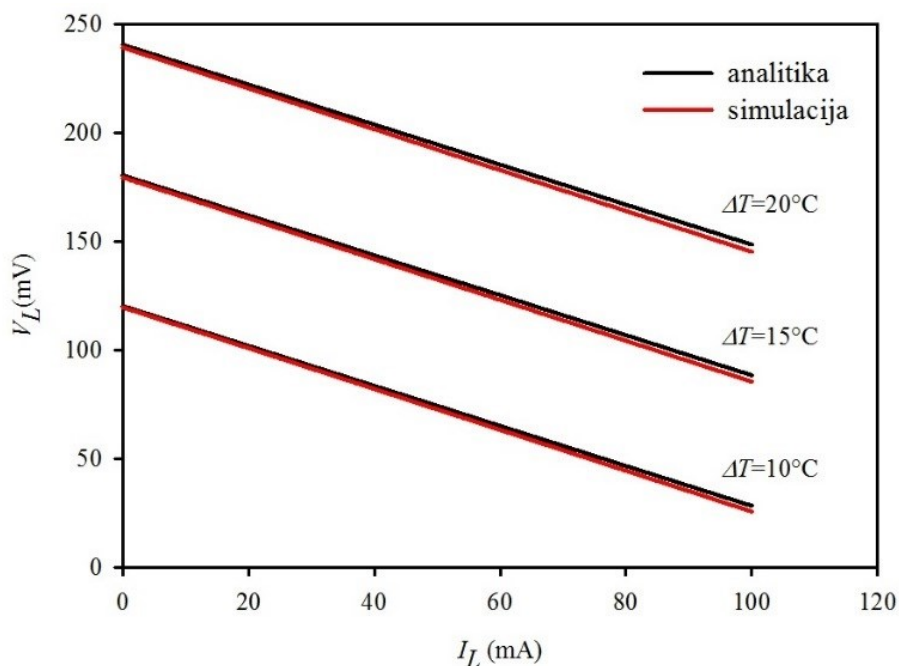
Na osnovu ovih rezultata TEG4 pokazuje najveću efikasnost, zbog toga što ima najveći broj termoparova. Na osnovu razmatranja ostalih pet TEG-ova sa istim brojem termoparova mogu se izvesti sledeći zaključci:

- i. Pri otpornostima potrošača mnogo većim od njihovih unutrašnjih ($R_L \gg R_{TEG}$) svi TEG-ovi obezbeđuju bliske vrednosti napona i snage;
- ii. U delu zavisnosti gde su otpornosti potrošača približne unutrašnjoj otpornosti TEG-ova ($R_L \approx R_{TEG}$), TEG-ovi se mogu rangirati na osnovu podataka koje prikazuje Tabela 2.2. TEG-ove možemo rangirati ili na osnovu vrednosti faktora snage PF (u opadajućem smislu) ili na osnovu vrednosti unutrašnje otpornosti generatora R_{TEG} (po rastućem redosledu).

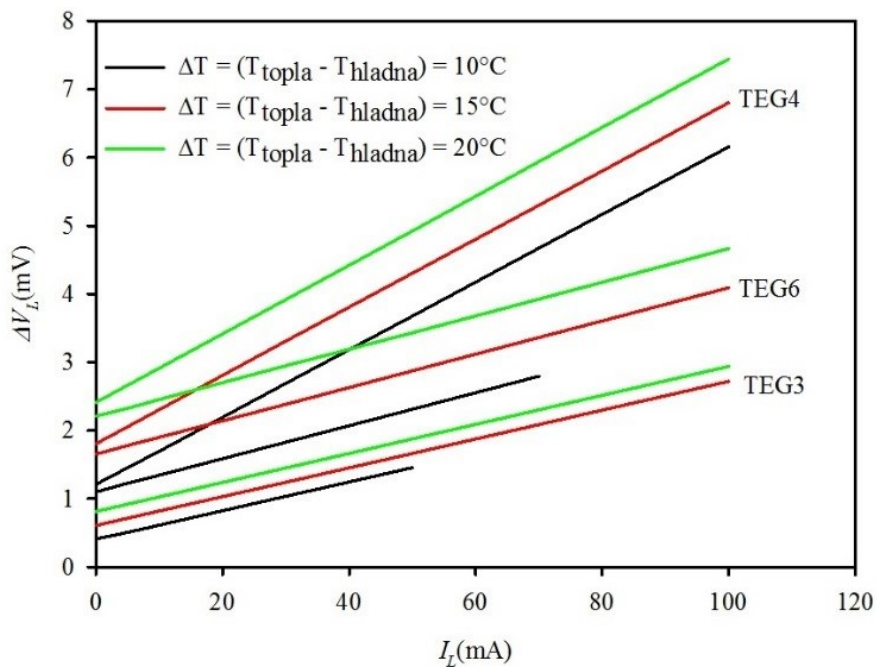
Uzimajući u obzir ova razmatranja TEG1 bi bio poželjan izbor u ovom slučaju.

3.4.2. Poređenje rezultata dobijenih analitičkim modelom i simulacijom za samostalan TEG

Vrednosti napona na potrošaču izračunate su na osnovu relacije (2.13) iz analitičkog modela TEG-a opisanog u potpoglavlju 2.6 i parametara iz Tabele 2.2. Vrednosti napona dobijene analitički upoređene su sa rezultatima dobijenim simulacijama za sve TEG-ove. Rezultati dobijeni poređenjem ova dva metoda karakterizacije prikazuju Slika 3.17 i Slika 3.18.



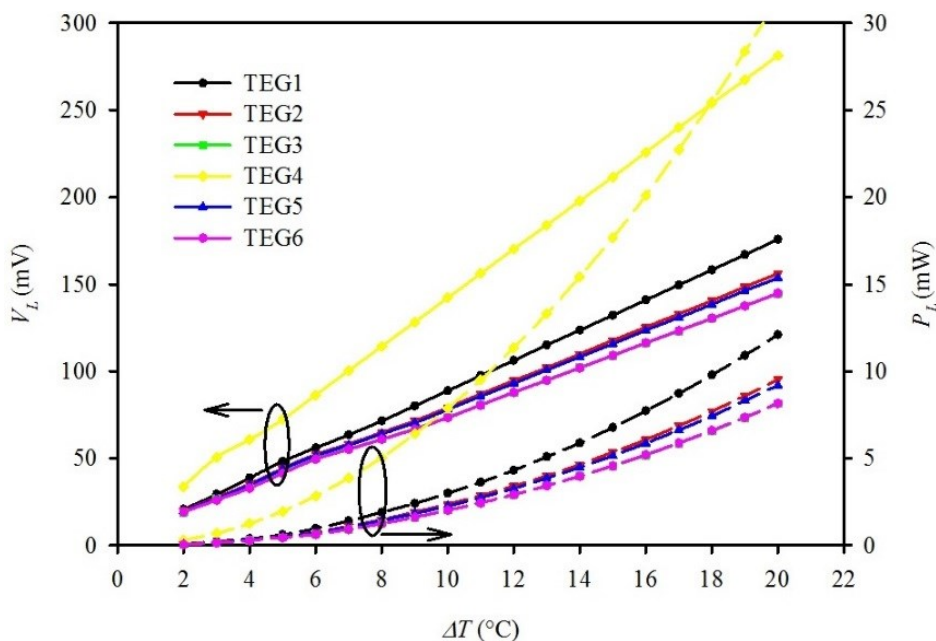
Slika 3.17 Zavisnosti napona na potrošaču $V_L = f(I_L)$ za tri različite vrednosti temperature T_{topla} (40°C , 45°C i 50°C) uz fiksnu temperaturu $T_{hladna} = 30^\circ\text{C}$, dobijene analitički i simulacijom za TEG1



Slika 3.18 Zavisnosti razlike napona na potrošaču V_L dobijenog analitički i simulacijom za tri različite vrednosti ΔT (zavisnosti koje nisu prikazane za TEG1, TEG2 i TEG5 nalaze se u opsegu zavisnosti između TEG3 i TEG6)

Analizom dobijenih rezultata uočava se da postoje određene razlike u dobijenim vrednostima napona V_L koje se povećavaju sa porastom struje i temperaturne razlike ΔT . Ove razlike se kreću u opsegu $\pm 10\%$ uzimajući u obzir sve TEG-ove. Iako analitički model ne uzima u obzir temperaturnu zavisnost α_{pn} i R_{TEG} (ne uzima u obzir Peltijev i Džulov efekat), vrednosti dobijenih napona su vrlo slične. Izvodi se zaključak da se za karakterizaciju TEG-a, kada se posmatra kao samostalna komponenta, analitički model može iskoristiti za izračunavanje vrednosti napona na potrošaču V_L .

Karakterizacija TEG-ova je izvršena i za potrebe napajanja WSN čvora opisanog u potpoglavlju 2.8, gde se generisani napon uvodi u karakteristično kolo LTC3108 čija je strujno naponska karakteristika prikazana na Slici 3.15. Data karakteristika odgovara slučaju kada LTC3108 napaja kondenzatore povezane na njegovom izlazu [56]. U ovoj konfiguraciji ulazna otpornost kola je promenljiva i kreće se u opsegu od 2,6 - 6 Ω , što je blisko unutrašnjim otpornostima TEG-ova. Vrednosti napona V_L i snage P_L prenešene LTC3108 kolu za različite vrednosti temperaturne razlike ΔT mogu biti određene sa Slike 3.15. U preseku zavisnosti $V_L = f(I_L)$, za različite vrednosti $\Delta T = T_{topla} - T_{hladna}$, sa ulaznom karakteristikom kola (u ulozu potrošača) dobijene su zavisnosti V_L i P_L od ΔT za sve TEG-ove. Ove zavisnosti prikazuje Slika 3.19.



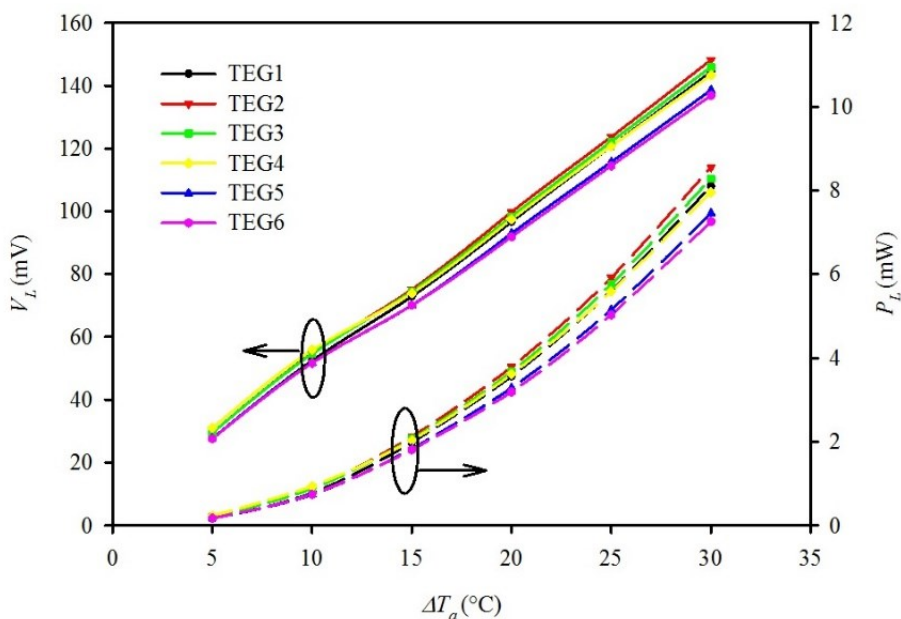
Slika 3.19 Zavisnost napona V_L (puna linija) i snage P_L (isprekidana linija) od temperaturne razlike $\Delta T = T_{topla} - T_{hladna}$ ($T_{hladna} = 30^\circ\text{C}$) za samostalne TEG-ove

Uočava se da zavisnosti napona pokazuju malu nelinearnost za niske vrednosti temperaturne razlike ΔT . Razlog tome je oblik ulazne strujno-naponske karakteristike LTC3108 kola (Slika 3.15). Rezultati za TEG4 se razlikuju od ostalih zbog toga što ovaj TEG ima najveći broj termoparova (71). Iz grupe od pet TEG-ova sa 31 termoparom, izdvaja se TEG1, zbog njegove najmanje unutrašnje otpornosti. Ostali TEG-ovi imaju bliske vrednosti unutrašnjih otpornosti i samim tim i slične karakteristike. Treba istaći da i TEG6 iako ima najmanje dimenzije, po karakteristikama ne odstupa mnogo od ostalih, te je izbor ovog TEG-a sasvim prihvatljiv u primenama gde je minijaturizacija WSN čvora od primarnog značaja.

Na osnovu zavisnosti snage prenete potrošaču P_L za sve TEG-ove, može se napraviti opšte rangiranje TEG-ova: TEG4; TEG1; TEG2 \approx TEG5; TEG3 \approx TEG6. Rangiranje prati njihove vrednosti faktora snage PF prikazane u Tabeli 2.2, što je u saglasnosti sa razmatranjima u vezi PF i K_{TEG} opisanim u potpoglavlju 2.6. Takođe, treba napomenuti da se isto rangiranje dobija poređenjem TEG-ova na osnovu parametara iz tehničkih specifikacija za maksimalni kapacitet hlađenja Q_{max} (Tabela 2.2).

3.4.3. Rezultati za drugi slučaj

U drugom slučaju izvršena je slična karakterizacija TEG-ova sa hladnjakom, a rezultate simulacije prikazuje Slika 3.20.



Slika 3.20 Zavisnost napona V_L (puna linija) i snage P_L (isprekidana linija) od temperaturne razlike $\Delta T_a = T_{topla} - T_{okoline}$ ($T_{okoline} = 30^\circ\text{C}$) za TEG-ove sa hladnjakom

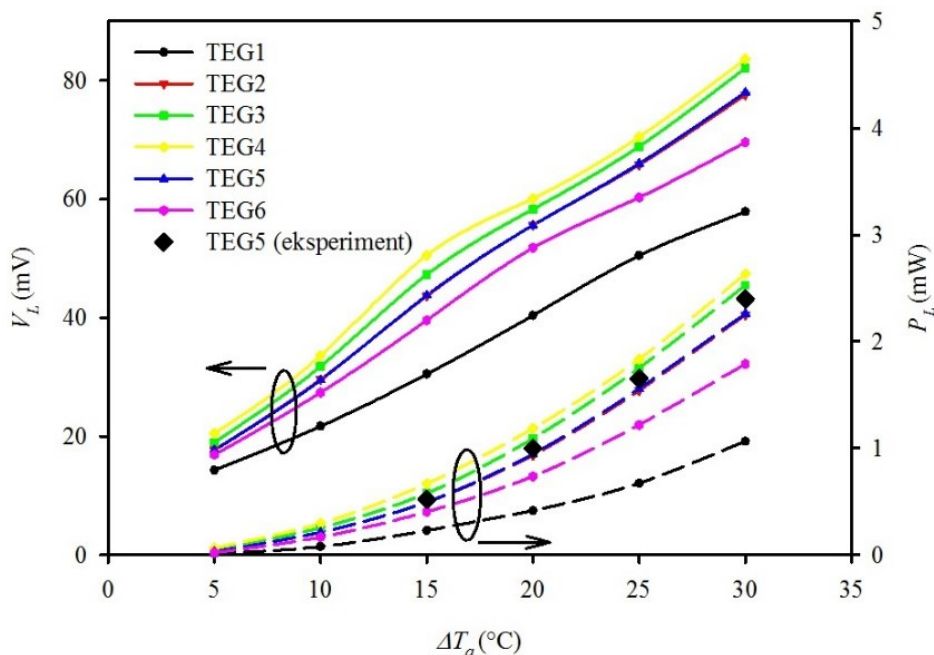
Efektivna temperaturna razlika ΔT je manja nego ΔT_a i zavisi od termičke spregu između hladnjaka i TEG-a. Samim tim i dobijene vrednosti napona i snage su manje nego u prvom slučaju. Analitički model koji uključuje termičku spregu, Peltijev i Džulov efekat ne može se dobiti u zatvorenom obliku. Korišćenjem relacije (2.13), za veće vrednosti I_L dobijaju se vrednosti za V_L koje su i do 50% veće nego one dobijene simulacijom, tako da u ovom slučaju predstavljen analitički model nije održiv.

Analizirajući rezultate prikazane na Slici 3.20 TEG-ovi se mogu rangirati na sledeći način: TEG2 \approx TEG3 \approx TEG1 \approx TEG4; TEG5 \approx TEG6. U ovom slučaju TEG4 nije više dominantan kao u prethodnom. Razlog tome je njegova velika površina i visoka unutrašnja termička provodnost koje mu otežavaju održavanje temperaturne razlike. Primećuje se da je uticaj hladnjaka na razliku u performansama između TEG-ova relativno minimalan. Treba naglasiti da najgore rangirani TEG6, koji je najmanjih dimenzija, po karakteristikama ne odstupa mnogo od ostalih. Rezultati su takvi da je V_L samo 7%, a P_L 17% manje u odnosu na TEG2 kao prvorangirani. U ovom slučaju rangiranje TEG-ova prati njihove vrednosti faktora efikasnosti ZT prikazane u Tabeli 2.2.

3.4.4. Rezultati za treći slučaj

U trećem slučaju izvršena je karakterizacija TEG-ova unutar kompaktnog WSN čvora i rezultati su prikazani i na Slici 3.21. Vrednosti napona i snage su manje nego u drugom slučaju, iako je primenjen isti hladnjak. Termičke karakteristike ostalih delova sistema (termička provodnost i konvekcija), utiču na promenu efektivne temperaturne razlike ΔT . Na osnovu dobijenih rezultata, TEG-ovi se mogu rangirati na sledeći način: TEG4; TEG3; TEG2 \approx TEG5; TEG6; TEG1.

