Analiza protokola usmjeravanja u bežičnim senzorskim mrežama

Ivković, Mirna

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:638580

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository

zir.nsk.hr

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD

ANALIZA PROTOKOLA USMJERAVANJA U BEŽIČNIM SENZORSKIM MREŽAMA

ANALYSIS OF ROUTING PROTOCOLS IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

Mentor: prof. dr. sc. Štefica Mrvelj

Student: Mirna Ivković

JMBAG: 0171269320

Zagreb, rujan 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKI ISPIT

Zagreb, 11. svibnja 2021.

Zavod: **Zavod za informacijsko komunikacijski promet**
Predmet: **Tehnologija telekomunikacijskog prometa II**

DIPLOMSKI ZADATAK br. 6309

Pristupnik: **Mirna Ivković (0171269320)**
Studij: Promet
Smjer: Informacijsko-komunikacijski promet

Zadatak: **Analiza protokola usmjeravanja u bežičnim senzorskim mrežama**

Opis zadatka:

Prikazati koncept bežične komunikacije u senzorskim mrežama. Analizirati područja primjene bežičnih senzorskih mreža. Dati pregled razvijenih protokola usmjeravanja u bežičnim senzorskim mrežama. Analizirati i napraviti usporedbu načina usmjeravanja i performansi protokola usmjeravanja s obzirom na različite kriterije:
a. topologija mreže
b. primjena
c. mobilnost
d. upravljanje napajanjem
e. životni vijek mreže
f. skalabilnost
g. skupljanje podataka.

Mentor:

Š. Mrvelj

prof. dr. sc. Štefica Mrvelj

Predsjednik povjerenstva za diplomski ispit:

ANALIZA PROTOKOLA USMJERAVANJA U BEŽIČNIM SENZORSKIM MREŽAMA

SAŽETAK

Cilj ovog diplomskog rada je predstaviti postojeće protokole usmjeravanja u bežičnim senzorskim mrežama te analizirati njihove performanse. Unutar ovog rada je detaljno definiran koncept bežičnih senzorskih mreža, karakteristike komunikacije te klasifikacija bežičnih senzorskih mreža. Shodno tome, prikazana je kategorizacija postojećih područja primjene bežičnih senzorskih mreža. Nadalje, opisan je pregled mrežnih topologija koje se koriste u bežičnim senzorskim mrežama te usporedba performansi postojećih mrežnih topologija. Također, definirani su izazovni čimbenici koji utječu na dizajn i razvoj protokola usmjeravanja te je prikazana klasifikacija protokola usmjeravanja. Štoviše, opisane su karakteristike postojećih protokola usmjeravanja uz komparativnu analizu definiranih protokola usmjeravanja prema različitim parametrima.

KLJUČNE RIJEČI: bežična senzorska mreža; primjene bežične senzorske mreže; izazovi usmjeravanja; kategorizacija protokola usmjeravanja

SUMMARY

This thesis aims to present the existing routing protocols in wireless sensor networks and analyze their performance. This thesis defines the concept of wireless sensor networks, communication characteristics, and the classification of wireless sensor networks in detail. Accordingly, the categorization of existing areas of application of wireless sensor networks is presented. Furthermore, an overview of network topologies used in wireless sensor networks and a comparison of the performance of existing network topologies are described. Also, the challenging factors that influence on design and development of routing protocols are defined, and the classification of routing protocols is presented. Moreover, the characteristics of existing routing protocols are described with a comparative analysis of defined routing protocols according to different parameters.

KEY WORDS: wireless sensor network; wireless sensor network applications; routing challenges; categorization of routing protocols

Sadržaj

1. Uvod 1
2. Značajke komunikacije u bežičnim senzorskim mrežama 3
2.1. Koncept bežičnih senzorskih mreža 3
2.2. Komunikacijska arhitektura 7
2.3. Klasifikacija bežičnih senzorskih mreža 9
3. Analiza primjene bežičnih senzorskih mreža 13
3.1. Vojna primjena 13
3.2. Medicinska primjena 15
3.3. Primjena u zaštiti okoliša 16
3.4. Primjena u kućanstvu 18
3.5. Ostale komercijalne primjene 19
4. Topologije bežičnih senzorskih mreža 22
4.1. Osnovne značajke mrežnih topologija 22
4.1.1. Topologija od točke do točke 22
4.1.2. Sabirnička mrežna topologija 23
4.1.3. Stablasta mrežna topologija 23
4.1.4. Zvjezdasta mrežna topologija 24
4.1.5. Prstenasta mrežna topologija 25
4.1.6. Isprepletena mrežna topologija 26
4.1.7. Kružna mrežna topologija 27
4.1.8. Rešetkasta mrežna topologija 28
4.2. Usporedba performansi topologija bežičnih senzorskih mreža 29
5. Izazovi u usmjeravanju i klasifikacija protokola usmjeravanja 31
5.1. Izazovi u usmjeravanju i dizajniranju protokola usmjeravanja 31
5.1.1. Raspoređivanje čvorova 32
5.1.2. Energetska učinkovitost 33
5.1.3. Model isporuke podataka 34
5.1.4. Heterogenost senzorskih čvorova 34
5.1.5. Tolerancija na kvarove 35
5.1.6. Skalabilnost 35
5.1.7. Mrežna dinamika 36
5.1.8. Pokrivenost i povezivost senzorskih čvorova 36

5.1.9. Agregacija podataka 36
5.1.10. Kvaliteta usluge 37
5.2. Sistematizacija protokola usmjeravanja 37
5.2.1. Protokoli usmjeravanja prema mrežnoj strukturi 39
5.2.2. Protokoli usmjeravanja prema načinu prijenosa 41
5.2.3. Protokoli usmjeravanja prema načinu rada 42
6. Analiza kriterija za odabir protokola usmjeravanja i komparativna analiza performansi 44
6.1. SPIN 45
6.2. LEACH 47
6.3. PEGASIS 50
6.4. TEEN i UPTEEN 53
6.5. DD 56
6.6. RR 57
6.7. GEAR 58
6.8. GAF 60
6.9. Usporedba parametara protokola umjeravanja 62
7. Zaključak 64
Literatura 66
Popis kratica 74
Popis slika 75
Popis tablica 76
Popis grafikona 77

1. Uvod

Bežične senzorske mreže pojavile su se kao jedna od najperspektivnijih tehnologija za budućnost. To je omogućeno napretkom tehnologije i dostupnošću malih, pametnih senzora koji čine mrežu senzora omogućavajući interakciju između osoba ili računala i okoline. Pojedinačne čvorove u bežičnoj senzorskoj mreži karakteriziraju ograničeni resursi u brzini obrade, kapacitetu pohrane i propusnosti komunikacije. Bežične senzorske mreže predstavljaju zbirke senzorskih čvorova koji mjere lokalne uvjete okoliša ili druge parametre te prikupljene informacije prenose do krajnjeg odredišta. Senzorski čvorovi imaju sposobnosti detekcije podražaja iz okoliša, komunikacije sa susjednim čvorovima u mreži te, u mnogim slučajevima, osnovne obrade prikupljenih podataka.

Glavni čimbenik koji razlikuje bežične senzorske mreže od tradicionalnih bežičnih mreža jest činjenica da je krajnji cilj u bežičnim senzorskim mrežama identifikacija događaja od interesa, a ne samo komunikacija. Također, senzorske mreže karakterizira značajan broj gusto raspoređenih senzorskih čvorova koji nemaju globalnu identifikaciju zbog velike količine režijskih troškova i velikog broja senzora. Premda je razvoj bežičnih senzorskih mreža bio motiviran vojnim aplikacijama, one danas bilježe niz mogućih primjena u raznovrsnim granama industrije i svakodnevnom životu.

Bežična senzorska mreža dizajnirana je za rad bez nadzora gdje je ušteda energije za produljenje životnog vijeka mreže ključni kriterij. Prema tome, jedno od najvećih ograničenja u bežičnim senzorskim mrežama su zahtjevi za niskom potrošnjom energije. Čvorovi senzora upotrebljavaju ograničene, većinom nezamjenjive izvore energije. Sukladno tome, protokoli usmjeravanja se moraju prvenstveno usredotočiti na uštedu energije za razliku od tradicionalnih mreža čiji su zahtjevi usmjereni postizanju visoke kvalitete usluge. Moraju imati ugrađene mehanizme koji omogućuju produljenje vijeka trajanja mreže nauštrb manje propusnosti ili većeg kašnjenja prijenosa. Prema tome, svrha ovog rada jest analiza značajki bežičnih senzorskih mreža i razvijenih protokola usmjeravanja.

Cilj diplomskog rada jest istražiti postojeće protokole usmjeravanja u bežičnim senzorskim mrežama te analizirati njihove performanse uz prethodno razrađeni koncept bežičnih senzorskih mreža, definirane različite topologije i područja primjene.

Diplomski rad se sastoji od sedam funkcionalno povezanih poglavlja:

1. Uvod
2. Značajke komunikacije u bežičnim senzorskim mrežama
3. Analiza primjene bežičnih senzorskih mreža
4. Topologije bežičnih senzorskih mreža
5. Izazovi u usmjeravanju i klasifikacija protokola usmjeravanja
6. Analiza kriterija za odabir protokola usmjeravanja i komparativna analiza performansi
7. Zaključak.

Drugo poglavlje opisuje koncept bežičnih senzorskih mreža pri čemu su definirane komponente bežične senzorske mreže, vrste mrežne arhitekture te komunikacijska arhitektura. Također, prikazana je klasifikacija bežičnim senzorskih mreža prema različitim kriterijima.

U trećem poglavlju jest prikazana kategorizacija primjene senzorskih aplikacija u vojnim, medicinskim, okolišnim, kućnim i drugim komercijalnim područjima. Izvedba senzora, princip detekcije događaja te bežična veza između njih obećavaju mnoga nova područja primjene.

U četvrtom poglavlju definirane su osnovne topologije korištene u bežičnim senzorskim mrežama koje se mogu modificirati prema zahtjevima. Bežična senzorska mrežna tehnologija je aplikacijski orijentirana tehnologija te se topologija i arhitektura mreže uvijek razlikuju od aplikacije do aplikacije.

U petom poglavlju opisani su čimbenici koji utječu na usmjeravanje i dizajn protokola usmjeravanja. Također, prikazana je klasifikacija protokola usmjeravanja u bežičnim senzorskim mrežama koja se može podijeliti na tri kategorije: protokoli usmjeravanja temeljeni na mrežnoj strukturi, protokoli usmjeravanja temeljeni na radu protokola i protokoli usmjeravanja prema načinu prijenosa.

Šesto poglavlje sadrži analizu postojećih protokola usmjeravanja u bežičnim senzorskim mrežama pri čemu je sažet njihov način rada. Nadalje, protokoli usmjeravanja su komparirani ovisno o njihovoj izvedbi prema različitim parametrima. Parametri koji su korišteni u komparaciji, uz samu klasifikaciju protokola usmjeravanja, su: mobilnost, upravljanje napajanjem, životni vijek mreže, skalabilnost, skupljanje podataka te postojanje više putanja za prijenos podataka.

2. Značajke komunikacije u bežičnim senzorskim mrežama

Značajan napredak u tehnologiji mikro-elektro-mehaničkih sustava, bežičnim komunikacijama i digitalnoj elektronici omogućio je razvoj bežičnih senzorskih mreža kao nove podvrste bežičnih mreža. Bežične senzorske mreže čine međusobno povezani jeftini, niskoenergetski, višenamjenski senzorski čvorovi koji su malih dimenzija i neometano komuniciraju na kratkim udaljenostima. Ti maleni senzorski čvorovi, koji se sastoje od senzorskih komponenti, komponenti za obradu podataka i komunikacijskih komponenti, potpomažu ideju o senzorskim mrežama koje se temelje suradnji velikog broja čvorova [1].

Bežične senzorske mreže predstavljaju posebnu podskupinu bežičnih *ad hoc* mreža, odnosno MANET (eng. *Mobile Ad Hoc Network*) mreža unutar kojih svaki modul u mreži ima mogućnost bežičnog komuniciranja [2]. S obzirom na ograničenja u pogledu napajanja i računalnih resursa senzorskih čvorova, bežične senzorske mreže se značajno razlikuju od standardnih *ad ho*c mreža. Prema tome, postojeća tehnička i algoritamska rješenja nije moguće primijeniti na bežične senzorske mreže.