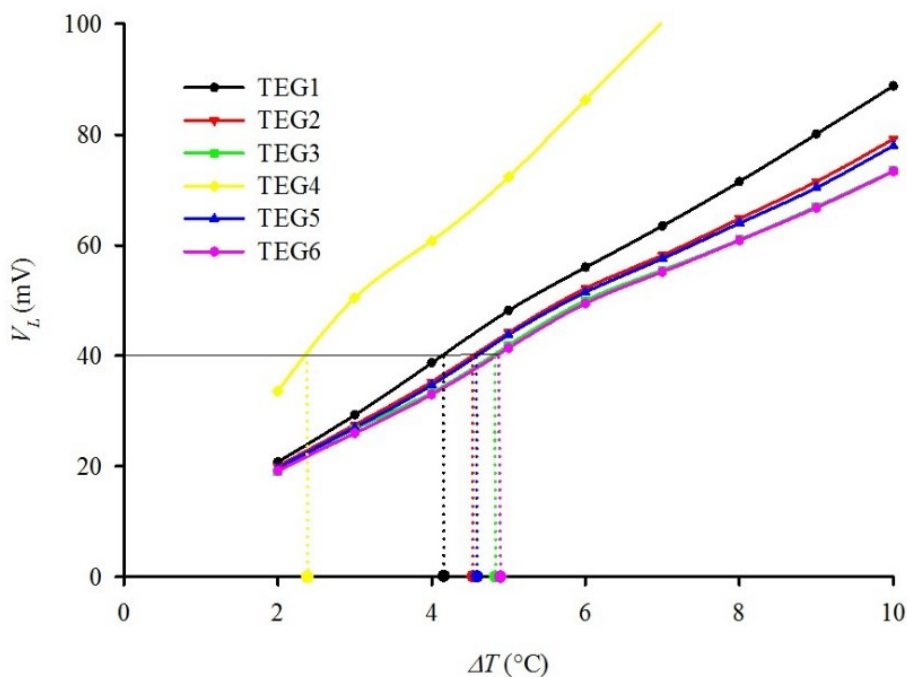
Uprkos tome što TEG4 ima skoro 2,5 puta više termoparova nego TEG3 i TEG6, u proseku pokazuje samo 4% bolje performanse. Međutim TEG4 zahteva za 44% veću površinu unutar WSN čvora u odnosu na TEG3, što je nepovoljnija opcija što se tiče dizajna čvora. Sa druge strane, ako posmatramo TEG-ove koji imaju jednake površine, TEG3 pokazuje za 6% bolje performanse nego TEG2 ili TEG5, zahvaljujući tome što ima najveću visinu elementa termopara l . TEG1 pokazuje najlošije rezultate i u odnosu na TEG4 kao najbolji daje za 32% manji napon V_L i za 60% manju snagu P_L . Rangiranje TEG-ova sa istim brojem termoparova prati visinu elementa termopara l , bez obzira na njihovu unutrašnju termičku provodnost.



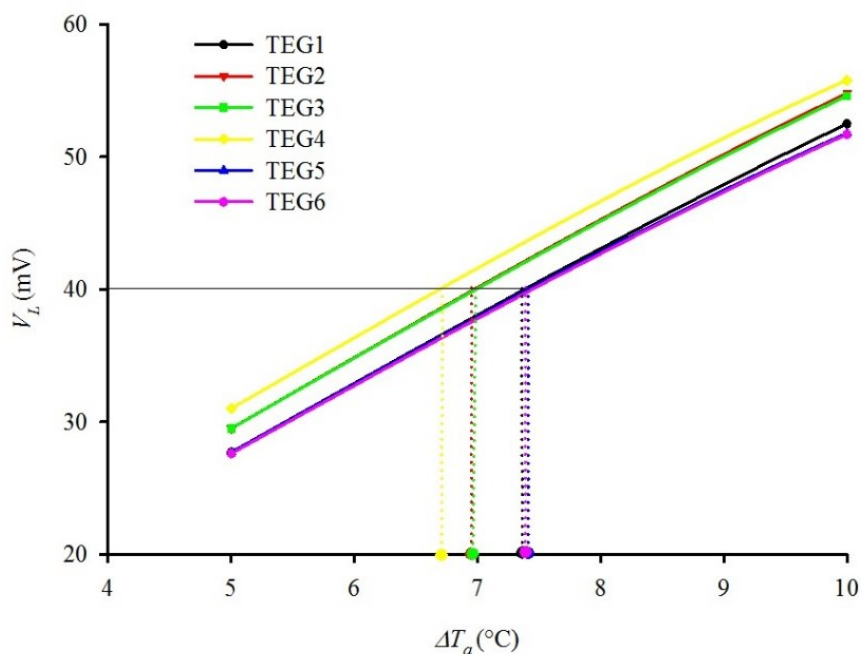
Slika 3.21 Zavisnost napona V_L (puna linija) i snage P_L (isprekidana linija) od temperaturene razlike $\Delta T_a = T_{topla} - T_{okoline}$ ($T_{okoline} = 30^\circ\text{C}$) za TEG-ove unutar WSN čvora

3.4.5. Razmatranje ponašanja TEG-ova sa aspekta primene u WSN čvoru

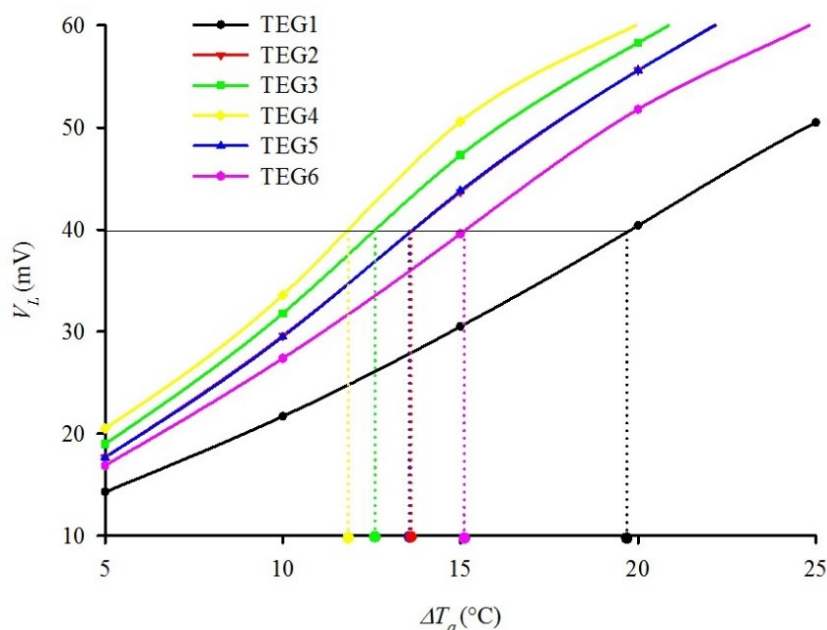
Za siguran i pouzdan rad WSN čvora zasnovanog na kolu LTC3108, čija je kompaktna realizacija sa aluminijumskim štampanim pločama opisana u potpoglavlju 2.8, potreban je napon od $V_L \approx 40$ mV [55]. Minimalna temperaturna razlika koja je potrebna za dobijanje ovog napona, za sva tri slučaja, može se odrediti grafičkom metodom sa Slika 3.22, 3.23 i 3.24.



Slika 3.22 Zavisnost napona V_L od temperaturne razlike $\Delta T = T_{topla} - T_{hladna}$ ($T_{hladna} = 30^\circ\text{C}$) za samostalne TEG-ove



Slika 3.23 Zavisnost napona V_L od temperaturne razlike $\Delta T_a = T_{topla} - T_{okoline}$ ($T_{okoline} = 30^\circ\text{C}$) za TEG-ove sa hladnjakom



Slika 3.24 Zavisnost napona V_L od temperaturne razlike $\Delta T_a = T_{topla} - T_{okoline}$ ($T_{okoline} = 30^\circ\text{C}$) za TEG-ove unutar WSN čvora

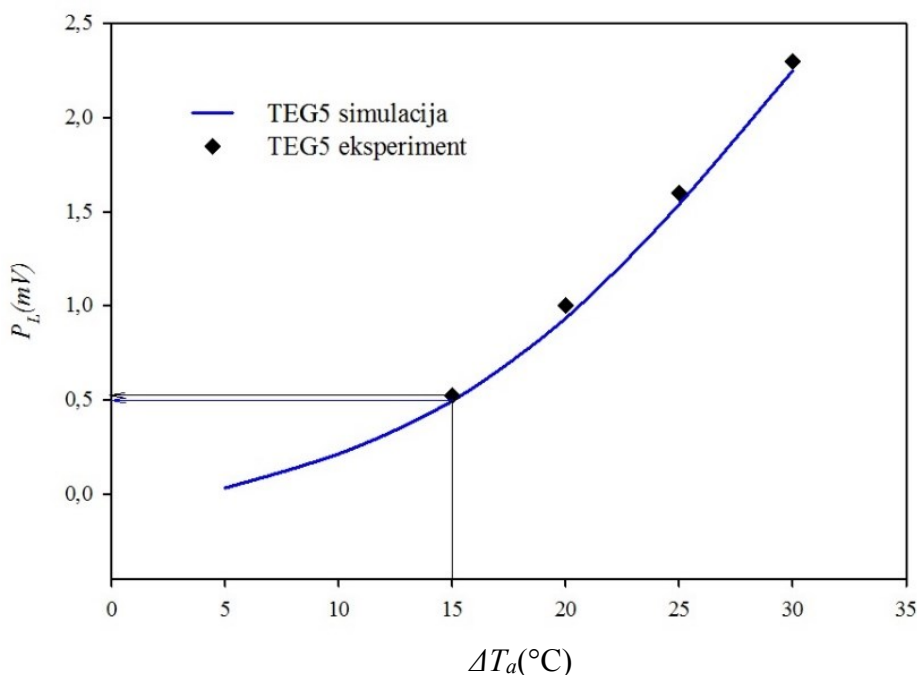
Rezultate grafičke analize za sva tri slučaja prikazuje Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Minimalna temperaturna razlika koja je potrebna za dobijanje $V_L = 40$ mV (pri temperaturama T_{hladna} i $T_{okolina}$ postavljenim na 30°C)

	TEG1	TEG2	TEG3	TEG4	TEG5	TEG6
$\Delta T_{(min)}$ za samostalni TEG ($^\circ\text{C}$)	4,10	4,54	4,70	2,32	4,53	4,80
$\Delta T_{a(min)}$ za TEG sa hladnjakom ($^\circ\text{C}$)	7,40	6,90	6,90	6,70	7,40	7,40
$\Delta T_{a(min)}$ za TEG unutar WSN čvora ($^\circ\text{C}$)	19,70	13,50	12,60	11,90	13,50	15,20

Iz prezentovanih rezultata se može zaključiti da ostale komponente unutar WSN čvora utiču na performanse TEG-a isto kao što hladnjak utiče na rad samostalnog TEG-a. Ovo ukazuje na to da bi prilikom projektovanja kompaktnog WSN čvora trebalo imati u vidu ove činjenice.

Urađena su i eksperimentalna merenja snage predate kolu za skladištenje i upravljanje prikupljenom energijom unutar čvora pri različitim temperaturnim pobudama u laboratorijskim uslovima. Električna merenja izvršena su za TEG5 unutar realizovanog WSN čvora i te rezultate prikazuje Slika 3.25.



Slika 3.25 Zavisnost snage P_L od temperaturne razlike $\Delta T_a = T_{topla} - T_{okoline}$ ($T_{okoline} = 30^\circ\text{C}$), dobijena simulacijom (puna linija) i eksperimentom (tačkasti prikaz) za TEG5 unutar WSN čvora

Na primer, za zadate parametre $\Delta T_a = 15^\circ\text{C}$ i $I_L = 12\text{mA}$, izmerena je vrednost napona $V_L \approx 43\text{ mV}$. Dobijena vrednost snage P_L je $516\ \mu\text{W}$ što je vrlo blisko rezultatu od $504\ \mu\text{W}$ dobijenog simulacijom. Uporedni rezultati dobijeni za TEG5 unutar WSN čvora $\Delta T_a = (15^\circ\text{C}, 20^\circ\text{C}$ i $25^\circ\text{C})$ i $I_L = 12\text{mA}$ prikazuje Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Uporedni prikaz rezultata dobijenih simulacijom i eksperimentom za TEG5 unutar WSN čvora za tri vrednosti temperaturne razlike ΔT_a i $I_L = 12\text{mA}$

ΔT_a (°C)	15	20	25
V_L (mV) simulacija	42	78	128
V_L (mV) eksperiment	43	82	136
P_L (μW) simulacija	504	937	1540
P_L (μW) eksperiment	516	981	1630

Konvertovana snaga kreće se u opsegu od $200 - 600\ \mu\text{W}$, i zavisi od temperaturne razlike ΔT_a i efikasnosti kola LTC3108. Ta snaga se prvenstveno koristi u elektronskim komponentama prilikom akvizicije i prenosa podataka (oko $100\ \mu\text{W}$), dok se preostali deo koristi za punjenje sekundarnih (*backup*) kondenzatora.

4. UTICAJ AMBIJENTALNIH USLOVA NA RADNE KARAKTERISTIKE WSN ČVORA

Za razliku od prethodnog poglavlja, u kojem je razmatrano funkcionisanje čvora za predefinisane radne uslove, u ovom poglavlju se proširuje analiza sistema uzimajući u obzir varijaciju temperature okoline, kao i strujanje vazduha, pojava koje su neizbežno prisutne u realnom radnom okruženju. Ispitivan je njihov uticaj na vrednost generisanog napona, a samim tim i na vrednost napona na potrošaču V_L . Kao i u prethodnim analizama korišćena je 3D numerička simulacija kompletnog WSN čvora. U analizi su korišćena tri različita TEG-a (TEG4, TEG5 i TEG6) sa karakteristikama prikazanim u Tabeli 2.2. Simulacije su takođe izvedene pomoću softvera ANSYS 18.0, numeričkim rešavanjem jednačina termoelektrične provodnosti. Uračunat je i uticaj Džulovog zagrevanja kao i Zibekov, Peltijev i Tomsonov efekat, dok je efekat radijacije zanemaren [58, 59].

4.1. Postavka simulacije

Za strukturu WSN čvora sa Slike 2.16. konvekcija sa spoljašnjih površina u okolinu definisana je kao dominantan mehanizam odvođenja toplote. Prema Njutnovom zakonu hlađenja, brzina prenosa toplote konvekcijom je [60,61]:

$$q_c = \bar{h}_c A_s (T_s - T_{okoline}), \quad (4.1)$$

gde je A_s veličina površine sa koje se odvodi toplota, \bar{h}_c je srednja vrednost koeficijenta prenosa toplote na razmatranoj površini, dok su T_s i $T_{okoline}$ temperature površine i fluida (okoline) daleko od površine, respektivno. Složenost predstavljene jednačine krije se u koeficijentu prenosa toplote koji, za razliku od koeficijenta provođenja toplote, ne predstavlja fizičku konstantu. Na vrednost koeficijenta prenosa toplote konvekcijom između ostalog utiču:

1. Priroda kretanja fluida (razlikuju se laminarno, turbulentno i mešovito strujanje)
2. Fizičke osobine fluida (gustina, provodljivost, viskozitet, specifična toplota, pritisak)
3. Oblik i dimenzije kontaktnih površina (ravna površina, cilindar)
4. Hrapavost površine čvrstog tela (određuje koeficijent trenja)
5. Vrsta konvekcije (prirodna i prinudna)
6. Temperature fluida i čvrstog tela
7. Vrsta kretanja fluida (spoljašnje i unutrašnje)

Proračunavanje koeficijenta prenosa toplote praktično je nemoguće, pa se njegovo određivanje vrši eksperimentalnim putem primenom teorije sličnosti. Parametri i osobine koji utiču na vrednost koeficijenta prenosa toplote se grupišu u bezdimenzione kriterijume sličnosti. Postoji veći broj tih kriterijuma, a neki od njih su dati u Tabeli 4.1. [62].

Tabela 4.1 Kriterijumi sličnosti [62]

Oznaka	Naziv	Izraz	Opis
Nu	Nuseltov broj	$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$	Karakteriše uslove prenosa toplote između čvrstog tela i okoline. Predstavlja najvažniji kriterijum jer sadrži nepoznati koeficijent α
Gr	Grashofov broj	$Gr = \frac{g\beta l^3 T}{\nu^2}$	Uzima u obzir odnos sile gravitacije i viskozne sile. Kod prirodne konvekcije definiše uticaj uzgona koji se javlja usled razlike pritiska fluida koji se nalazi na različitim temperaturama
Pe	Pekleov broj	$Pe = \frac{vl}{a} = Pr Re$	Predstavlja odnos između prenosa toplote konvekcijom i provođenjem
Re	Rejnoldsov broj	$Re = \frac{vl}{\nu}$	Predstavlja odnos inercijalnih sila i viskoznosti. Služi kao kriterijum za razlučivanje između laminarnog i turbulentnog kretanja fluida
Pr	Prantlov broj	$Pr = \frac{\nu}{a}$	Predstavlja odnos viskoznosti i toplotne difuzivnosti. Povezuje viskozno i temperaturno polje fluida. Određuje se iz tablica
St	Stantanov broj	$St = \frac{\alpha}{\rho c \nu} = \frac{Nu}{Re Pr}$	Predstavlja odnos toplote koja se preda fluidu i specifične toplote fluida. Ne uzima u obzir karakterističnu dimenziju pa je pogodan za upotrebu u slučaju tela složenije geometrije
Eu	Ojlerov broj	$Eu = \frac{\rho v^2}{p}$	Predstavlja odnos inercionih sila i pritiska. Kod kretanja fluida pod silom pritiska definiše promenu pritiska duž strujnice
Ra	Rajlijev broj	$Ra = \frac{g\beta l^3 \Delta T}{\alpha \nu} = Gr Pr$	Definiše sa kao proizvod Grashofovog broja i Prantlovog broja. Na osnovu njegove vrednosti određuje se priroda kretanja fluida (laminarno ili turbulentno)

gde su :

α – koeficijent prenosa toplote sa tela na fluid ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

v – brzina fluida (m/s)

λ – koeficijent toplotne provodljivosti fluida (W/m °C)

g – gravitaciono ubrzanje (m/s²)

β – zapreminski koeficijent širenja fluida (1/°C)

l – karakteristična dimenzija površine sa koje se odvodi toplota (m)

ν – kinematička viskoznost fluida (Nm²/s)

a – toplotna difuzivnost fluida (m²/s)

ρ – gustina fluida (kg/m³)

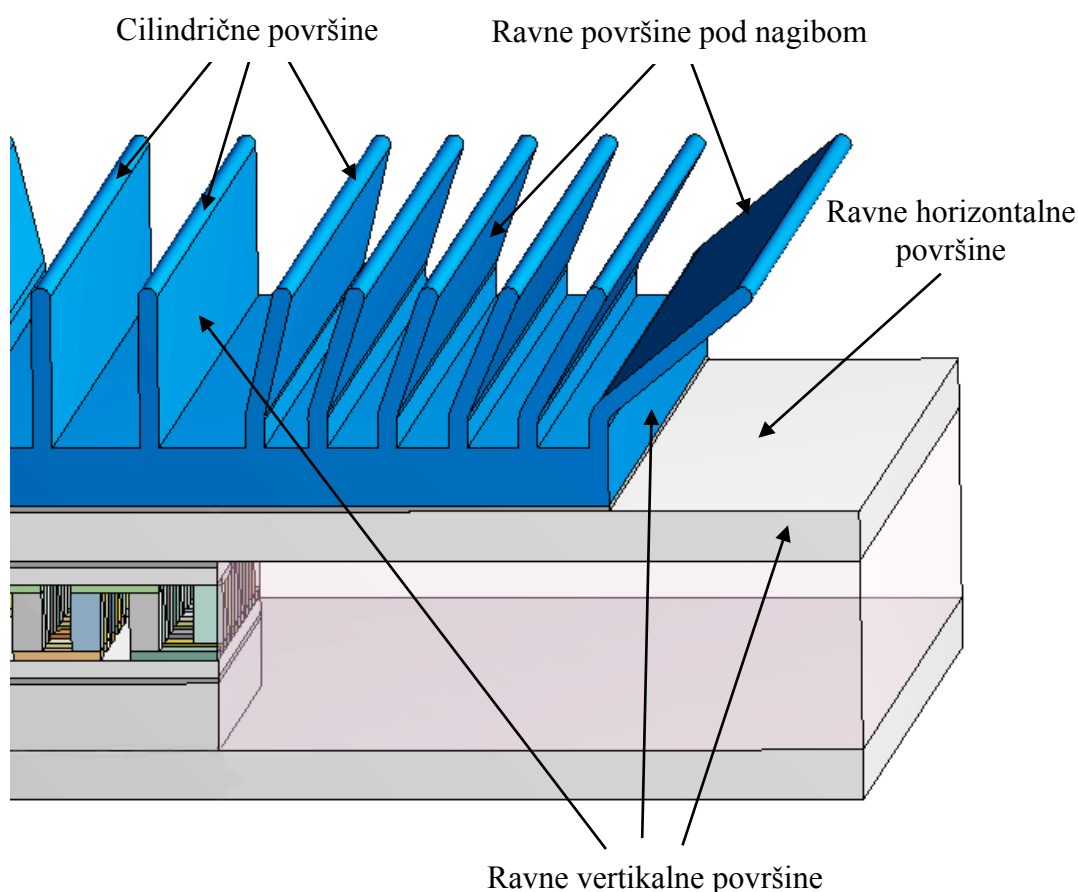
c – specifična toplota fluida (J/kg°C)

ΔT – temperaturna razlika između čvrstog tela i fluida (°C)

Odvođenje toplote procesom konvekcije se može simulirati primenom računarske dinamike fluida (*Computational Fluid Dynamics* - CFD) ili koristeći pretpostavku kako će toplota napustiti zapreminu koja se posmatra. CFD pristup [63] automatski izračunava vrednosti svakog koeficijenta prenosa toplote kao funkciju temperature odgovarajuće površine i obično daje najtačnije rezultate. Međutim, za složene geometrijske oblike, izračunavanje ovim pristupom postaje vrlo komplikovano i nepredvidivo, zato što zahteva dodatni fluidni domen i eksternu vezu između CFD-a i softvera za rešavanje termoelektričnih pojava, kao i detaljno podešavanje numeričkih parametara simulacije. Za takav pristup je potrebno široko znanje zakona termodinamike, prostiranja fluida i numeričke matematike. U daljoj analizi korišćen je jednostavniji ali dovoljno efikasan pristup zasnovan na konvekcionim relacijama definisanim za različite geometrijske oblike površina sa kojih se toplota odvodi.

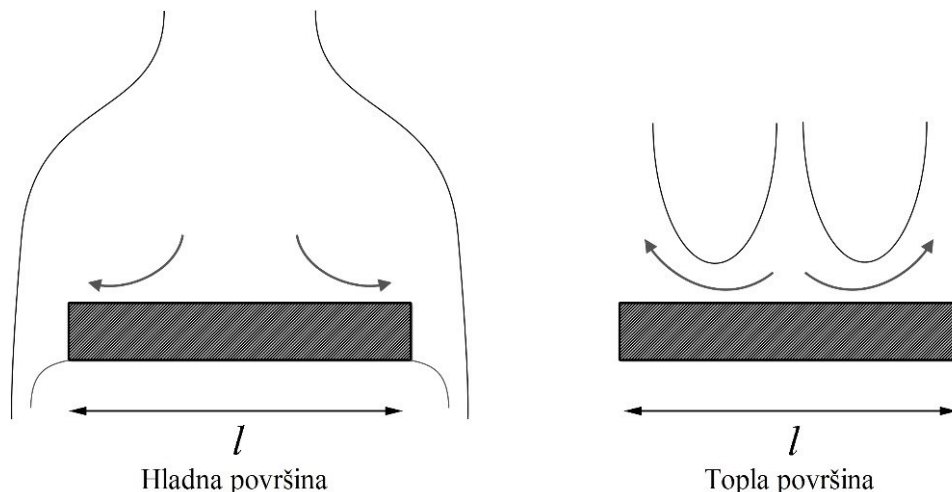
4.2. Proračun koeficijenata hlađenja - konvekcione korelacije

Jednostavniji pristup koji je korišćen u ovoj analizi podrazumeva pretpostavku prosečnih vrednosti koeficijenta prenosa toplote koji se kao takvi dodeljuju odgovarajućim površinama i predstavljaju početne granične uslove u termoelektričnim simulacijama. Poznavajući oblik (ravna, cilindrična), orijentaciju (horizontalna, vertikalna, nagnuta - Slika 4.1), i dimenzije površine, vrednosti koeficijenata se mogu izračunati pomoću konvekcione korelacije koje su široko dostupne u literaturi [60, 61, 64]. Ove korelacije su razvijene kako za prirodnu, tako i za prinudnu konvekciju, uzimajući u obzir i brzinu kretanja fluida. U svim slučajevima, karakteristike materijala računane su za vrednost temperature tankog filma u blizini površine $T_f = (T_s + T_{okoline})/2$.



Slika 4.1 Oblik i orijentacija površina simulacione strukture WSN čvora na koje se primenjuju konvekcione korelacije

4.2.1. Prirodna konvekcija – horizontalna površina



Slika 4.2 Šematski prikaz geometrije i parametara konvekcionijskih korelacija za prirodnu konvekciju sa gornje površine ravne horizontalne površine

Proračun koeficijenta prenosa toplote h za ovaj slučaj vrši se na osnovu konvekcionijskih korelacija i to:

ako je $\rho < \rho_{ext}$, pomoću

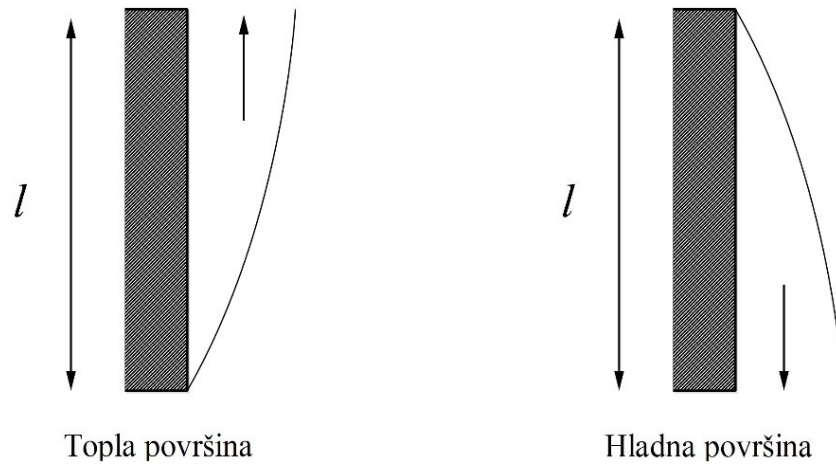
$$h = \begin{cases} \frac{\lambda}{l} \cdot 0,54 R_a^{\frac{1}{4}} & \text{ako je } 10^4 \leq R_a \leq 10^{10} \\ \frac{\lambda}{l} \cdot 0,15 R_a^{\frac{1}{4}} & \text{ako je } 10^7 \leq R_a \leq 10^{11} \end{cases} \quad (4.2)$$

ili ako je $\rho \geq \rho_{ext}$, onda

$$h = \frac{\lambda}{l} \cdot 0,27 R_a^{\frac{1}{4}} \text{ ako je } 10^5 \leq R_a \leq 10^{10}. \quad (4.3)$$

Parametar ρ_{ext} predstavlja gustinu fluida daleko od površine, dok se R_a izračunava pomoću izraza datog u Tabeli 4.1. Karakteristična dimenzija površine sa koje se odvodi toplota l definisana je kao odnos površina/obim i predstavlja ulazni podatak.

4.2.2. Prirodna konvekcija – vertikalna površina



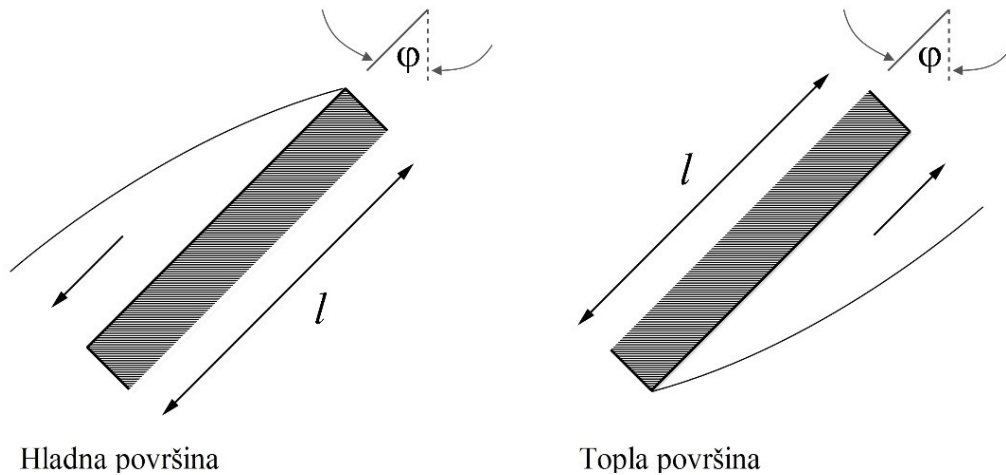
Slika 4.3 Šematski prikaz geometrije i parametara konvekcionih korelacija za prirodnu konvekciju sa ravne vertikalne površine

Konvekcione korelacije koje se koriste u ovom slučaju su:

$$h = \begin{cases} \frac{\lambda}{l} \cdot \left(0,68 + \frac{0,67 R_a^{\frac{1}{4}}}{\left(1 + \left(\frac{0,492\lambda}{\nu c} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{4}{9}}} \right) & \text{ako je } R_a \leq 10^9 \\ \frac{\lambda}{l} \cdot \left(0,825 + \frac{0,387 R_a^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0,492\lambda}{\nu c} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 & \text{ako je } R_a > 10^9, \end{cases} \quad (4.4)$$

gde visina vertikalne površine l predstavlja ulazni podatak. Za gravitaciono ubrzanje g uračunata je vrednost od $9,81\text{m/s}^2$. Ova korelacija je validna za $10^4 \leq R_a \leq 10^{13}$.

4.2.3. Prirodna konvekcija – površine pod nagibom



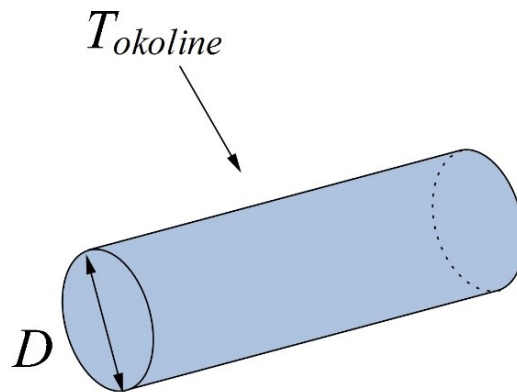
Slika 4.4 Šematski prikaz geometrije i parametara konvekcionijskih korelacija za prirodnu konvekciju sa ravne površine pod nagibom

Korelacije koje se koriste u ovom slučaju su slične kao i za vertikalnu površinu sa tom razlikom da uključuju i ugao nagiba posmatrane površine φ . Za ugao između posmatrane površine i vertikalne ose $\varphi = 0$ te korelacije postaju iste kao i u jednačini (4.4):

$$h = \begin{cases} \frac{\lambda}{l} \cdot \left(0,68 + \frac{0,67 \left(\cos \varphi R_a^{\frac{1}{4}} \right)}{\left(1 + \left(\frac{0,492\lambda}{\nu c} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{4}{9}}} \right) & \text{ako je } R_a \leq 10^9 \\ \frac{\lambda}{l} \cdot \left(0,825 + \frac{0,387 R_a^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0,492\lambda}{\nu c} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 & \text{ako je } R_a > 10^9, \end{cases} \quad (4.5)$$

Ove korelacije su validne za nagibe površina od $-60^\circ < \varphi < 60^\circ$ i $10^4 \leq R_a \leq 10^{13}$.

4.2.4. Prirodna konvekcija – horizontalne cilindrične površine

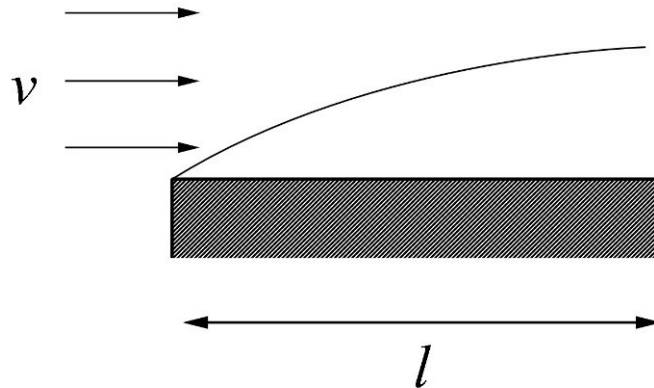


Slika 4.5 Šematski prikaz geometrije i parametara konvekcioni korelacija za prirodnu konvekciju sa dugačke horizontalne cilindrične površine

Sledeće korelacije su validne za $R_a \leq 10^{12}$. D predstavlja prečnik cilindrične površine.

$$h = \frac{\lambda}{D} \left(0,6 + \frac{0,387 R_a^{\frac{1}{4}}}{\left(1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2. \quad (4.6)$$

4.2.5. Prinudna konvekcija – horizontalna ravan



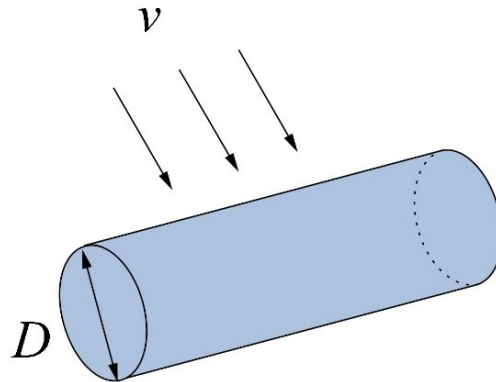
Slika 4.6 Šematski prikaz geometrije i parametara konvepcionih korelacija za prinudnu konvekciju sa gornje strane ravne horizontalne površine

Korelacija koja se koristi u ovom slučaju je:

$$h = \begin{cases} 2 \frac{\lambda}{l} \cdot \frac{0,3387 P_r^{\frac{1}{3}} R_e^{\frac{1}{2}}}{\left(1 + \left(\frac{0,0468}{P_r}\right)^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{1}{4}}} & \text{ako je } R_e \leq 5 \cdot 10^5 \\ 2 \frac{\lambda}{l} P_r^{\frac{1}{3}} \left(0,037 R_e^{\frac{4}{5}} - 871\right) & \text{ako je } R_e > 5 \cdot 10^5 \end{cases}, \quad (4.7)$$

gde je $P_r = v/a$ i $R_e = vl/\nu$. Dužina posmatrane površine l i brzina strujanja fluida v predstavljaju ulazne podatke u korelacijama.