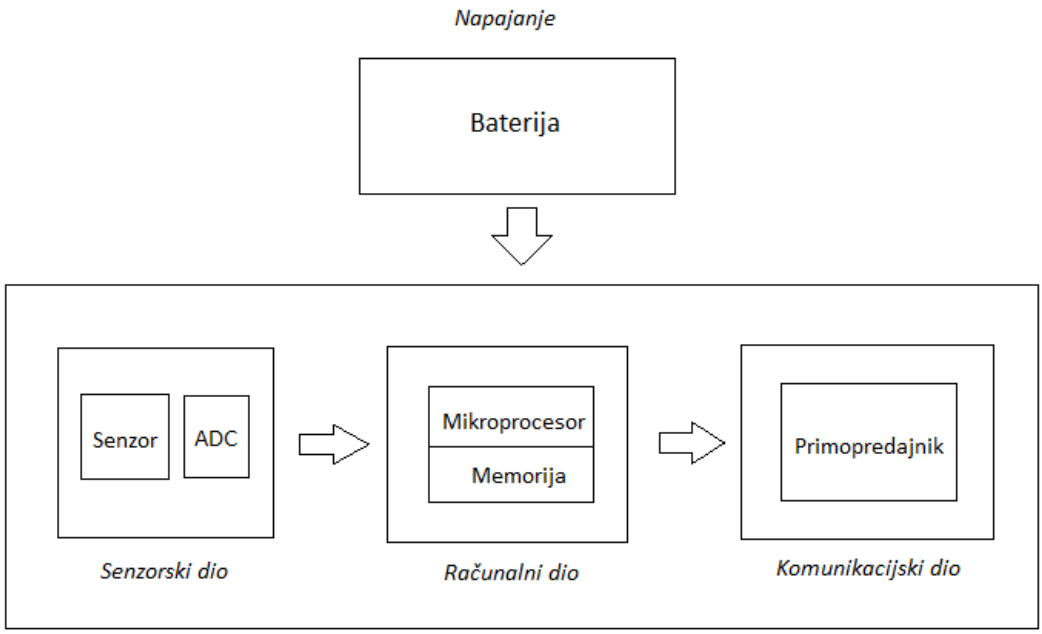
Bežične senzorske mreže donose bitno poboljšanje u odnosu na uporabu tradicionalnih senzora. Tradicionalni senzori obično se postavljaju na dva različita načina. Prvi način karakterizira postavljanje senzora daleko od promatranog fenomena, pri čemu se moraju koristiti kompleksni i skupi senzori koji su u stanju dobro razlikovati ciljani fenomen od okolnih smetnji. Drugi pristup karakterizira postavljanje nekoliko senzora koji služe isključivo za prikupljanje informacija, dok se procesiranje i analiza podataka obavljaju na udaljenom centralnom čvoru [1].

S obzirom da bežična senzorska mreža ima mogućnost samoorganizacije, raspored senzorskih čvorova nije nužno unaprijed definirati već ih je moguće slučajno rasporediti. Svaki senzorski čvor ima sposobnost obrade podataka i neometane međusobne komunikacije čime se isključuje potreba za uporabom kompleksnih udaljenih senzora i postavljanjem složene komunikacijske infrastrukture između senzora i udaljenog centralnog čvora za obradu podataka.

2.1. Koncept bežičnih senzorskih mreža

Bežična senzorska mreža predstavlja kompleksnu strukturu koja obuhvaća veliki broj međusobno povezanih senzorskih čvorova. Na slici 1 prikazana je struktura senzorskog čvora koji sadrži četiri osnovna dijela:

- senzorska jedinica (eng. *sensing unit*)
- računalna jedinica (eng. *processing unit*)
- komunikacijski dio (eng. *transceiver*)
- jedinica za napajanje (eng. *power unit*).

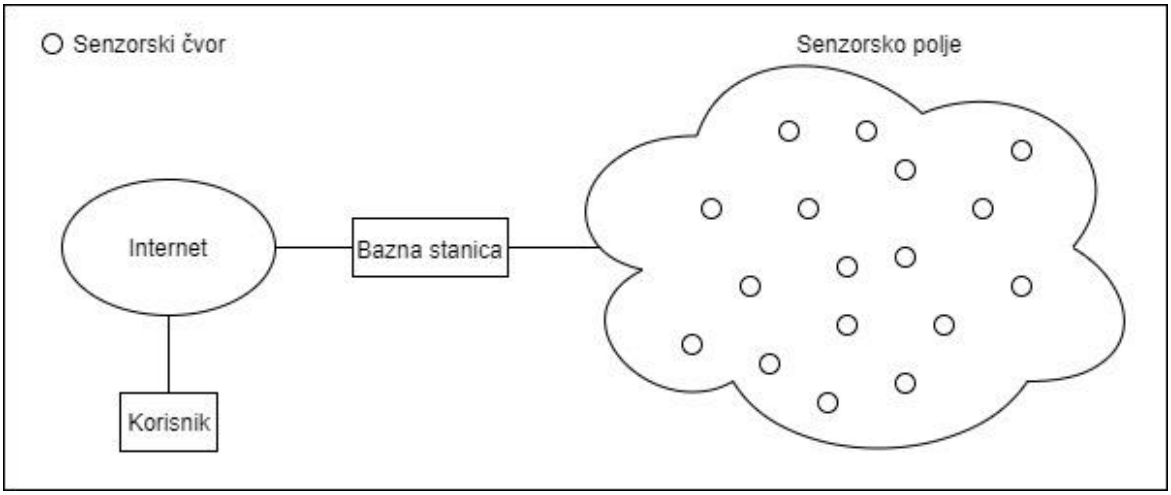


Slika 1. Struktura bežičnog senzorskog čvora
Izvor: [1]

Senzorska jedinica se sastoji od dvije podjedinice: senzora koji mogu biti aktivni i pasivni te analogno-digitalnog pretvarača. Aktivni senzor je senzorski uređaj koji za rad zahtijeva vanjski izvor energije za razliku od pasivnih senzora koji jednostavno otkrivaju i reagiraju na neku vrstu unosa iz fizičkog okruženja. Zadatak analogno-digitalnog pretvarača jest pretvaranje analognih signala prikupljenih od strane senzora u digitalne signale nakon čega se unose u procesorski, odnosno računalni dio. Procesorski dio senzorskog čvora obuhvaća mikroprocesorska jedinica koja vrši inteligentnu obradu podataka te pripadajući memorijski kapacitet. Komunikacijski dio senzorskog čvora čini odgovarajući radio primopredajnik sa pripadajućom antenom zadužen za prijenos i prijem podataka. Čvor senzora, uz primarnu senzorsku jedinicu, sadrži i druge važne značajke poput jedinica za obradu podataka, komunikaciju i pohranu podataka. Prema tome, čvor senzora je odgovoran za prikupljanje podataka u fizičkom svijetu, analizu mreže, korelaciju podataka te spajanje podataka s drugih senzora s vlastitim podacima.

S obzirom da su navedene komponente uređaji male snage, napajanje senzorskog čvora je realizirano pomoću baterije, a u nekim situacijama može sadržavati i dodatne izvore energije. Osim navedenih dijelova, senzorski čvor može uključivati i dodatne dijelove, ovisno o aplikaciji poput GPS (eng. *Global Positioning System*) modula za precizno pozicioniranje [3].

Također, čvorovi senzora ne komuniciraju samo međusobno s ostalim senzorima nego i s baznom stanicom koristeći bežičnu komunikaciju. Bazna stanica šalje naredbe čvorovima senzora koji potom izvršavaju zadatke međusobnom suradnjom. Nakon prikupljanja potrebnih podataka, podatke šalju natrag u baznu stanicu. Na slici 2 je prikazana arhitektura bežične senzorske mreže.