4.2.6. Prinudna konvekcija – horizontalna cilindrična površina



Slika 4.7 Šematski prikaz geometrije i parametara konvektionih korelacija za prinudnu konvekciju sa horizontalne cilindrične površine

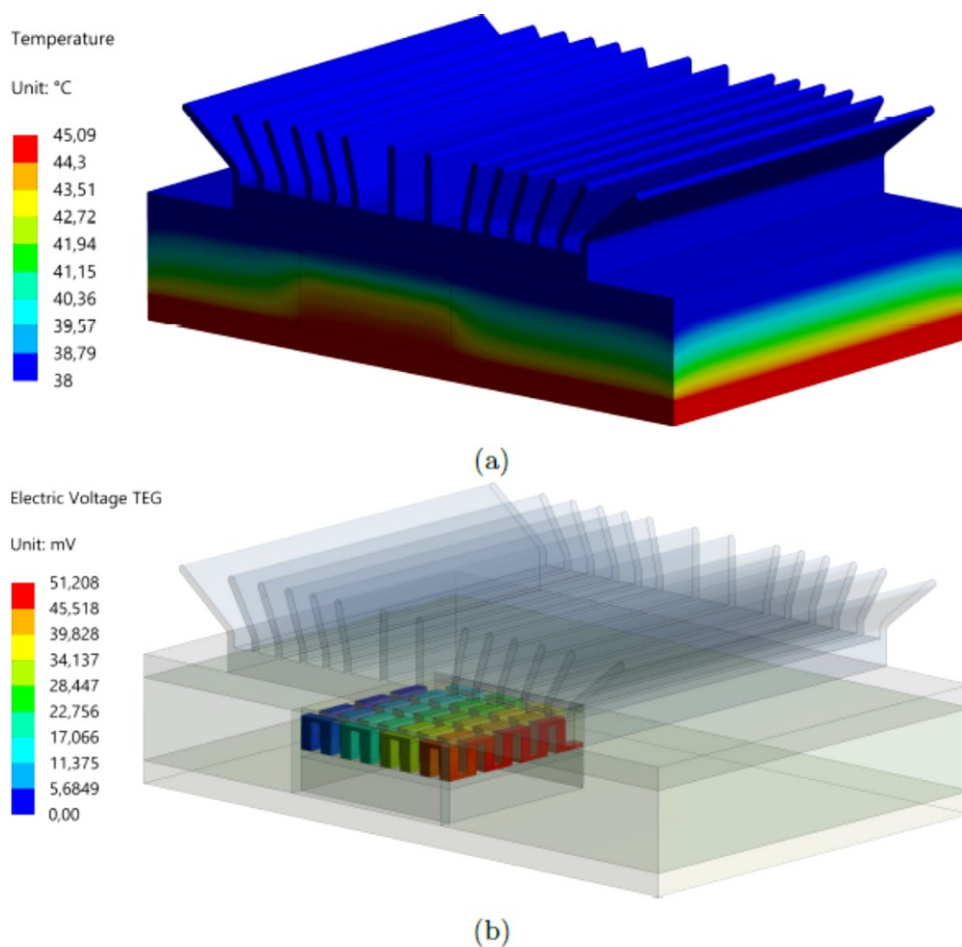
Korelacija koja se koristi u ovom slučaju je:

$$h = \frac{\lambda}{D} \left(0,3 + \frac{0,62 R_e^{\frac{1}{2}} P_r^{\frac{1}{3}}}{\left(1 + \left(\frac{0,4}{P_r} \right)^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{1}{4}}} \cdot \left(1 + \left(\frac{R_e}{282000} \right)^{\frac{5}{8}} \right)^{\frac{4}{5}} \right) \text{ ako je } R_e P_r \leq 0,2, \quad (4.8)$$

gde su $P_r = v/a$ i $R_e = vD/\nu$. Prečnik cilindrične površine D i brzina strujanja fluida v predstavljaju ulazne parametre u korelaciji.

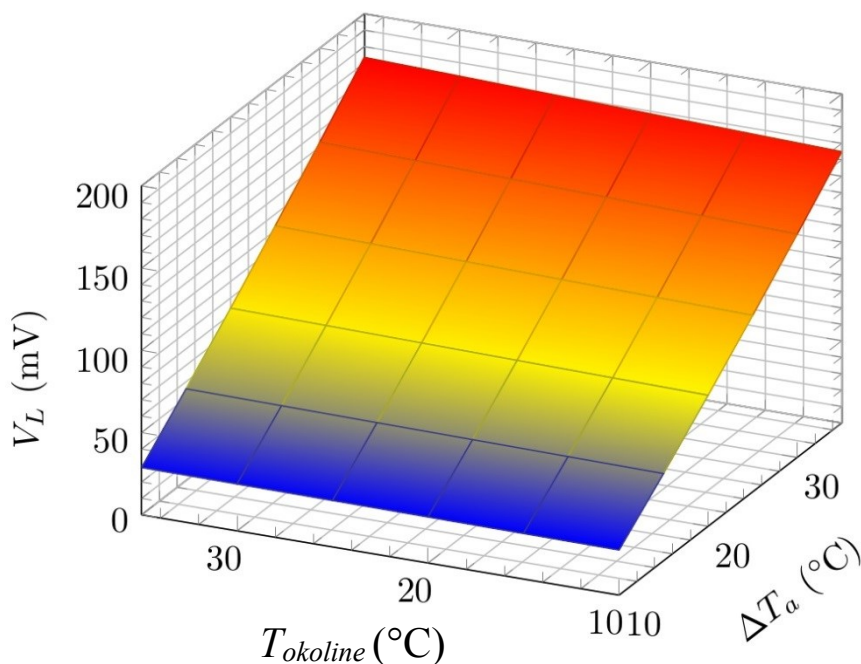
4.3. Prirodna konvekcija – rezultati i diskusija

U prvom slučaju ispitivan je uticaj promene temperature okoline na vrednost napona na potrošaču bez prisustva strujanja vazduha. Kao i u prethodnim analizama, izvor toplote simuliran je zadavanjem konstantne temperature na donjoj ploči WSN čvora T_{topla} , dok je temperatura okoline $T_{okoline}$ menjana u opsegu od 10-35°C. Rezultate simulacije za navedene T_{topla} , $T_{okoline}$ i I_L prikazuje Slika 4.8.



Slika 4.8 Slobodna konvekcija: Raspodela temperature (a) i električnog potencijala (b) za TEG5 unutar WSN čvora pri $T_{topla} = 45^{\circ}\text{C}$, $T_{okoline} = 30^{\circ}\text{C}$ i $I_L = 12\text{mA}$

Zbog sličnosti materijala PCB-a i hladnjaka, koeficijenti prenosa toplote sa njihovih slobodnih površina imaju skoro istu zavisnost od temperature tankog filma T_f . Sa druge strane, vrednosti ovih koeficijenata značajno zavise od karakterističnih dimenzija različitih površina PCB-a i hladnjaka. Zavisnost napona na potrošaču V_L od temperature okoline i temperaturne razlike ΔT_a za WSN čvor sa TEG5 prikazuje Slika 4.9 dok se kvalitativno slični rezultati dobijaju i za ostala dva TEG-a.



Slika 4.9 Zavisnost napona na potrošaču V_L od temperature okoline i temperaturne razlike ΔT_a za WSN čvor sa TEG5 pri uslovima slobodne konvekcije; $I_L=12\text{mA}$

Sa grafika se može uočiti da promena temperature okoline vrlo slabo utiče na promenu napona na potrošaču (relativna promena je $\approx 5\%$ u posmatranom opsegu). Ovo je posledica toga što napon V_L prvenstveno zavisi od temperaturne razlike između tople i hladne strane TEG-a, a ne od temperature okoline. Sa druge strane, zavisnost od ΔT_a je izraženija i približno linearna. Za uslov otvorenog kola ($I_L = 0$) generisani napon V_G može se dovesti u korelaciju sa ΔT_a kao:

$$V_G \approx \bar{\gamma} \Delta T_a, \quad (4.9)$$

gde je $\bar{\gamma}$ prosečni faktor proporcionalnosti u posmatranom temperaturnom opsegu. Na osnovu električnog kola prikazanog na Slici 2.15 i jednačine (2.13) napon na potrošaču je:

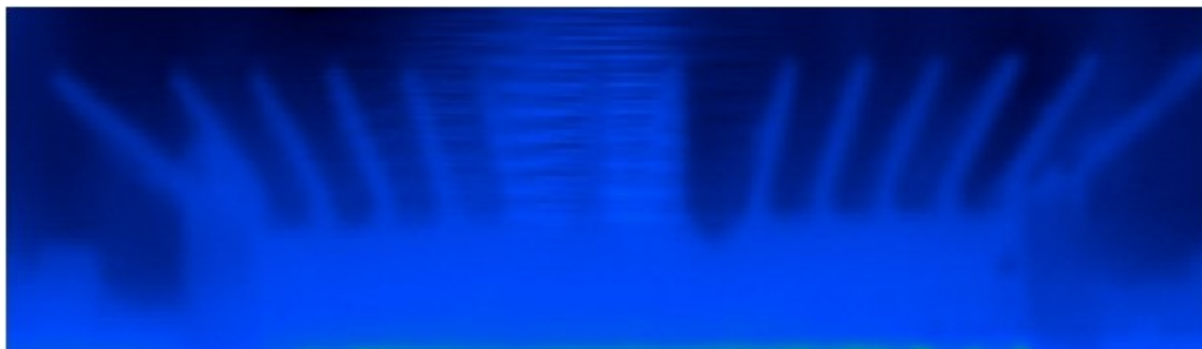
$$V_L \approx \bar{\gamma} \Delta T_a - R_{TEG} I_L. \quad (4.10)$$

Za posmatrani opseg temperatura, može se zanemariti temperaturna zavisnost specifične električne otpornosti ρ i koristiti konstantne vrednosti R_{TEG} date u Tabeli 2.2. Time je moguće analitički izračunati napon na potrošaču sa zadovoljavajućim odstupanjem. Na primer, za poznatu vrednost struje I_L i koeficijenta $\bar{\gamma}$ određenog bilo merenjem ili simulacijom, napon V_L se može predvideti korišćenjem jednačine (4.10). Konkretno, za TEG5

unutar WSN čvora, određena je vrednost za $\bar{\gamma}=5,1$ mV/°C. Koristeći vrednost za struju $I_L=12$ mA, aproksimativna vrednost napona V_L izračunata prema jednačini (4.10) odstupa od one dobijene simulacijom maksimalno 10%.

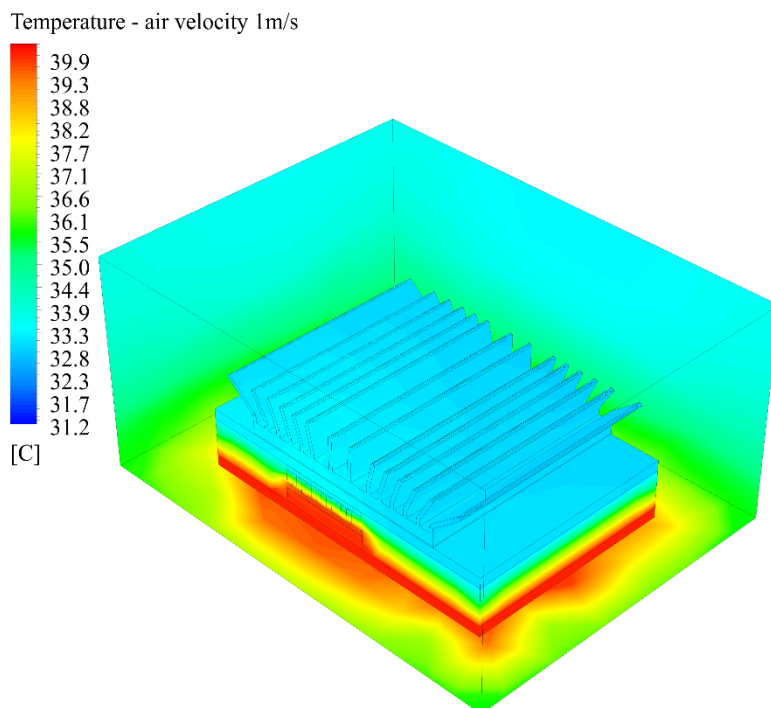
4.4. Prinudna konvekcija – rezultati i diskusija

U drugom slučaju je pored promenljivih parametara T_{topla} i $T_{okoline}$ simuliran i protok vazduha, gde je brzina vazduha menjana u opsegu od 0,5m/s do 3m/s (povetarac). Uvedena je pretpostavka da vazduh protiče duž paralelnih ploča peraja hladnjaka kao što je prikazano na Slici 4.10.

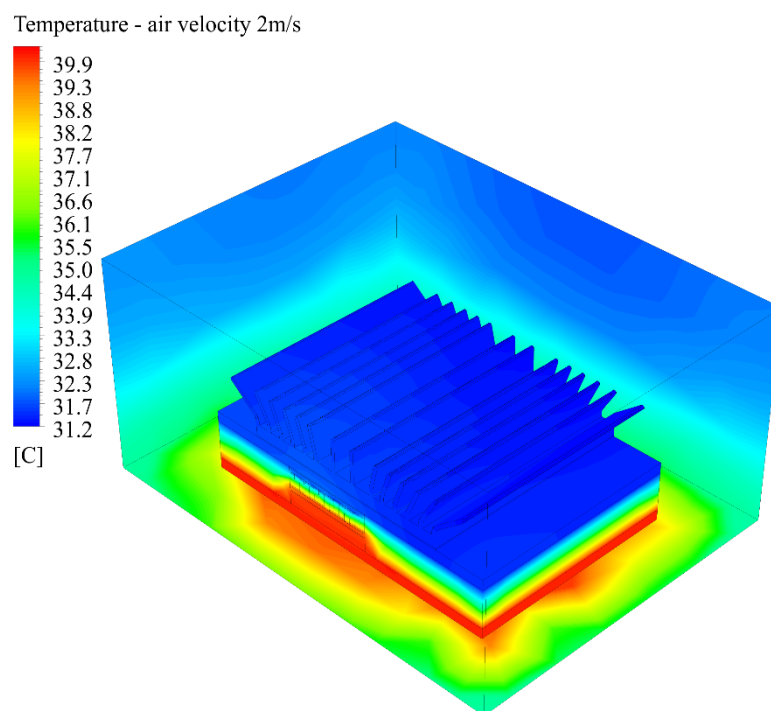


Slika 4.10 Termalna slika koja prikazuje hladnjak i gornju PCB ploču pod uticajem strujanja vazduha

Uticaj brzine strujanja vazduha na raspodelu temperature unutar bežičnog senzorskog čvora analiziran je komparativnim prikazom rezultata simulacije kroz modul CFD – Post procesing koji se nalazi u okviru softverskog paketa ANSYS. Ovaj modul predstavlja savremen korisnički interfejs koji omogućava istovremeno učitavanje više rezultata simulacije sa ciljem upoređivanja ponašanja sistema pri različitim uslovima rada. Rezultati se mogu prikazivati sinhronizovano ili preko razlike odgovarajućih vrednosti (npr. *Temperature Difference*). Rezultate simulacije za dve brzine stujanja vazduha pri $T_{topla} = 40^{\circ}\text{C}$, $T_{okoline} = 25^{\circ}\text{C}$ i $I_L=12$ mA korišćenjem sinhronizovanog i diferencijalnog prikaza daju Slike 4.11 i 4.12.

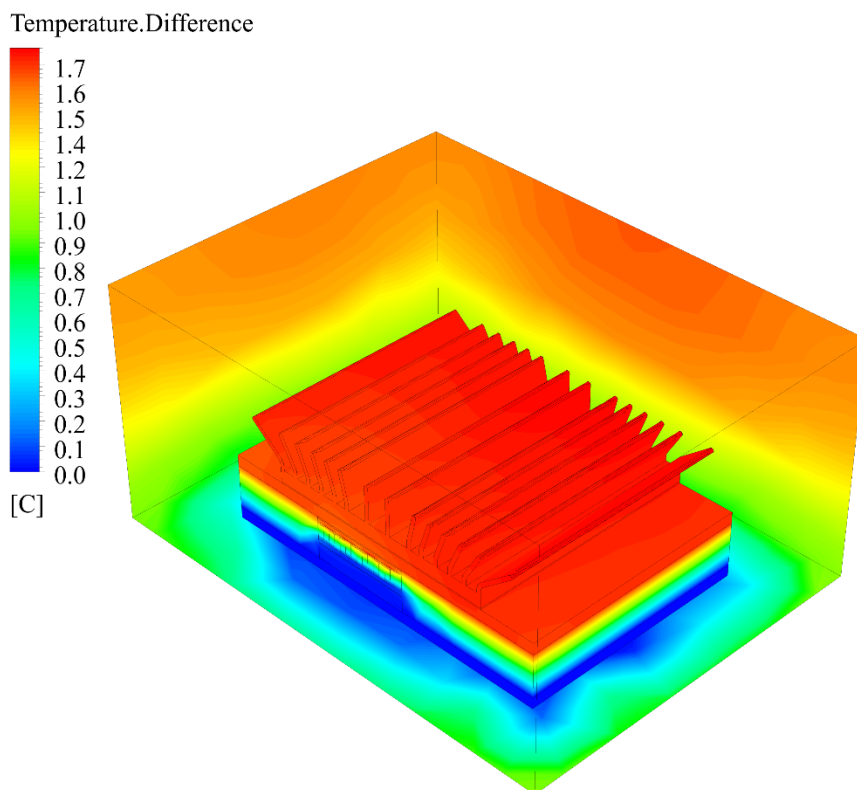


(a)



(b)