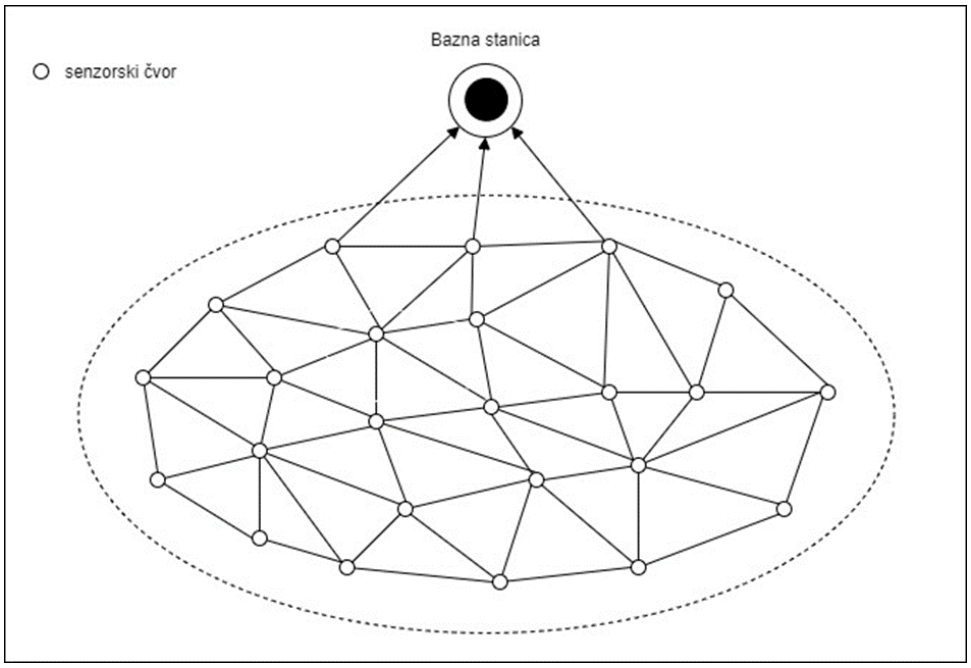


Slika 2. Arhitektura bežične senzorske mreže
Izvor: [3]

Bazna stanica se također ponaša kao pristupnik (eng. *gateway*) u druge mreže putem Interneta. Nakon primanja podataka od čvorova senzora, bazna stanica vrši jednostavnu obradu podataka i šalje ažurirane podatke korisniku putem Interneta [4].

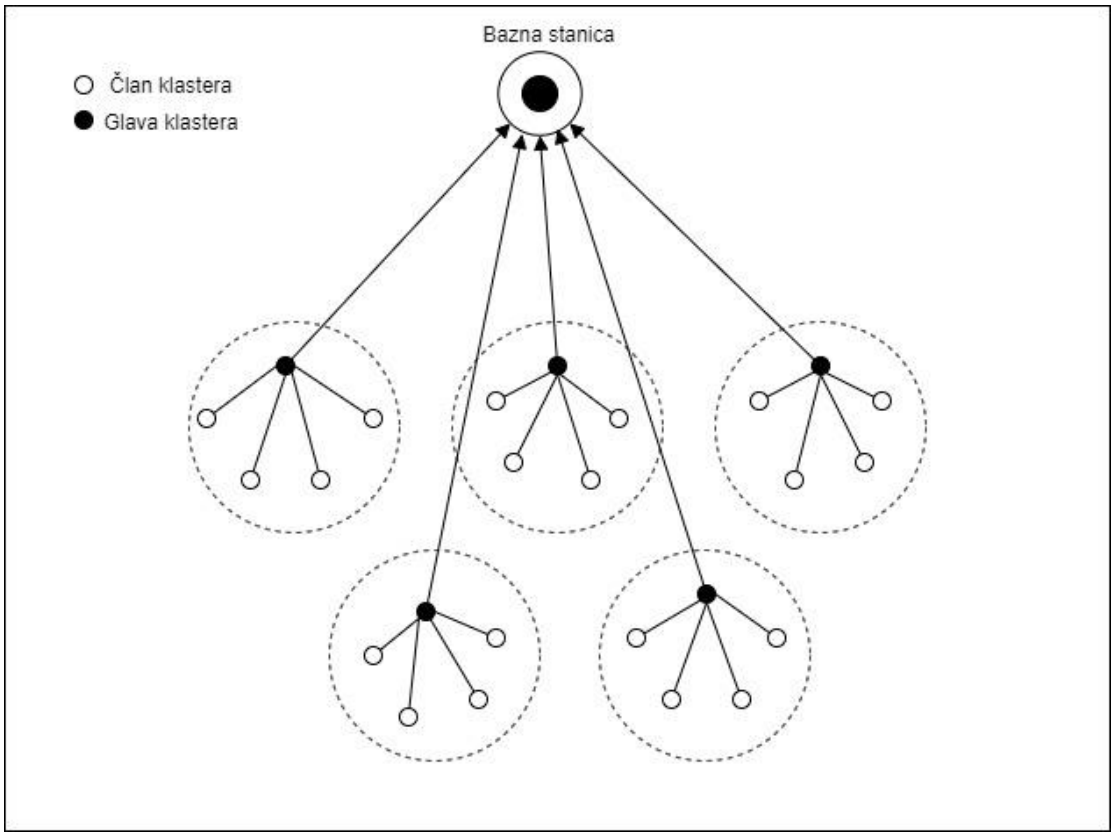
Čvorovi bežične senzorske mreže mogu obuhvaćati jedinstveno polje ili biti podijeljeni u više pojedinačnih cjelina gdje se čvorovi senzora grupiraju u klastere. Unutar klastera se bira glava klastera koja prikuplja podatke od čvorova odgovarajućeg klastera i prosljeđuje agregirane podatke sljedećem čvoru ili izravno baznoj stanici. Ukoliko čvorovi senzorske mreže nisu podijeljeni u klastere, oni zajedno čine senzorsko polje u kojem je svaki od čvorova u stanju prikupljati podatke u mreži te ih prosljeđivati do krajnjeg odredišta odnosno bazne stanice [3]. Štoviše, čvorovi imaju mogućnost obavljanja funkcije usmjerivača u mreži, odnosno prijenosa podatkovnih paketa između dvije točke u mreži. Takav način mrežne arhitekture naziva se istorazinska arhitektura gdje bazna

stanica šalje naredbe svim čvorovima senzora, a čvor senzora prosljeđuje prikupljene podatke izravno baznoj stanicu ili putem posredničkih čvorova kroz više skokova do bazne stanice. Na slici 3 prikazana je istorazinska mrežna arhitektura bežične senzorske mreže.



Slika 3. Istorazinska mrežna arhitektura
Izvor: [3]

Glavne funkcije glave klastera uključuju detekciju događaja u promatranom okruženju, prikupljanje podataka od ostalih čvorova senzora unutar klastera, agregiranje sirovih podataka te prijenos obrađenih podataka do bazne stanice. Klasteri predstavljaju standardni pristup za postizanje učinkovitih i skalabilnih performansi u bežičnim senzorskim mrežama. Također, olakšavaju raspodjelu nadzora nad mrežom, a time i lokalnost komunikacije. Grupiranje čvorova u grupe štedi energiju i smanjuje složenost mrežne topologije jer čvorovi prenose svoje podatke putem kraćih udaljenosti do svojih glava klastera. Slika 4 prikazuje tipičnu strukturu bežične senzorske mreže podijeljene na klastere koja predstavlja hijerarhijsku arhitekturu bežične senzorske mreže.



Slika 4. Hijerarhijska mrežna arhitektura
Izvor: [5]

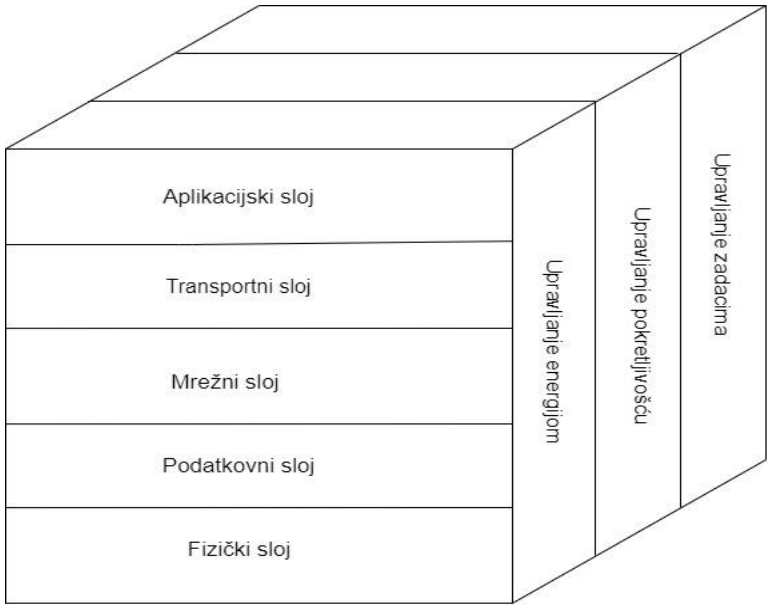
Konfiguracija u bežičnim senzorskim mrežama se može podijeliti u dvije faze gdje početnu konfiguraciju podrazumijeva postavljanje senzora i ažuriranje konfiguracije što podrazumijeva dodjeljivanje parametara poput adresa, uloga i QoS (eng. *Quality of Service*) parametara. Druga je faza odgovorna za ažuriranje novih zahtjeva, aplikacija ili softvera u cijeloj mreži [6].

S obzirom da bežična senzorska mreža sadrži velik broj čvorova, dolazi do poteškoća u procesu konfiguriranja. Unutar male senzorske mreže administrator lako dodjeljuje adrese i uloge te vrši ažuriranja za sve čvorove. Međutim, takav način postaje neefikasan povećanjem broja čvorova u mreži što rezultira novim pristupom: automatskom konfiguracijom. Obilježje automatske konfiguracije jest autonomno formiranje struktura povezivanja, adresiranja i usmjeravanja unutar senzorske mreže.

2.2. Komunikacijska arhitektura

Suprotno dobro planiranoj fizičkoj topologiji računalne mreže, čvorovi su gusto i nasumično raspoređeni u bežičnim senzorskim mrežama. Svaki od raštrkanih senzorskih čvorova ima

sposobnost prikupljanja i usmjeravanja podataka natrag do krajnjeg odredišta. Podatkovni paketi se usmjeravaju interaktivnim protokolima bez pomoći središnje infrastrukture. Slojevita komunikacijska arhitektura poznata je i pod nazivom OSI (eng. *Open System Interconnection*) model. Ispravan dizajn protokolarnog stoga prikazan je na slici 5 te je važan za ukupnu učinkovitost bežičnih senzorskih mreža.



Slika 5. Protokolarni stog bežične senzorske mreže
Izvor: [1]

Protokolni stog bežične senzorske mreže čini pet osnovnih slojeva [1]:

- fizički sloj (eng. *Physical Layer*)
- podatkovni sloj (eng. *Data Link Layer*)
- mrežni sloj (eng. *Network Layer*)
- transportni sloj (eng. *Transport Layer*)
- aplikacijski sloj (eng. *Application Layer*).

Ovisno o primjeni senzorske mreže, na aplikacijskom sloju se izvršavaju i koriste različite korisničke aplikacije. Transportni sloj pomaže u održavanju protoka podataka ukoliko to zahtijeva primjena senzorske mreže. Na mrežnom sloju izvršavaju se zadaće usmjeravanja podatkovnih paketa koji pristižu sa transportnog sloja. Nadalje, na podatkovnom sloju se izvode protokoli koji reguliraju pravo pristupa prijenosnom mediju (MAC, eng. *Medium Access Control*). Fizički sloj definira potrebne modulacijske tehnike prijenosa i prijema radio signala.

Moguće je izdvojiti tri upravljačke ravnine koje pomažu senzorskim čvorovima da koordiniraju osjetnim poljem te smanje ukupnu potrošnju energije [1]:

- upravljanje energijom (eng. *Power Management Plane*)
- upravljanje pokretljivošću (eng. *Mobility Management Plane*)
- upravljanje zadacima (eng. *Task Management Plane*).

Upravljačka ravnina za upravljanje energijom je odgovorna za reguliranje potrošnje energetskih resursa u bežičnoj senzorskoj mreži. Primjeri reduciranja potrošnje energije su isključivanje prijemnika nakon primanja poruke kako bi se izbjeglo dupliciranje poruka te stavljanje čvora u stanje mirovanja kada nema prijenosa ili primanja poruka. Upravljačka ravnina za upravljanje pokretljivošću je zadužena za praćenje lokacije senzorskih čvorova kako bi se u najkraćem vremenskom roku uspostavila potrebna ruta između senzorskog čvora i krajnjeg odredišta. Nadalje, svi čvorovi u mreži nisu istodobno potrebni za izvođenje određenog zadatka. Planiranje i preraspodjela zadataka namijenjenih pojedinačnim senzorskim čvorovima jest uloga upravljačke ravnine za upravljanje zadacima.