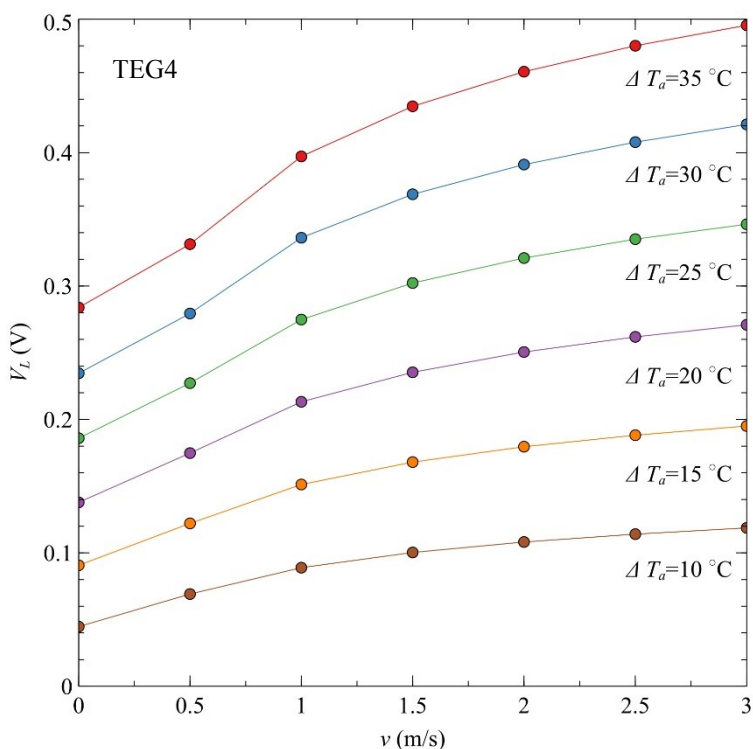
Slika 4.11 Prinudna konvekcija: Sinhronizovani prikaz raspodele temperatura za dva posmatrana slučaja pri brzinama strujanja vazduha od (a) 1m/s i (b) 2m/s za TEG5 unutar WSN čvora pri $T_{topla} = 40^{\circ}\text{C}$, $T_{okoline} = 25^{\circ}\text{C}$ i $I_L = 12\text{mA}$



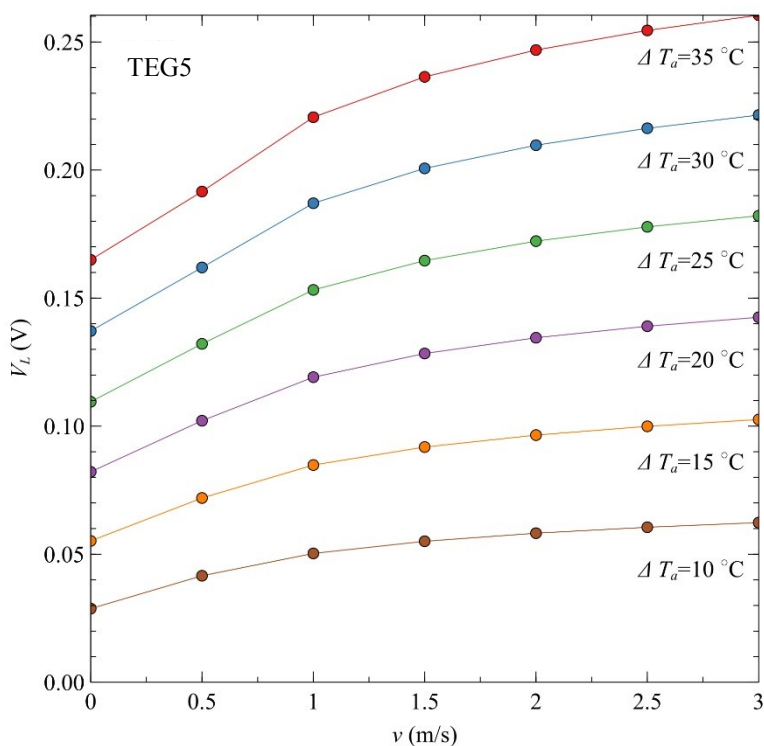
Slika 4.12 Temperaturna razlika za dva posmatrana slučaja pri brzinama strujanja vazduha od 1m/s i 2m/s za TEG5 unutar WSN čvora pri $T_{topla} = 40^{\circ}\text{C}$, $T_{okoline} = 25^{\circ}\text{C}$ i $I_L = 12\text{mA}$

Razlike između dva rezultata mogu se analizirati kako kvalitativno, tako i kvantitativno. Sa Slike 4.12 se može uočiti da je usled povećanja brzine strujanja vazduha od 1m/s na 2m/s povećana i temperaturna razlika na TEG-u ($\Delta T = T_{topla} - T_{hladna}$) za $1,7^{\circ}\text{C}$ što direktno utiče na povećanje napona na potrošaču V_L .

Dobijene zavisnosti napona na potrošaču od brzine strujanja vazduha za WSN čvor sa TEG4 i TEG5 prikazane su na Slikama 4.13 i 4.14, pokazujući očekivano povećanje napona V_L usled prinudne konvekcije.



Slika 4.13 Prinudna konvekcija: Zavisnost napona na potrošaču od brzine strujanja vazduha za WSN čvor sa TEG4; $T_{topla} = 45^\circ\text{C}$, $I_L = 12\text{mA}$



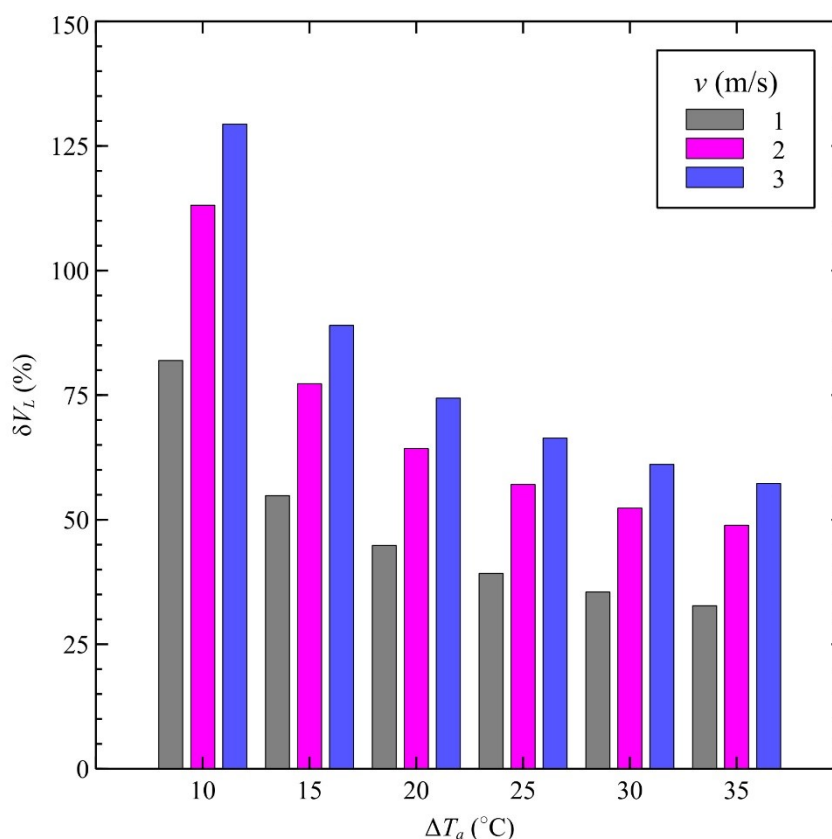
Slika 4.14 Prinudna konvekcija: Zavisnost napona na potrošaču od brzine strujanja vazduha za WSN čvor sa TEG5; $T_{topla} = 45^\circ\text{C}$, $I_L = 12\text{mA}$

Kvalitativno, ove zavisnosti su veoma slične, dok su kvantitativno vrednosti napona na potrošaču veće za TEG4 u odnosu na TEG5, prvenstveno zbog toga što TEG 4 ima veći broj termoparova (71). Rezultati dobijeni za TEG6 su vrlo blizu rezultata dobijenih za TEG5, zahvaljujući činjenici da ova dva TEG-a imaju slične karakteristične parametre, što se vidi iz Tabele 2.2

Podaci sa Slike 4.14 mogu se preurediti i iskoristiti za bolju analizu relativne promene napona na potrošaču za slučaj prinudne i prirodne konvekcije, to jest:

$$\delta V_L = \frac{V_{L(v)} - V_{L(0)}}{V_{L(0)}} \cdot 100(\%), \quad (4.11)$$

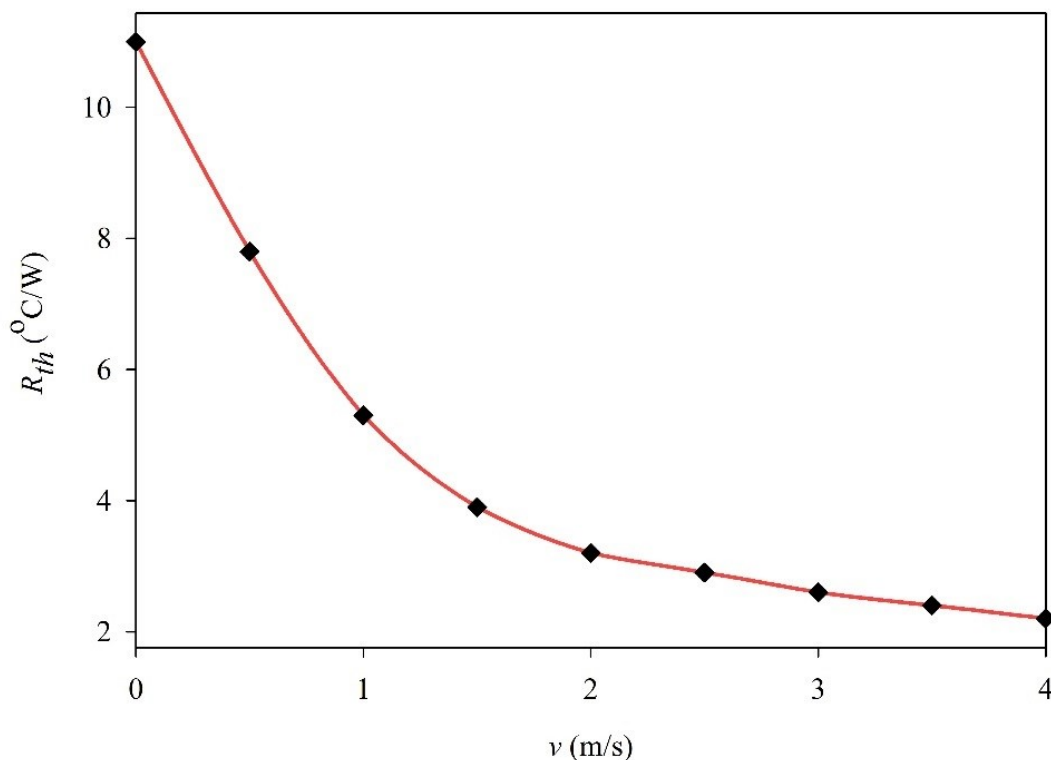
gde su $V_{L(v)}$ i $V_{L(0)}$ naponi na potrošaču dobijeni za prinudnu i prirodnu konvekciju ($v = 0\text{m/s}$), respektivno. Kao što prikazuje Slika 4.15, povećanje napona na potrošaču izraženije je za niže vrednosti ΔT_a .



Slika 4.15 Relativna promena napona na potrošaču pri prinudnoj konvekciji u odnosu na prirodnu konvekciju u zavisnosti od temperaturne razlike ΔT_a za WSN čvor sa TEG5; $T_{topla} = 45^\circ\text{C}$, $I_L = 12\text{mA}$

Sa Slika 4.14 i 4.15 se vidi da za određenu vrednost ΔT_a , strujanje vazduha ima najveći doprinos pri brzinama do 1m/s, dok pri većim brzinama δV_L ulazi u zasićenje. Ovo je

prvenstveno zbog toga što termička otpornost hladnjaka R_{th} strmije opada za vrednosti brzine strujanja vazduha do 1m/s nego za veće, kao što se može videti sa karakteristike hladnjaka preuzete iz tehničke specifikacije (Slika 4.16) [66].



Slika 4.16 Zavisnost termičke otpornosti R_{th} od brzine strujanja vazduha v za hladnjak ATS-50350B-C2-R0

Poređenje rezultata dobijenih simulacijom i eksperimentalnim putem predstavljeno je u Tabeli 4.2. Iz tabele se vidi da se simulacijom dobijaju nešto više vrednosti napona V_L .

Tabela 4.2 Uporedni rezultati dobijeni simulacijom i eksperimentom za WSN čvor sa TEG5 ($\Delta T_a = 18^\circ\text{C}$, $I_L = 12\text{mA}$)

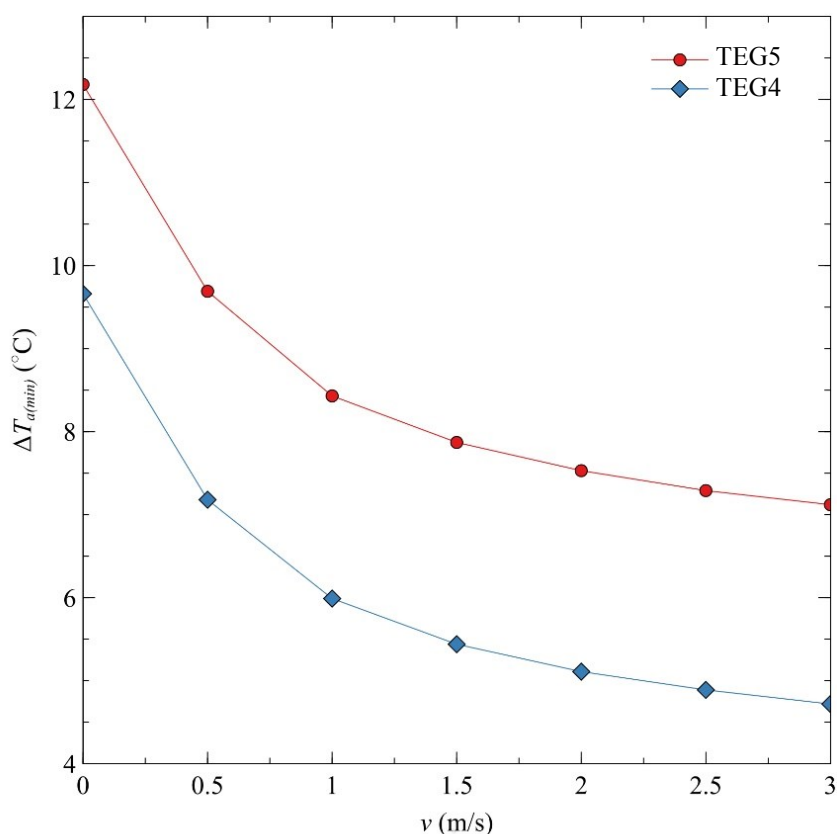
$v(\text{m/s})$		0	1,25	2,5
$V_L(\text{mV})$	simulacija	75	110	122
	eksperiment	70	100	110

Razlog tome je što simulacija ne uzima u obzir površinsku hrapavost materijala kao i nepotpunu ispunjenost prostora između PCB ploča termički izolatorskom penom. Takođe, simulacija ne uračunava ni uticaj struja curenja koje se neizbežno javljaju u realnom kolu.

Za praktičnu primenu interesantno je poznavati zavisnost minimalne temperaturne razlike $\Delta T_{a(min)}$ potrebne za napajanje WSN čvora pri fiksnim uslovima opterećenja. Ova zavisnost prikazana je na Slici 4.17. Kao što se sa slike vidi, $\Delta T_{a(min)}$ se smanjuje sa porastom brzine strujanja vazduha v i kvalitativno prati zavisnost termičke otpornosti hladnjaka R_{th} od brzine v :

$$\Delta T_{a(min)}(v) \propto R_{th}(v). \quad (4.12)$$

Iako proizvođači hladnjaka u svojim specifikacijama daju zavisnost termičke otpornosti R_{th} od brzine strujanja v , faktor proporcionalnosti iz jednačine (4.12) ne može se izračunati analitički zbog toga što on takođe zavisi i od karakterističnih parametara TEG-a (Tabela 2.2). Takođe se i gornja PCB ploča ponaša kao produžetak osnove hladnjaka, što dovodi do odstupanja od specificirane zavisnosti $R_{th}(v)$. Na kraju, R_{th} se može posmatrati i kao deo ukupne termičke otpornosti WSN čvora, koja zavisi od mnogih fizičkih i geometrijskih parametara.



Slika 4.17 Minimalna temperaturna razlika ΔT_a potrebna za dobijanje napona $V_L = 40\text{mV}$ pri $T_{okoline} = 30^\circ\text{C}$ i $I_L = 12\text{mA}$ za WSN čvor sa TEG4 i TEG5



Analiza sa Slike 4.17 pokazuje da će minimalna temperaturna razlika $\Delta T_{a(min)}$ potrebna za stabilan rad WSN čvorova sa TEG4 i TEG5 pri brzini strujanja vazduha od 1m/s biti smanjena za približno jednu trećinu u odnosu na vrednost kada je $v = 0$ m/s. Dobijeni podaci imaju praktičan značaj jer pokazuju ponašanje WSN čvora u uslovima koji se najčešće javljaju u stvarnom radnom okruženju.

5. SPICE KOMPATIBILNI MODEL WSN ČVORA ZA STACIONARNI REŽIM RADA

Kao što je opisano u potpoglavlju 2.5 unutar materijala od kojih su napravljeni termoelementi TEG-a odvijaju se različiti termoelektrični procesi kada su izloženi temperaturnoj razlici. Takođe, veliki uticaj na efikasnost samog TEG-a unutar WSN čvora imaju i ostale elektronske komponente koje svojim prisustvom i termičkim karakteristikama (kondukcija i konvekcija) bitno utiču na rad celog sistema. U ovom poglavlju biće opisan metod projektovanja električnog SPICE kompatibilnog modela sa koncentrisanim parametrima za stacionarni režim rada sa ciljem dodatne karakterizacije i ispitivanja pojedinih termoelektričnih efekata unutar odabranih TEG-ova. WSN čvor sa izabranim TEG-om unutar njega (TEG2, TEG4 ili TEG6), biće predstavljen međusobno interagujućim električnim i ekvivalentnim termičkim kolima i modelovan u simulatoru električnog kola. Na kraju, upoređiće se rezultati dobijeni ovim modelom sa rezultatima dobijenim multifizičkim 3D numeričkim simulacijama i eksperimentom.