2.3. Klasifikacija bežičnih senzorskih mreža

Bežične senzorske mreže izuzetno su specifične za primjenu i implementirane su u skladu sa zahtjevima aplikacije. Stoga će se karakteristike jedne bežične senzorske mreže razlikovati od karakteristika druge bežične senzorske mreže. Bez obzira na primjenu, bežične senzorske mreže općenito se mogu svrstati u sljedeće kategorije [3]:

- Statičke bežične senzorske mreže koje karakterizira fiksni raspored čvorova senzora i mobilne bežične senzorske mreže čije aplikacije zahtijevaju pokretne čvorove senzora.
- Determinističke bežične senzorske mreže u čijim je aplikacijama postavljanje čvorova senzora unaprijed planirano i nedeterminističke bežične senzorske mreže koje zahtijevaju složen sustav upravljanja.
- Bežične senzorske mreže s jednom baznom stanicom i bežične senzorske mreže s više baznih stanica.
- Bežične senzorske mreže sa statičnom baznom stanicom koja ima fiksni položaj u blizini područja osjetljivosti te bežične senzorske mreže s mobilnom baznom stanicom koja se kreće oko područja osjetljivosti tako da je opterećenje čvorova senzora uravnoteženo.

- Bežične senzorske mreže s jednim skokom gdje su čvorovi senzora izravno spojeni na baznu stanicu te bežične senzorske mreže s više skokova za prijenos podataka koje koriste istorazinski čvorovi i glave klastera s ciljem smanjenja potrošnje energije.
- Bežične senzorske mreže koje su samokonfigurabilne što je karakteristika većine bežičnih senzorskih mreža te bežične senzorske mreže koje se ne mogu samostalno konfigurirati te za prikupljanje podataka se oslanjaju na upravljačku jedinicu.
- Homogene bežične senzorske mreže gdje svi čvorovi senzora imaju sličnu potrošnju energije, računsku snagu i mogućnosti pohrane te heterogene bežične senzorske mreže gdje neki čvorovi senzora imaju veće potrebe za energijom, a zadaci obrade i komunikacije podijeljeni su u skladu s tim.

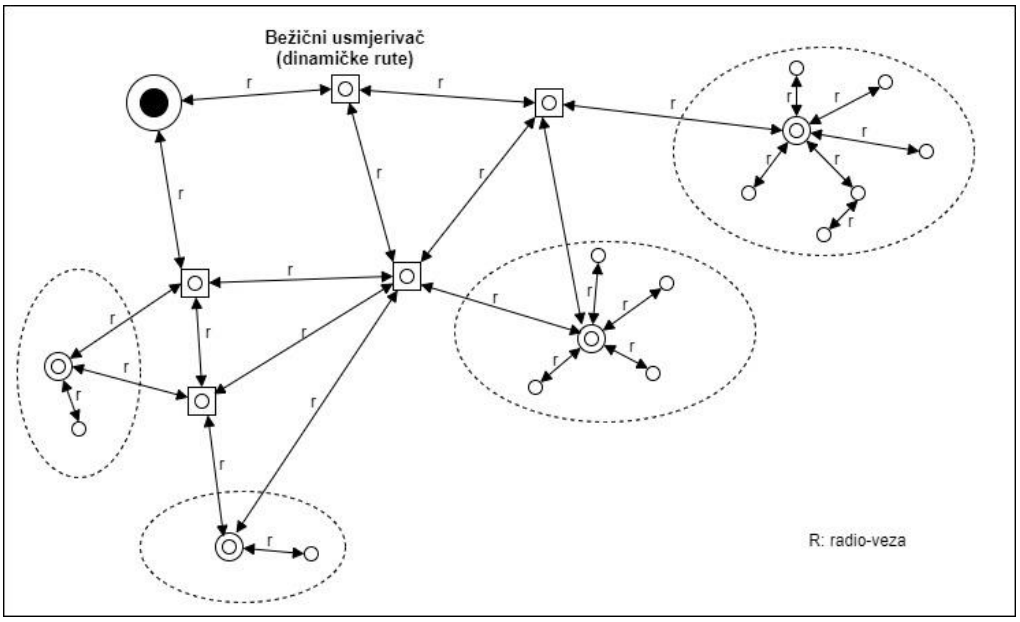
Nadalje, klasifikacija se najčešće vrši na osnovu broja skokova u komunikaciji između senzorskog čvora i centralnog mjesta za prikupljanje i obradu podataka. Velik broj senzorskih čvorova je raspoređen na relativno malim međusobnim udaljenostima što omogućuje da se komunikacija između udaljenih čvorova odvija kroz više skokova (eng. *multihop communication*). Umjesto jedne veze između čvora senzora i bazne stanice, podaci se prenose kroz jedan ili više posrednih čvorova. Navedeni način komunikacije omogućuje smanjenje potrošnje energije i produljenje vijeka trajanja mreže u odnosu na izravnu komunikaciju (eng. *single-hop communication*) između senzorskog čvora i udaljenog krajnjeg odredišta odnosno bazne stanice [3].

Prema tome, bežične senzorske mreže moguće je klasificirati u dvije primarne kategorije [7]:

• Bežične senzorske mreže kategorije 1 kod kojih senzorski čvorovi smiju biti udaljeni više od jednog skoka od čvora zaduženog za usmjeravanje ili prosljeđivanje podataka baznoj stanici.

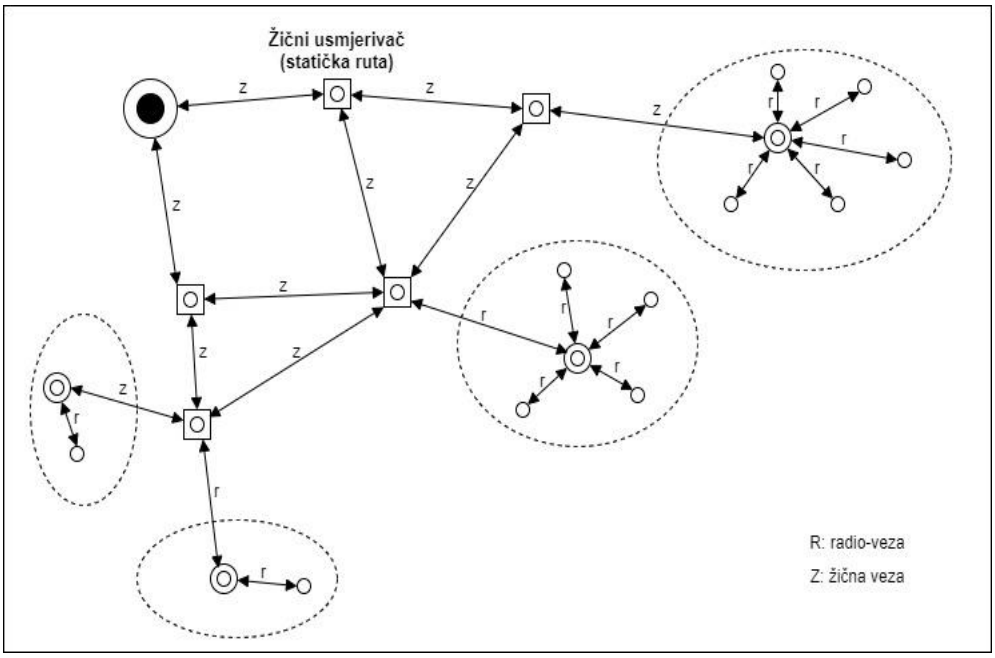
• Bežične senzorske mreže kategorije 2 koje karakterizira izravna komunikacija odnosno samo jedan skok, pri čemu konekcija može biti od točke do točke (eng. *point-to-point*) ili od više točaka prema jednoj točki (eng. *multipoint-to-point*).

Usmjerivački čvor koji je povezan s preostalim usmjerivačima ima ulogu bežičnog usmjerivača. Senzorski čvorovi podržavaju komunikaciju kroz više skokova te se, ako je potrebno, ponašaju kao usmjerivači i prosljeđuju podatke ovisno o svojoj ruti. Također, postoji više mogućih ruta koje povezuju različite dijelove mreže, pri čemu se pojedina ruta bira dinamičkim postupcima usmjeravanja [7]. Na slici 6 je prikazana bežična senzorska mreža kategorije 1.



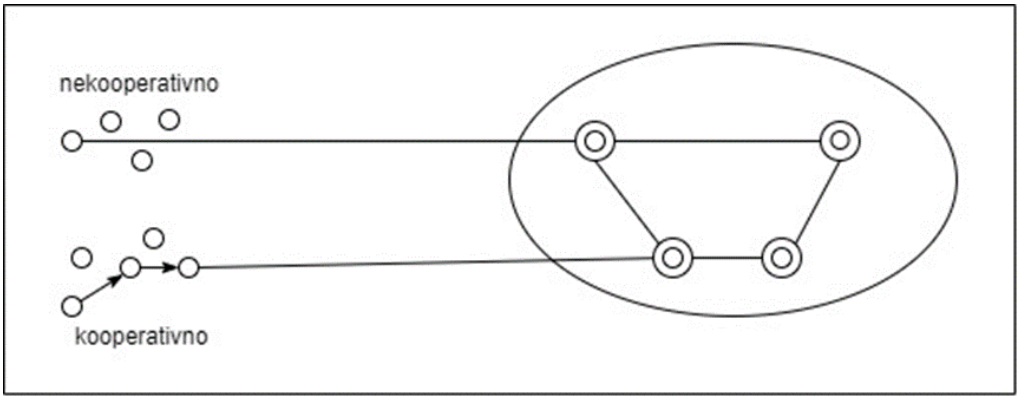
Slika 6. Bežična senzorska mreža kategorije 1
Izvor: [7]

Nadalje, slika 7 prikazuje bežičnu senzorsku mrežu kategorije 2 gdje su senzorski čvorovi izravno povezani s čvorom za prosljeđivanje koji je također spojen sa zemaljskom fiksnom mrežom te podržava isključivo statičko usmjeravanje.



Slika 7. Bežična senzorska mreža kategorije 2
Izvor: [7]

U bežičnim senzorskim mrežama kategorije 1 prisutno je kooperativno ponašanje senzorskih čvorova jer podržavaju komunikaciju kroz više skokova i mogu imati ulogu usmjerivača, dok bežične senzorske mreže kategorije 2 odlikuje nekooperativno ponašanje senzorskih čvorova gdje čvorovi komuniciraju izravno s usmjerivačkim čvorom i ne mogu se ponašati kao usmjerivači. Na slici 8 prikazano je nekooperativno ponašanje čvora kad čvor sam upravlja svojom komunikacijom te kooperativno ponašanje gdje se komunikacija odvija putem posredničkih čvorova.



Slika 8. Kooperativno i nekooperativno ponašanje senzorskih čvorova
Izvor: [7]

Bežične senzorske mreže kategorije 1 podržavaju visoko distribuirane aplikacije s velikim brojem čvorova i velikim protocima podataka poput aplikacija za nadzor okoliša ili sustava nacionalne sigurnosti. S druge strane, bežične senzorske mreže kategorije 2 obično podržavaju ograničene prostore kratkog dometa kao što su dom, tvornica, zgrada ili ljudsko tijelo te bilježe malene brzine prijenosa podataka poput RFID (eng. *Radio Frequency Identification*) tehnologije [7].

3. Analiza primjene bežičnih senzorskih mreža

Senzorske mreže se mogu sastojati od mnogo različitih tipova senzora čime se otvara širok spektar mogućnosti primjene bežičnih senzorskih mreža. Neke od mogućih primjena senzora koji se mogu ugraditi u čvorove bežične senzorske mreže su seizmički, magnetski, termički, vizualni, infracrveni, akustični, radarski senzori koji mogu nadzirati širok spektar ambijentalnih uvjeta. Također, senzori za kontinuirano praćenje promatranog fenomena te detekciju i identifikaciju događaja ugrađeni su u čvorove bežične senzorske mreže.

Koncept mikroosjetljivosti i bežičnog povezivanja komponenti obećava mnoga područja primjene. Prema [1] primjena bežičnih senzorskih mreža kategorizirana je u sljedeće skupine:

- vojna primjena
- medicinska primjena
- primjena u zaštiti okoliša
- primjena u kućanstvu
- ostale komercijalne primjene.

Prema novijoj literaturi [8] primjena bežičnih senzorskih mreža je podijeljena u sljedeće kategorije:

- vojna primjena
- medicinska primjena
- primjena u zaštiti okoliša
- primjena u biljnom i životinjskom svijetu
- urbana primjena
- industrijska primjena

3.1. Vojna primjena

Vojna domena nije samo prvo područje ljudske aktivnosti koje je koristilo bežične senzorske mreže, već se smatra i da je motiviralo pokretanje istraživanja senzorskih mreža. Bežične senzorske mreže su nastale kao izvrstan alat za vojne aplikacije koje uključuju praćenje različitih parametara,

prikupljanje informacija te logističku podršku u nepoznatom okruženju. Zbog mogućnosti prijenosa informacija u stvarnom vremenu, bežične senzorske mreže imaju važnu ulogu u vojnim operacijama.