5.1. Ekvivalentni elektro-termički model TEG-a

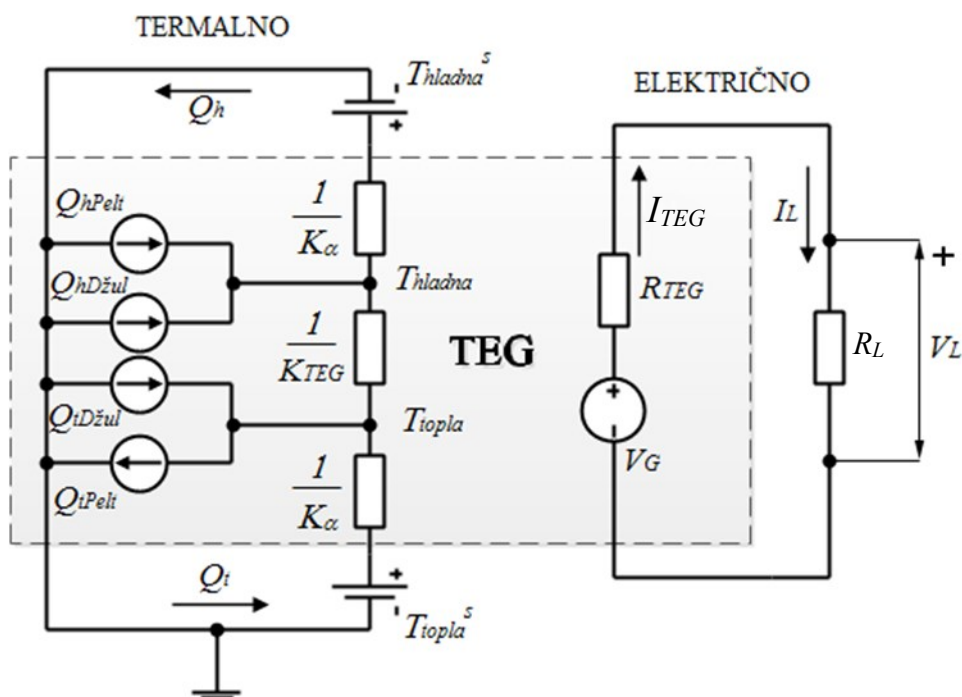
Na osnovu opisa analitičkog modela TEG-a datom u Potpoglavlju 2.6 i analogije između veličina karakterističnih za električni i termički domen datim u Tabeli 5.1, može se formirati ekvivalentno elektro-termičko kolo TEG-a (Slika 5.1) [23]. Interakcija između dva domena uspostavljena je primenom naponsko/strujno kontrolisanih generatora (V_G , Q_{tPelt} , Q_{hPelt} , $Q_{tDžul}$, $Q_{hDžul}$).

Tabela 5.1 Analogija između električnih i termičkih veličina [67]

Električna veličina	Napon $V(V)$	Struja $I(A)$	Otpornost $R(\Omega)$	Kapacitet $C(F)$
Termička veličina	Apsolutna temperatura $T(K)$	Toplotni fluks $Q(W)$	Termička otpornost $R_{th}(^{\circ}C/W)$	Toplotni kapacitet $C_{th}(J/^{\circ}C)$

Kada se potrošač otpornosti R_L priključi na TEG formira se električno kolo kroz koje protiče struja I_L data relacijom:

$$I_L = I_{TEG} = \frac{V_G}{R_L + R_{TEG}}. \quad (5.1)$$



Slika 5.1 Ekvivalentni elektrotermički model TEG-a sa potrošačem i primenjenom temperaturnom razlikom

Ova struja teče kroz termoelektrične elemente i dovodi do pojave Peltijevog i Džulovog efekta. Peltijev efekat uzrokuje apsorpciju toplote na hladnoj strani elemenata koja se može opisati toplotnim fluksom Q_{hPelt} i odavanje toplote na toploj strani definisano toplotnim fluksom Q_{iPelt} :

$$Q_{hPelt} = N\alpha_{pn}T_{hladna}I_{TEG}, \quad (5.2)$$

$$Q_{iPelt} = N\alpha_{pn}T_{topla}I_{TEG}. \quad (5.3)$$

Uticaj Džulovog efekta je takav da se oslobođena toplotna energija apsorbuje i na toploj i na hladnoj strani termoelektričnih elemenata:

$$Q_{hDzul} = Q_{iDzul} = \frac{R_{TEG}I_{TEG}^2}{2} = \frac{V_{RTEG}I_{TEG}}{2} \quad (5.4)$$

Provođenje toplote kroz sve termoelektrične elemente od tople ka hladnoj strani može se odrediti pomoću Furieovog zakona:

$$Q = K_{TEG}(T_{topla} - T_{hladna}), \quad (5.5)$$

gde K_{TEG} predstavlja termičku provodnost svih termoelemenata unutar TEG-a i opisana je relacijom (2.10).

Uzimajući u obzir sve gore navedene efekte, ukupni toplotni fluks apsorbovan na toploj strani Q_t i predat okolini na hladnoj strani Q_h svih elemenata TEG-a, mogu se izraziti kao:

$$Q_t = N\alpha_{pn}T_{topla}I_{TEG} + K_{TEG}(T_{topla}-T_{hladna}) - \frac{V_{RTEG}I_{TEG}}{2}, \quad (5.6)$$

$$Q_h = N\alpha_{pn}T_{hladna}I_{TEG} + K_{TEG}(T_{topla}-T_{hladna}) + \frac{V_{RTEG}I_{TEG}}{2}. \quad (5.7)$$

Ovi toplotni fluksevi takođe prolaze i kroz keramičke ploče TEG-a i prema Furieovom zakonu mogu se predstaviti izrazima:

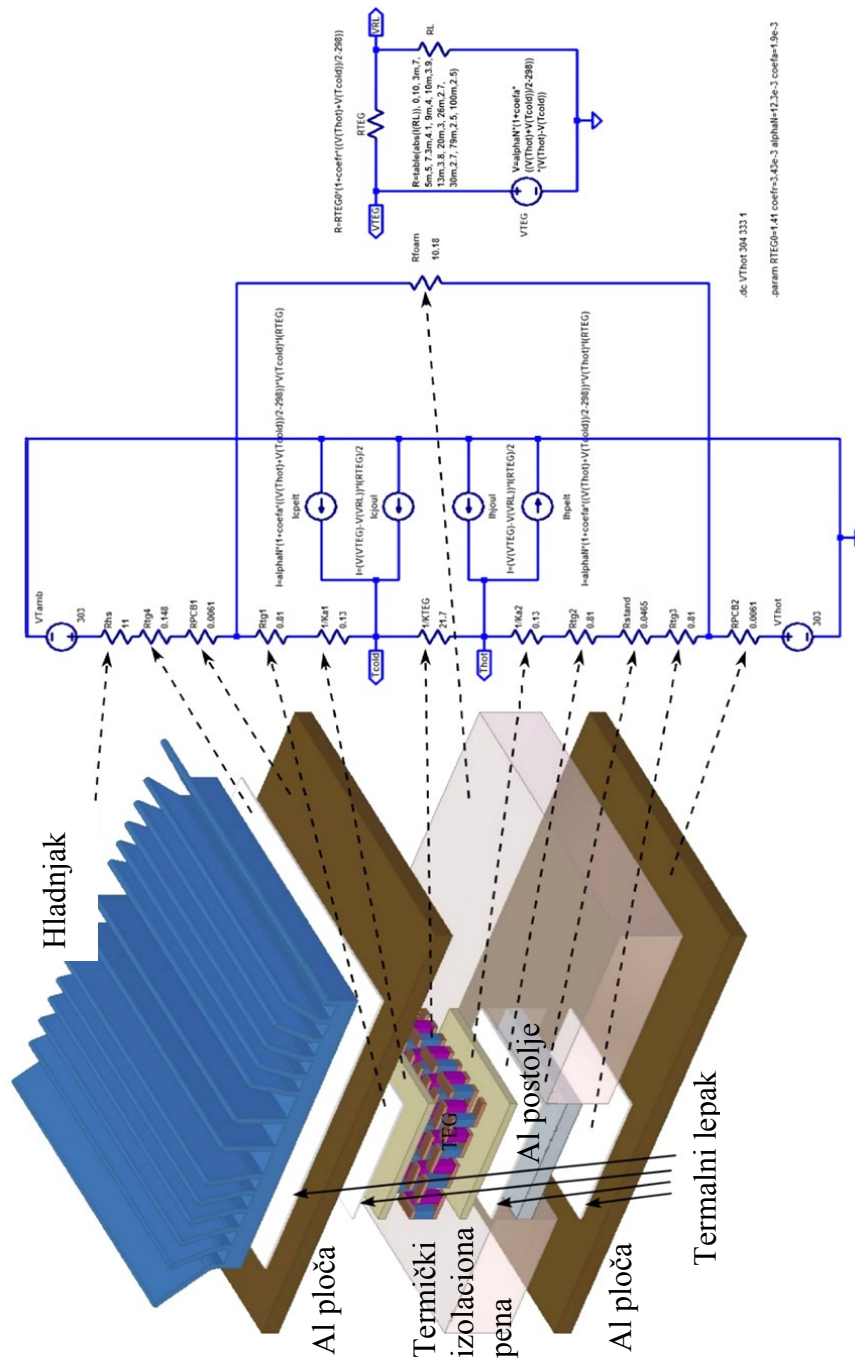
$$Q_t = K_a(T_{topla}^s - T_{topla}), \quad (5.8)$$

$$Q_h = K_a(T_{hladna} - T_{hladna}^s), \quad (5.9)$$

gde T_{topla}^s i T_{hladna}^s predstavljaju temperature na spoljnim stranama TEG-a (topla i hladna strana respektivno), a K_a termičku provodnost keramičkih ploča opisanu relacijom (2.9).

5.2. Modeliranje WSN čvora u LTSpice

Kompatibilni model WSN čvora za stacionarni režim rada projektovan je na osnovu elektro-termičkog modela TEG-a (Slika 5.1) korišćenjem simulatora električnih kola LTSpice [68]. Odgovarajući elementi termoelektričnog modela dati su na Slici 5.2.



Slika 5.2 Delovi WSN čvora predstavljeni odgovarajućim elementima u ekvivalentnom elektro-termičkom modelu

Svi dodati elementi WSN čvora predstavljeni su ekvivalentnim termičkim otpornostima i povezani na odgovarajućim mestima u kolu. Naponski generator V_{Thot} predstavlja temperaturu primenjenog toplotnog izvora a $V_{T_{amb}}$ temperaturu okoline. Naponski izvodi $Thot$ i T_{cold} predstavljaju temperature na toploj i hladnoj strani TEG-a. Dimenzije i termičke karakteristike elemenata WSN čvora (aluminijumske ploče, postolja, termoizolacione pene, termalnog lepka i hladnjaka) dati su u Tabeli 5.2. Vrednost termičke otpornosti svakog elementa određena je njegovom debljinom h_x i površinom poprečnog preseka A_x , kao i termičkom provodljivošću materijala od koga je napravljen λ_x :

$$R_{tx} = \frac{l}{K_{tx}} = \frac{h_x}{\lambda_x A_x}. \quad (5.10)$$

Pena ima nisku termičku provodljivost λ_{pena} i predstavlja veliku termičku otpornost na putu protoka toplote između aluminijumskih ploča:

$$R_{pena} = \frac{l}{K_{pena}} = \frac{h_{pena}}{\lambda_{pena}(A_{PCB} - A_{TEG})}. \quad (5.11)$$

Vrednost ove termičke otpornosti je najkritičniji parametar za tačnost modela jer predstavlja povratnu spregu u električnom kolu. Termička otpornost izolacione pene predstavljena u Tabeli 5.2 uključuje i nepotpunu popunjenost prostora između štampanih ploča kao i disipaciju toplote elektronskih komponenata [55].

Tabela 5.2 Dimenzije i termičke karakteristike elemenata WSN čvora

<u>Karakteristike</u>	Element				
	Al ploča (PCB)	Postolje	Termalni lepak	Termoizol. pena	Hladnjak
Termička provodljivost λ_x (W/m°C)	153	153	1,1	0,4	209
Debljina elementa h_x (mm)	1,7	1,6	0,2	6,5	7,5 (rebra)
Površina poprečnog preseka A_x (mm²)	1820	225	225/1225	1595	35×35 (osnova)
Termička otpornost R_{tx} (°C /W)	$6,10 \cdot 10^{-3}$	0,0465	0,81/0,148	10,18	11

Naponsko kontrolisani naponski generator V_{TEG} predstavlja generisani Zibekov napon V_G dat relacijom (2.7), gde je u vrednost Zibekovog koeficijenta uračunata i njegova

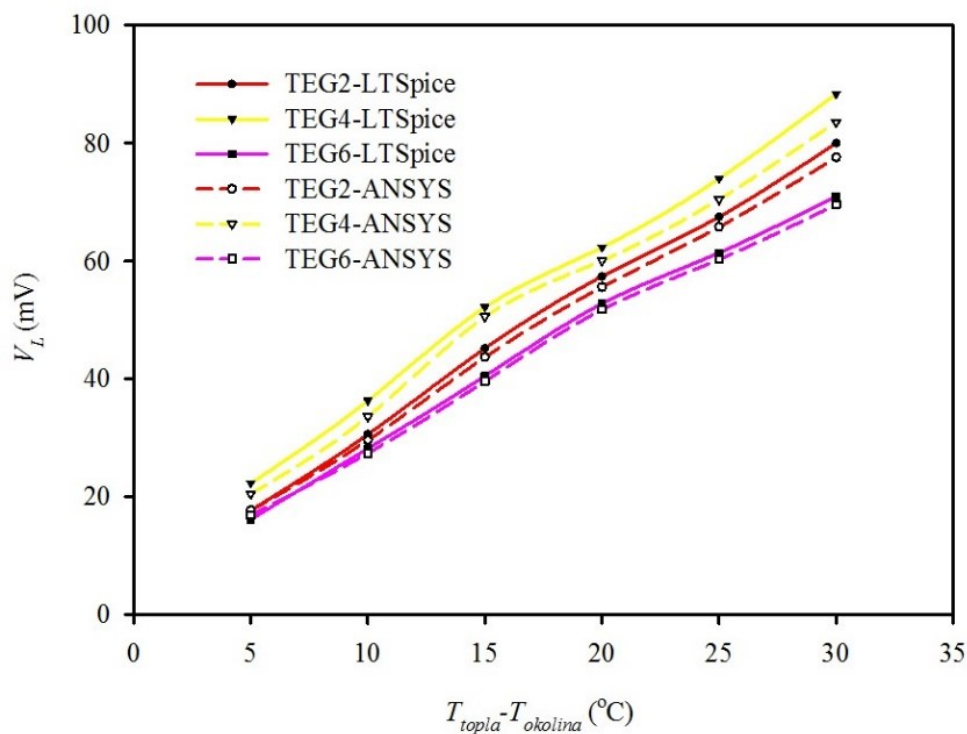
temperaturna zavisnost. Takođe je pri proračunu unutrašnje otpornosti TEG-a (R_{TEG}) uzeta u obzir njena temperaturna zavisnost. Vrednosti ovih parametara izračunate su za srednju vrednost temperature TEG-a ($(T_{topla} + T_{hladna})/2$) sa referentnom temperaturom od 25°C (298K).

Potrošač u kolu R_L predstavlja ulazna otpornost LTC3108 kola i to u režimu rada kada puni primarne i sekundarne (*backup*) kondenzatore [56]. Ova vrednost kreće se u opsegu od $2,5\Omega$ do 6Ω u zavisnosti od vrednosti struje opterećenja. Ponašanje ove otpornosti u kolu je modelovano pomoću tabele pretraživanja sa lineranom interpolacijom.

Uticao Peltijevog efekta predstavljen je kontrolisanim strujnim generatorima I_{hpelt} i I_{tpelt} sa vrednostima toplotnog fluksa opisanim u relacijama (5.2) i (5.3), uključujući i temperaturno zavisni Zibekov koeficijent. Doprinos Džulovog efekta definisanog relacijom (5.4) modelovan je kontrolisanim strujnim generatorima I_{hdzul} i I_{tdzul} .

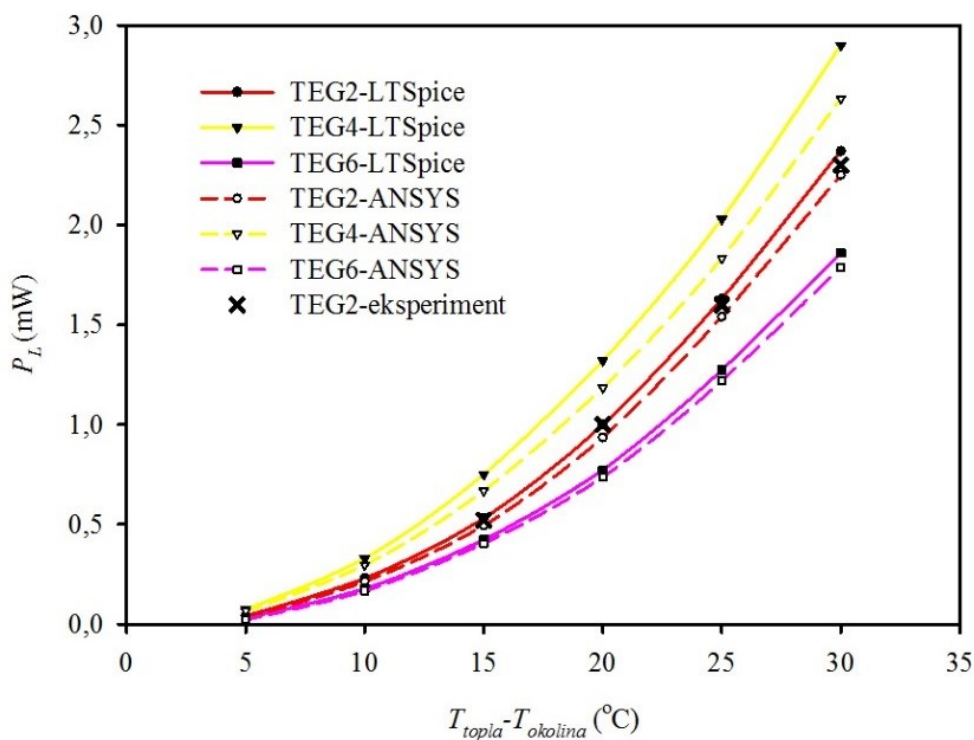
5.3. Rezultati simulacije

Posmatrani parametri su isti kao i prilikom simulacije u numeričkom simulatoru ANSYS, napon na potrošaču V_L i snaga preneti potrošaču P_L . Simulacije su izvršene za tri odabrana TEG-a (TEG2, TEG4 i TEG6). TEG2 je izabran iz grupe TEG-ova sa sličnim karakteristikama, TEG4 je sa većim brojem termoparova i najvećom površinom dok je TEG6 najmanjih dimenzija (Tabela 2.2). Vrednosti napona na potrošaču u zavisnosti od temperaturne razlike između tople strane WSN čvora i okoline za ova tri TEG-a prikazuje Slika 5.3. Na ovoj slici su takođe prikazani i uporedni rezultati dobijeni simulacijama u ANSYS-u za ova tri TEG-a.



Slika 5.3 Zavisnost napona na potrošaču V_L od temperaturne razlike između tople strane i okoline za posmatrane TEG-ove (LTSpice - puna linija, ANSYS - isprekidana linija)

Na sličan način, Slika 5.4 prikazuje zavisnosti snage na potrošaču od temperaturne razlike između tople strane WSN čvora i okoline za sva tri TEG-a, sa tom razlikom da su pored uporednih rezultata dobijenih numeričkom simulacijom u ANSYS-u dodati i rezultati dobijeni eksperimentalnim putem za TEG2.

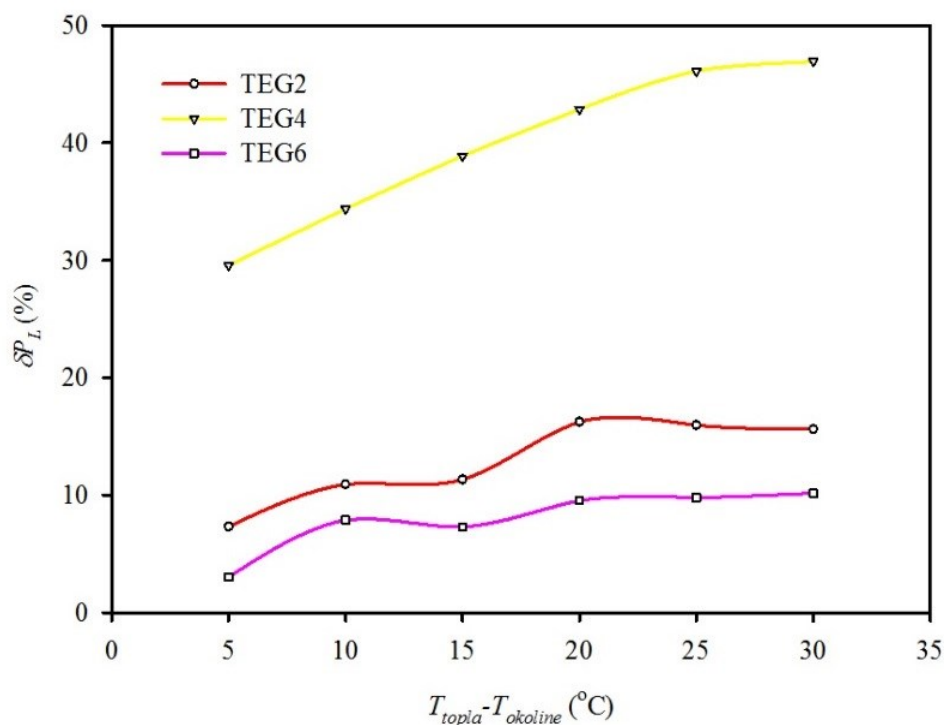


Slika 5.4 Zavisnost snage na potrošaču P_L od temperaturne razlike između tople strane WSN čvora i okoline za posmatrane TEG-ove (LTSpice - puna linija, ANSYS - isprekidana linija i eksperimentalni rezultati za TEG2)

Sa grafika se vidi da postoje određene razlike u rezultatima dobijenim primenom ova dva metoda. LTSpice daje nešto veće vrednosti za napon i snagu na potrošaču. Takođe, može se primetiti da su odstupanja izraženija za veće temperaturne razlike kao i kod TEG-ova sa većim brojem termoparova, odnosno većom površinom. Ovo je očekivano s obzirom na to da ANSYS uključuje i neke dodatne fenomene kao što su unutrašnja električna otpornost kontakata i konvekciju sa svih spoljašnjih površina čvora ka okolini. Iako postoje razlike one nisu velike. Za napon, te razlike su manje od 6%, a za vrednosti dobijene snage manje od 10%. Upoređujući i eksperimentalne rezultate za TEG2 zapaža se da su im rezultati dobijeni pomoću simulatora LTSpice vrlo bliski. Sve ovo potvrđuje primenjivost projektovanog LTSpice modela i opravdava njegovu upotrebu za karakterizaciju različitih TEG-ova unutar WSN čvora.

5.4. Ispitivanje uticaja Džulovog i Peltijevog efekta na vrednost generisanog napona

Projektovani elektro-termički model iskorišćen je i za ispitivanje efekata koji se suprotstavljaju Zibekovom efektu i samim tim utiču na vrednost generisanog napona TEG-a. Uticaj efekta Džulovog zagrevanja analiziran je tako što su strujni generatori $I_{hdžul}$ i $I_{ldžul}$ uklonjeni iz mreže. Dobijeni rezultati su ostali nepromenjeni jer usled dejstva Džulovog efekta dolazi do jednakog zagrevanja i tople i hladne strane termoparova tako da temperaturna razlika ostaje neizmenjena. Uticaj Peltijevog efekta je nešto drugačiji. Usled delovanja ovog efekta dolazi od povećanja temperature na hladnoj strani i do smanjenja temperature na toploj strani termoparova tako da je uticaj Peltijevog efekta značajan. Slika 5.5 prikazuje uticaj Peltijevog efekta na vrednost generisane snage kroz relativnu promenu snage u zavisnosti od temperaturne razlike.



Slika 5.5 Relativna promena snage prenete potrošaču $\delta P_L(\%)$ u zavisnosti od temperaturne razlike između tople strane WSN čvora i okoline sa izostavljenim Peltijevim efektom

Sa slike je evidentno da je, u zavisnosti od temperature primenjene na toploj strani WSN čvora, ta razlika za TEG2 u granicama od 7-15%, za TEG4 od 30-50%, a za TEG6 od



3-10%. Razlika je najveća kod TEG4 s obzirom da ima najveći broj termoparova. Ovo samo potvrđuje zaključak opisan u potpoglavlju 3.4.2, da analitički model daje zadovoljavajuće rezultate samo u slučaju primene fiksne temperaturne razlike na stranama TEG-a, odnosno u slučaju kada je uticaj Peltijevog efekta minimalan.

6. ZAKLJUČAK

Ključni cilj ove disertacije jeste da pokaže da i komercijalno dostupni termoelektrični moduli (Peltijevi elementi), koji su prvenstveno namenjeni grejanju/hlađenju, mogu na adekvatan način zameniti specijalno projektovane i skupe termoelektrične generatore namenjene samonapajajućim sistemima. U istraživanje je uključeno šest komercijalnih termoelektričnih modula i jedan WSN čvor realizovan sa aluminijumskim štampanim pločama. Simulacija rada svih TEG-ova u tri različita temperaturna radna uslova urađena je upotrebom softvera za numeričko modelovanje ANSYS 18.0. Izložena istraživanja pokazuju da kada se ovi moduli koriste kao generatori za napajanje WSN čvora, na njihovu efikasnost utiče više faktora. Jedan od njih je ulazna otpornost potrošača (ulazna otpornost bloka za upravljanje energijom), a drugi veoma bitan jeste dizajn i kompaktnost WSN čvora za konkretnu primenu.

Istraživanje je potvrdilo da u slučaju razmatranja TEG-a kao samostalne komponente, (uslovi kada je TEG izložen fiksnoj temperaturnoj razlici), analitički model u poređenju sa rezultatima dobijenim simulacijom daje sasvim zadovoljavajuće rezultate (razlike su $\pm 10\%$). U ovom slučaju korišćenje i jednog i drugog modela bi bilo opravdano. Sa druge strane poređenje TEG-ova po efikasnosti pri ovakvim termičkim uslovima (u smislu najpogodnijeg), moglo bi se odrediti na osnovu parametara kao što su faktor snage PF ili kapacitet hlađenja Q_{max} , odnosno visine termopara l ili karakteristike materijala. Ovo potvrđuje značaj karakterizacije termoelektričnih modula na osnovu podataka dostupnih iz tehničkih specifikacija proizvođača, kada se koriste kao TEG-ovi, kao i neophodnost ove faze pri projektovanju samonapajajućih sistema.

Simulacija rada TEG-ova u drugom slučaju urađena je sa niskoprofilnim hladnjakom od aluminijuma postavljenim na hladnoj strani TEG-a. Rezultati simulacija pokazuju da primenjeni hladnjak ima tendenciju da minimizira razliku u performansama između posmatranih TEG-ova. Rangiranje TEG-ova u ovom slučaju moglo bi se uraditi na osnovu vrednosti faktora efikasnosti ZT ili termoelektričnih karakteristika materijala. Jednostavne pretpostavke koje podrazumeva analitički pristup u ovom slučaju nisu više održive. Za više vrednosti struje kroz potrošač analitički model daje napone i do 50% veće u odnosu na one dobijene simulacijom.

U poslednjoj fazi istraživanja rad svih šest TEG-ova simuliran je unutar kompaktnog WSN čvora realizovanog sa aluminijumskim štampanim pločama sa ciljem izbora

najpogodnijeg za primenu. Kao deo čvora koji obezbeđuje razmenu toplote sa okolinom implementiran je istovetan hladnjak kao u prethodnom slučaju. Istraživanje je pokazalo da na vrednost generisanog napona, a samim tim i snagu prenešenu potrošaču, utiču svojim temperaturnim karakteristikama i ostali elementi čvora. Razlike između posmatranih TEG-ova mnogo su izraženije u poređenju sa slučajem kada je hladnjak jedina spoljna komponenta koja utiče na efektivnu temperaturnu razliku. Rangiranje TEG-ova u ovom slučaju prati visinu elementa termopara. Ovo ukazuje na to da su kod izbora TEG-a za napajanje konkretnog WSN čvora dimenzije važnije nego termoelektrične karakteristike materijala. Razmatrana je i implementacija različitih TEG-ova sa aspekta postavljanja minimalnih vrednosti temperaturne razlike neophodne za pravilno funkcionisanje WSN čvora. Za dobijanje napona od 40mV neophodnog za stabilno funkcionisanje WSN čvora, najbolji rezultat je za TEG3 - $\Delta T_{a(min)} = 12,6$ °C.

Termovizijska snimanja raspodele temperature na odabranom TEG-u unutar WSN čvora pokazuju da su raspodele dobijene simulacijom vrlo bliske eksperimentalnim. Takođe i električna merenja snage predate kolu za skladištenje i upravljanje električnom energijom unutar čvora, obavljena u laboratorijskim uslovima, potvrđuju efikasnost termo-električne numeričke simulacije i opravdavaju upotrebu rezultata simulacije za karakterizaciju TEG-ova.

Pored ovih razmatranja disertacija se bavi i ispitivanjem uticaja spoljašnjih radnih uslova, kao što su temperatura okoline i strujanje vazduha na generisani napon TEG-a. U softversku analizu su bili uključeni slučajevi prirodne i prinudne konvekcije primenjujući konvektivne korelacije koje opisuju prenos toplote između WSN čvora i okoline. Utvrđeno je da promena temperature okoline u opsegu od 10-35°C ima minimalni uticaj na generisani napon čvora V_L , sve dok postoji konstantna temperaturna razlika između tople strane čvora i okoline ΔT_a . Takođe je pokazano da je mnogo bolje posmatrati ΔT_a nego temperaturnu razliku između strana termoelektričnog generatora ΔT . Kod prirodne konvekcije predstavljen je pojednostavljeni aproksimativni pristup za procenu napona V_L u zavisnosti od ΔT_a koristeći uslove otvorenog električnog kola ($I_L = 0$); $V_L \approx \bar{\gamma} \Delta T_a - R_{TEG} I_L$. Za prinudnu konvekciju, dobijene su kvantitativne promene napona V_L za brzine strujanja vazduha u opsegu od 0,5-3 m/s za tri različita termoelektrična generatora. Utvrđeno je da vrednosti napona V_L rastu u skladu sa opadanjem termičke otpornosti hladnjaka, u poređenju sa slučajem prirodne konvekcije. Zbog složenosti strukture kvantitativne promene dobijene su primenom simulacija.

Na kraju, istražen je i uticaj pojedinih termoelektričnih efekata unutar TEG-ova. Odabrana su tri TEG-a za koje je projektovan SPICE kompatibilni model za stacionarni režim rada. Svi elementi WSN čvora predstavljeni su ekvivalentnim termičkim otpornostima i povezani na odgovarajućim mestima u kolu. Rezultati su upoređeni sa rezultatima dobijenim multifizičkom numeričkom simulacijom i eksperimentom. Razlike postoje i one su manje od 10%. Dobijaju se nešto manje vrednosti napona i snage iz razloga što simulacija softverom ANSYS uključuje uticaj unutrašnje termičke otpornost kontakata kao i konvekciju sa svih površina čvora. Ovim modelom pokazano je da Peltijev efekat koji se dešava unutar TEG-a značajno utiče na njegovu efikasnost, dok je uticaj Džulovog efekta zanemarljiv. Uticaj Peltijevog efekta je izraženiji kod TEG-a sa većim brojem termoparova i relativna promena snage na potrošaču δP_L kreće se u granicama od 30-50% u zavisnosti od temperaturne razlike ΔT . Iz ovog razloga analitički model TEG-a daje zadovoljavajuće rezultate samo u slučaju primene fiksne temperaturne razlike na njegovim stranama minimizirajući uticaj Peltijevog efekta.

Imajući u vidu postavljene ciljeve na početku sprovedenog istraživanja, kao i rezultate do kojih se došlo, može se reći da ova disertacija ima više naučnih doprinosa:

- Generalni rezultat je pokazao da i komercijalni moduli (Peltijevi elementi) koji su prvenstveno namenjeni grejanju/hlađenju mogu adekvatno zameniti TEG-ove specijalne namene. Prednosti ovih modula su široka dostupnost, niža cena i manje dimenzije;
- Razvijena je simulaciona procedura koja omogućava veću preciznost izbora najpogodnijeg TEG-a za primenu u samonapajajućem senzorskom čvoru;
- Potvrđena je validnost analitičkog modela TEG-a u uslovima kada su izloženi fiksnoj temperaturnoj razlici;
- Definisani su uticaji hladnjaka i ostalih sastavnih blokova termoelektričnog samonapajajućeg sistema na rad samog TEG-a i vrednost generisanog napona;
- Određene su minimalne vrednosti temperaturne razlike neophodne za pravilno funkcionisanje samonapajajućeg senzorskog čvora pri implementaciji različitih TEG-ova;

- Verifikovana je predložena simulaciona procedura eksperimentalnim merenjima na praktično realizovanom kompaktnom WSN čvoru sa aluminijumskim štampanim pločama
- Utvrđen je uticaj ambijentalnih uslova na rad WSN čvora. Predstavljen je pojednostavljeni pristup za procenu napona V_L kod prirodne konvekcije kao i uspostavljena korelacija između napona V_L i termičke otpornosti hladnjaka R_{th} za slučaj prinudne konvekcije
- Definisana je električni SPICE kompatibilni model WSN čvora za stacionarni režim rada.

Dalji planovi vezani za istraživanja u ovoj oblasti se odnose na ispitivanje performansi sistema pri upotrebi različitih tipova hladnjaka, kao i na eventualnu primenu *multistage* termoelektričnih modula (višestepenih, kaskadnih modula za dobijanje većih vrednosti generisanog napona pri zadatim temperaturnim razlikama).

7. LITERATURA

- [1] X.-W. Kim, L. Dong, A. E. S. Choi, M. Fujii, T. Fujita, H.-S. Park, „Co-benefit potential of industrial and urban symbiosis using waste heat from industrial park in Ulsan, Korea“, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 135, pp. 225–234, 2018.
- [2] M. Ryan, T. U. Daim, „Commercialising energy technology innovations: case of waste heat recovery for power generation“, *International Journal of Technoentrepreneurship*, vol. 3(4), pp. 278–291, 2017.
- [3] L. Miro, J. Gasia, L. F. Cabeza, „Thermal energy storage (TES) for industrial waste heat (IWH) recovery: A review“, *Applied Energy*, vol. 179, pp. 284–301, 2016.
- [4] H. Wang, A. Jasim and X. Chen, „Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications – A comprehensive review“, *Applied Energy*, vol. 212, pp. 1083–1094, 2018.
- [5] R. Vullers, R. van Schaijk, H. Visser, J. Penders, C. Van Hoof, „Energy harvesting for autonomous wireless sensor networks“, *IEEE Solid-State Circuits Magazine*, vol. 2, pp. 29–38, 2010.
- [6] L. Mateu, M. Pollak and P. Spies, *Handbook of Energy Harvesting Power Supplies and Applications*, CRC Press, 2015.
- [7] S. Bandyopadhyay, A. Chandrakasan, „Platform architecture for solar, thermal, and vibration energy combining with MPPT and single inductor“, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 47, pp 2199–2215, 2012.
- [8] Y. Yang, H. Zhang, J. Chen, S. Lee, T.-C. Hou, Z. Wang, „Simultaneously harvesting, mechanical and chemical energies by a hybrid cell for self-powered biosensors and personal electronics“, *Energy & Environmental Science*, vol. 6, pp. 1744–1749, 2013.
- [9] J. Moon, S. Leeb, „Power electronic circuits for magnetic energy harvesters“, *IEEE Transaction on Power Electronics*, vol. 24, pp. 270–279, 2016.
- [10] C.-C. Chen, T.-K. Chung, C.-Y. Tseng, C.-F. Hung, P.-C. Yeh, C.-C. Cheng, „A miniature magnetic-piezoelectric thermal energy harvester“, *IEEE Transaction on Magnetism*, vol. 51, article no. 9100309, 2015.
- [11] M. Gueltig, B. Haefner, M. Ohtsuka, M. Koh, „Thermal energy harvesting based on ferromagnetic shape memory alloy microactuation“, *Proc. 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, Barcelona, Spain, 2013, pp. 2803–2806.
- [12] I. Hashem, N. Rafat, E. Soliman, „Dipole antennas terminated by traveling wave rectifiers for ambient thermal energy harvesting“, *IEEE Transaction on Nanotechnology*, vol. 13, pp. 767–778, 2014.

- [13] J. Yoshida, K. Morimoto, Y. Suzuki, „Electrostatic thermal energy harvester using unsteady temperature change“, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 476, article no. 012079, 2013.
- [14] P. Dziurdzia, „Modeling and simulation of thermoelectric energy harvesting processes“, in *Sustainable Energy Harvesting Technologies—Past, Present and Future*, Hampshire, U.K.: InTech, 2011, Chap. 4, pp. 109–128.
- [15] Y. Messele, E. Yilma, R. Nasser, „Design of a single stage thermoelectric power generator module with specific application on the automotive industry“, *Proc. 1st International Afro-European Conference for Industrial Advancement*, Springer, 2014, pp. 215–231.
- [16] <http://www.marlow.com/power-generators.html>, 2017.
- [17] P. Aranguren, A. Roch, L. Stepien, M. Abt, M. von Lukowicz, I. Dani, D. Astrain, „Optimized design for flexible polymer thermoelectric generators“, *Applied Thermal Engineering*, vol. 102, pp. 402–411, 2016.
- [18] V. Misra, A. Bozkurt, B. Calhoun, T. Jackson, J. Jur, J. Lach, B. Lee, J. Muth, O. Oralkan, M. Ozturk, S. Trolier-McKinstry, D. Vashaee, D. Wentzloff, Y. Zhu, „Flexible technologies for self-powered wearable health and environmental sensing“, *Proceedings of IEEE*, vol. 103, pp. 665–681, 2015.
- [19] Z. Lu, H. Zhang, C. Mao, C. Li, „Silk fabric-based wearable thermoelectric generator for energy harvesting from the human body“, *Applied Energy*, vol. 164, pp. 57–63, 2016.
- [20] K. Lee, D. Brown, S. Kumar, „Silicon nanowire arrays based on-chip thermoelectric generators“, *IEEE Transaction on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 5, pp. 1100–1107, 2015.
- [21] N. Degrenne, M. Boileau, F. Morel, F. Khaled, O. Ondel, F. Buret, B. Allard, “Association of flyback converters to harvest energy from multiple hydraulically connected iofuel cells”, *Proc. of 2012 IEEE International Conference on Green Computing and Communications (GreenCom)*, Lyon, France, November 2012, pp. 664-667.
- [22] N. Nguyen, K. Pochiraju, „Behavior of thermoelectric generators exposed to transient heat sources“, *Applied Thermal Engineering*, vol. 51, pp. 1–9, 2013.
- [23] S. Dalola, M. Ferrari, V. Ferrari, M. Guizzetti, D. Marioli, A. Taroni, „Characterization of thermoelectric modules for powering autonomous sensors“, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, pp. 99-107, 2009.
- [24] M. Cernaianu, A. Cernaianu, C. Cirstea, A. Gontean, „Thermo electrical generator improved model“, *Proc. 2012 International Conference on Power and Energy Systems*, Pune, India, 2012, pp. 343–348.

- [25] M. Chen, L. Rosendahl, T. Condra, „A three-dimensional numerical model of thermoelectric generators in fluid power systems“, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 54 (2011) 345–355.
- [26] O. Hogblom, R. Andersson, „Analysis of thermoelectric generator performance by use of simulations and experiments“, *Journal of Electronic Materials*, vol. 43, pp. 2246–2254, 2014.
- [27] M. Dousti, A. Petraglia, M. Pedram, „Accurate electrothermal modeling of thermoelectric generators“, *Proc. 2015 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition*, Grenoble, France, 2015, pp. 1603–1606.
- [28] A. Ibragimov, H. Pleteit, C. Pille, W. Lang, „A thermoelectric energy harvester directly embedded into casted aluminum“, *IEEE Electron Device Letters*, vol. 33, pp. 233–235, 2012.
- [29] M. Dunham, M. Barako, S. LeBlanc, M. Asheghi, B. Chen, K. Goodson, „Power density optimization for micro thermoelectric generators“, *Energy*, vol. 93 (2015) 2006–2017.
- [30] <http://www.europanthermodynamics.com/products/thermoelectric-modules/peltier-cooler>.
- [31] <http://www.lairdtech.com/product-categories/thermal-management/thermoelectric-modules>, 2017.
- [32] <http://www.ansys.com/Products/Multiphysics/Multiphysics-Platform>.
- [33] R. Lopes Pereira, J. Trindade, F. Gonçalves, L. Suresh, D. Barbosa, T. Vazao, „A wireless sensor network for monitoring volcano-seismic signals“, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 14, no. 12, pp. 3123–3142, 2014.
- [34] O. A. Postolache, J. M. D. Pereira, P. M. B. S. Girao, „Smart sensors network for air quality monitoring applications“, *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurements*, vol. 58, no 9, pp. 3253–3262, 2009.
- [35] R. M. White, D.-S. Nguyen, Z. Wu, P. Wright, „Atmospheric sensors and energy harvesters on overhead power lines“, *Sensors (MDPI)*, vol. 18, article no. 114, Jan. 2018.
- [36] F. Cao, F. Jiang, Z. Liu, B. Chen, and Z. Yang, „Application of ISFET microsensors with mobile network to build IoT for water environment monitoring“, *Proc. – 2014 International Conference on Intelligent Environment*, Shanghai, China, 2014, pp. 207–210.
- [37] S. Olatinwo, T.-H. Joubert, „Optimizing the energy and throughput of a water-quality monitoring system“, *Sensors (MDPI)*, vol. 18, article no. 1198, 2018.

- [38] A. Prijić, Lj. Vračar, Z. Pavlović, Lj. Kostić, Z. Prijić, „The effect of flat panel reflectors on photovoltaic energy harvesting in wireless sensor nodes under low illumination Levels“, *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, pp. 7105-7111, 2015.
- [39] Lj. Vračar, A. Prijić, D. Nešić, S. Dević, Z. Prijić, „Photovoltaic energy harvesting wireless sensor node for telemetry applications optimized for low illumination levels“, *Electronics (MDPI)*, vol. 5, article no. 26, June 2016.
- [40] <http://www.control.co.rs/srpski/kontrola-vozila/sensit-čitači/bežični-brojač-slobodnih-mesta>.
- [41] A. Jangra, Swati, Richa, Priyanka, „Wireless Sensor Network (WSN): Architectural design issues and challenges“, *International Journal on Computer Science and Engineering*, vol. 02, no. 09, pp. 3089-3094, 2010.
- [42] <http://www.ba.rosim-sensor.com/traffic-solutions/newest-wireless-traffic-flow-vehicle.html>.
- [43] <http://www.hyperion.rs/koncept>.
- [44] S. Ragavan, R. Thangavel, „Gsm Based Low Cost Smart Irrigation System with Wireless Valve Control“, *International Journal of Sensors and Sensor Networks*, vol. 5, issue 4, pp. 54-62, 2017.
- [45] Aqueel-Ur-Rehman, A.Z. Abbasi, N. Islam, Z. A. Shaikh, “A review of wireless sensors and networks applications in agriculture“, *Computer Standards and Interfaces*, vol. 36, no. 2, pp. 263-270, 2014.
- [46] M. Gonzalez, J. Schandy, N. Wainstein, L. Barboni, A. Gomez, C. Croce, „Wireless image-sensor network application for population monitoring of lepidopterous insects pest (moths) in fruit crops“, *Proc. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Montevideo, Uruguay, May 2014, pp. 1394–1398.
- [47] H. S. Kim, W. Liu, Z. Ren, „The bridge between the materials and devices of thermoelectric power generators“, *Energy and Environment Science*, vol. 10, pp. 69-85, 2017.
- [48] D. Wright, „Thermoelectric properties of bismuth telluride and its alloys“, *Nature*, 1958.
- [49] <http://www.thermoelectrics.caltech.edu/thermoelectrics/engineering.html>.
- [50] B. T. Admasu, X. Luo, “Effects of thermal contact resistance and Thomson heating on the outputs of solar thermoelectric power generation system“, *Proc. 14th International Conference on Electronic Packaging and Technology*, Dalian, China, 2013, pp. 1260–1263.

- [51] P. E. R. Ortega, M. A. Olivares-Robles, „Analysis of a hybrid thermoelectric microcooler: Thomson heat and geometric Optimization“, *Entropy (MDPI)*, vol. 19, no. 7, article no. 312, 2017.
- [52] A. Montecucco, A. R. Knox, „Maximum power point tracking converter based on the open-circuit voltage method for thermoelectric generators“, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 2, pp. 828-839, 2015.
- [53] F. Attivissimo, A. Di Nisio, C. G. C. Carducci, M. Spadavecchia, “Fast thermal characterization of thermoelectric modules using infrared camera“, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 66, no. 2, pp. 305-313, 2017.
- [54] R. Palacios, A. Arenas, R. Pecharromán, F. Pagola, „Analytical procedure to obtain internal parameters from performance curves of commercial thermoelectric modules“, *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, pp. 3501–3505, 2009.
- [55] A. Prijić, Lj. Vračar, D. Vučković, D. Milić, Z. Prijić, „Thermal energy harvesting wireless sensor node in aluminum core PCB technology“, *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, pp. 337–345, 2015.
- [56] „LTC3108 ultralow voltage step-up converter and power manager, Linear Technology Corporation, 2010, data sheet, [Online]. Available: <http://www.linear.com>.
- [57] <http://www.ansys.com/Products/Multiphysics/Multiphysics-Platform>.
- [58] W. Li et al., „Multiphysics simulations of a thermoelectric generator“, *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 633-638, 2015.
- [59] R. Bjork, D. Christensen, D. Eriksen, N. Pryds, “Analysis of the internal heat losses in a thermoelectric generator“, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 85, pp. 12-20, 2014.
- [60] F. Kreith, R. Manglik, M. Bohn, *Principles of Heat Transfer*, 7th ed., Cengage Learning, 2011.
- [61] F. Incropera, D. DeWitt, T. Bergman, A. Lavine, *Fundamentals of heat and mass transfer*, 6th ed., Wiley, 2007.
- [62] A. Miletić, *Prenos toplote konvekcijom*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2011.
- [63] ANSYS Inc. *ANSYS CFX*, 2018. <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx>.
- [64] J. Welty, C. Wicks, R. Wilson, G. Rorrer, *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer*, 5th ed., Wiley, 2008.
- [65] D. Milić, A. Prijić, Lj. Vračar, Z. Prijić, „Characterization of commercial thermoelectric modules for application in energy harvesting wireless sensor nodes“. *Applied Thermal Engineering*, vol. 121, pp. 74-82, 2017.



- [66] *ATS-50350B-C1-R0 BGA Heat Sink Datasheet*, datasheet, Advanced Thermal Solutions, Inc., 2013, [Online]. Available://www.qats.com.
- [67] S. Lineykin, S. Ben-Yaakov, “Analysis of Thermoelectric Coolers by a Spice-Compatible Equivalent-Circuit Model”, *IEEE Power Eletronics Letter*, vol. 3, pp. 63-66, 2005.
- [68] <http://www.linear.com/solutions/ltspace>.

8. BIOGRAFIJA AUTORA

Dejan Milić je rođen 18. aprila 1974. godine u Knjaževcu. Osnovnu školu “Milenko Brković-Crni“ i Tehničku školu (smer automatike) završio je u Zaječaru sa odličnim uspehom. Elektronski fakultet u Nišu upisao je 1993. godine. Diplomirao je maja 2001. godine na smeru Mikroelektronika prosečnom ocenom 7,42 i ocenom 10 na diplomskom radu “Tehnologija i simulacija integrisanih mikromehaničkih – MEMS- komponenata na silicijumu“.

Nakon odsluženja vojnog roka, u septembru 2002. godine počinje da radi u Tehničkoj školi u Zaječaru kao nastavnik elektro grupe predmeta. U okviru nastavnog rada bio je angažovan na izvođenju nastave i laboratorijskih vežbi iz predmeta: Elektrotehnika, Programiranje, Primena računara u elektrotehnici. Stručni ispit za zvanje profesora elektrostruke stiče jula 2005. godine na Elektronskom fakultetu u Nišu. Sredinom 2006. godine polaže stručni ispit za rad u državnim organima i prelazi da radi u Bezbednosno informativnu agenciju gde je i danas.

Oblasti njegovog istraživanja su *energy harvesting*, termoelektrični moduli i njihova primena u bežičnim senzorskim čvorovima. U svom dosadašnjem naučno-istraživačkom radu, Dejan V. Milić ima 5 objavljenih radova. Od navedenih, 2 rada objavljena su u časopisima kategorije M21a i M21, jedan rad je publikovan u zborniku međunarodne konferencije (M33), jedan u internacionalnom univerzitetskom časopisu (M52) i jedan u zborniku domaće konferencije (M63). U tri rada koja su u direktnoj vezi sa istraživanjima u ovoj disertaciji je prvi autor.

Oženjen je Irenom i ima sinove Marka i Vukašina.

9. SPISAK OBJAVLJENIH NAUČNIH RADOVA

- Dejan Milić, Aneta Prijić, Ljubomir Vračar, Zoran Prijić, „Characterization of commercial thermoelectric modules for application in energy harvesting wireless sensor nodes”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 121, pp. 74-82, 2017.
- Aneta Prijić, Ljubomir Vračar, Dušan Vučković, Dejan Milić, Zoran Prijić, „Thermal Energy Harvesting Wireless Sensor Node in Aluminum Core PCB Technology”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 337-345, 2015.
- Aneta Prijić, Miloš Marjanović, Ljubomir Vračar, Danijel Danković, Dejan Milić, Zoran Prijić, „A Steady-State SPICE Modeling of the Thermoelectric Wireless Sensor Network Node”, *Proceedings of the 4th IcETRAN*, Kladovo, Serbia, 2017, MOI2.3-1– MOI2.3-6.
- Dejan Milić, Aneta Prijić, Ljubomir Vračar, Zoran Prijić, „Karakterizacija komercijalnih termoelektričnih generatora za primene u samonapajajućim senzorskim sistemima”, *Elektronski zbornik radova 57. konferencije ETRAN*, Zlatibor, Srbija, 2013, MO1.4-1– MO1.4-6.
- Dejan Milić, Aneta Prijić, Ljubomir Vračar, Zoran Prijić, „The influence of ambient conditions on the performance of the thermoelectric wireless sensor network node“, *FACTA UNIVERSITATIS, Series: Working and Living Environmental Protection*, vol. 15, no 2, pp. 89-100, 2018.

IZJAVA O AUTORSTVU

Izjavljujem da je doktorska disertacija, pod naslovom

Karakterizacija termoelektričnih modula primenjenih za napajanje čvorova bežičnih senzorskih mreža

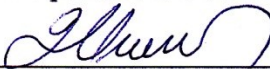
koja je odbranjena na Elektronskom fakultetu Univerziteta u Nišu:

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da ovu disertaciju, ni u celini, niti u delovima, nisam prijavljivao na drugim fakultetima, niti univerzitetima;
- da nisam povredio autorska prava, niti zloupotrebio intelektualnu svojinu drugih lica.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci, koji su u vezi sa autorstvom i dobijanjem akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada, i to u katalogu Biblioteke, Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Nišu, kao i u publikacijama Univerziteta u Nišu.

U Nišu, _____

Potpis autora disertacije:



Dejan V. Milić

**IZJAVA O ISTOVETNOSTI ELEKTRONSKOG I ŠTAMPANOG OBLIKA
DOKTORSKE DISERTACIJE**

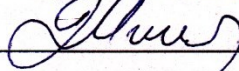
Naslov disertacije:

Karakterizacija termoelektričnih modula primenjenih za napajanje čvorova bežičnih senzorskih mreža

Izjavljujem da je elektronski oblik moje doktorske disertacije, koju sam predao za unošenje u **Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu**, istovetan štampanom obliku.

U Nišu, _____

Potpis autora disertacije:



Dejan V. Milić

IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Nikola Tesla“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu unese moju doktorsku disertaciju, pod naslovom:

Karakterizacija termoelektričnih modula primenjenih za napajanje čvorova bežičnih senzorskih mreža

Disertaciju sa svim priložima predao sam u elektronskom obliku, pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju, unetu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu, mogu koristiti svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons), za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo (CC BY)
2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)
- 3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade (CC BY-NC-ND)**
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorstvo – bez prerade (CC BY-ND)
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

U Nišu, _____

Potpis autora disertacije:



Dejan V. Milić