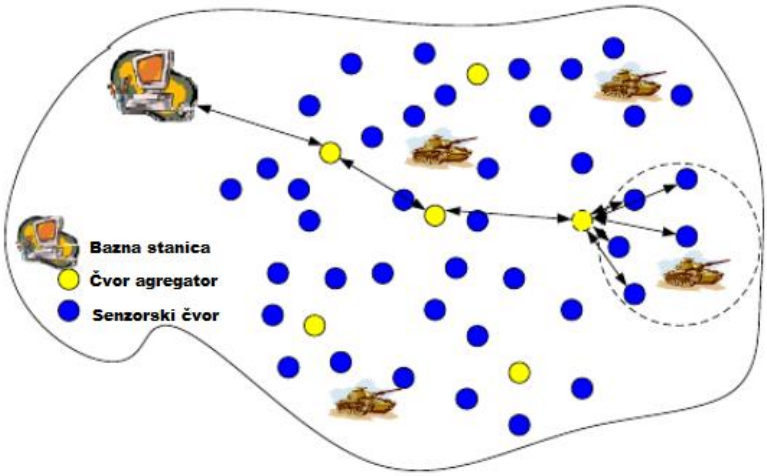
Bežične senzorske mreže mogu biti integralni dio vojnog zapovijedanja, upravljanja, komunikacije, obavještajnog rada te nadzora vojnih sustava. Karakteristike poput brzog postavljanja, samoorganizacije i tolerancije na kvarove čine razlog široke primjene bežičnih senzorskih mreža u vojne svrhe. Budući da se senzorske mreže temelje na velikom broju jeftinih senzora, uništavanje čvorova bežične senzorske mreže ne čini štetu kao uništavanje tradicionalnog senzora, što senzorske mreže čini boljim konceptom [1].

U suvremenim vojnim operacijama možemo razlikovati četiri scenarija: bojište, urbano ratovanje koje se odvija u urbanim i gradskim područjima, očuvanje mira i zaštitu. Navedeni scenariji definiraju veličinu i vrstu okruženja, koja pak definiraju veličinu i zahtjeve za bežične senzorske mreže. Prema tome, bojište uključuje nekoliko tisuća senzorskih čvorova koji nisu ručno raspoređeni, dok urbano ratovanje te zaštitu karakteriziraju bežične senzorske mreže srednjih razmjera s nekoliko stotina, ručno raspoređenih čvorova. Operacije koje karakterizira očuvanje mira mogu koristiti senzorske mreže bilo kojih razmjera koje mogu, ali i ne moraju biti postavljene ručno. Štoviše, prema [9] funkcionalni zahtjevi za vojne operacije ukazuju na korištenje sljedećih tipova senzora:

- Senzori koji detektiraju prisutnost na temelju kombinacija senzorskih podražaja poput infracrvenih, fotoelektričnih, laserskih, akustičnih i vibracijskih podražaja.
- Senzori koji detektiraju kemijske, biološke, radiološke, nuklearne, eksplozivne i otrovne industrijske materijale.
- Senzori za određivanje udaljenosti poput RADAR (eng. Radio Detection and Ranging) koji koristi radio valove i LIDAR (eng. Light Detection and Ranging) koji koristi svjetlosne valove, te ultrazvučni senzorski koji generaraju ultrazvučne valove za određivanje udaljenosti.
- Zvučni senzori koji detektiraju zvučne valove.

Neke od mogućih primjena bežičnih senzorskih mreža na bojištu uključuju autonomni sustav protutenkovskih mina koje nadziru neprijateljsko bojno polje i detektiraju podražaje na temelju samostalnog sustava akustičke lokacije, te motrenje neprijateljskih snaga i terena putem akustičkih

senzorskih čvorova ovješenih ispod privezanih aerostata s ciljem otkrivanja i lokalizacije prijelaznih signala iz minobacača, topništva i ostalog oružja. Štoviše, moguće primjene u urbanom ratovanju uključuju praćenje i nadzor vojnika, opreme i streljiva, sustav za prepoznavanje prijetećeg zvuka, te otkrivanje i lokalizaciju snajpera putem akustičnih senzora i video kamera. Nadalje, ostale moguće primjene uključuju otkrivanje nuklearnog, biološkog ili kemijskog napada, procjenu gubitaka i oštećenja, precizno ciljanje i navođenje, te mnoge druge [9]. Na slici 9 je prikazana primjena bežičnih senzorskih mreža na bojnom polju pri čemu čvor agregator prikuplja detektirane podatke, te ih prosljeđuje baznoj stanici.



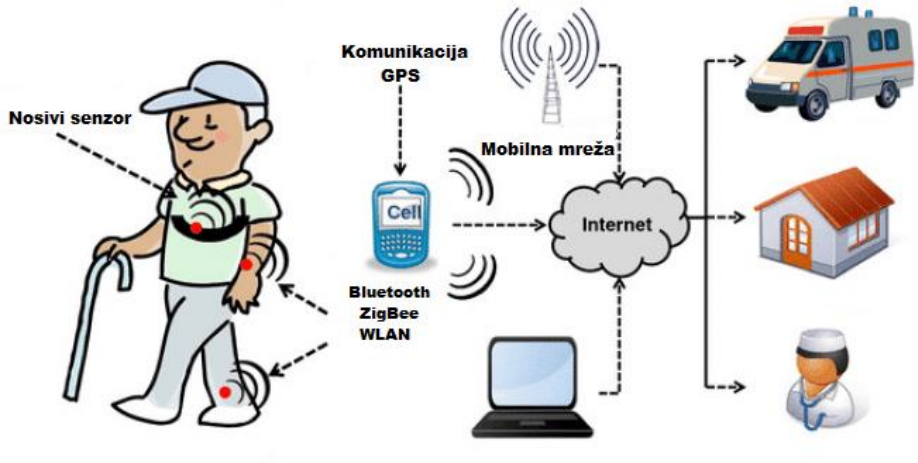
Slika 9. Upotreba bežičnih senzorskih mreža na bojištu
Izvor: [10]

3.2. Medicinska primjena

Upotreba bežičnih senzorskih mreža u medicinske svrhe predstavlja jedno od najaktivnijih područja istraživanja. Najčešća upotreba podrazumijeva daljinsko praćenje pacijenata i njihovih vitalnih parametara poput pulsa, krvnog tlaka, elektrokardiograma i slično. Štoviše, posljednjih godina je došlo do razvoja posebne podskupine bežičnih senzorskih mreža – BASN (eng. *Body Area Sensor Network*) mreže koju karakteriziraju čvorovi postavljeni na ljudsko tijelo ili čak unutar njega u obliku implantata [11].

Na slici 8 jest prikazana bežična senzorska mreža s primjenom u zdravstvene svrhe. Zadatak senzorskih čvorova jest praćenje vitalnih parametara pacijenta te prosljeđivanje prikupljenih podataka do liječničke ustanove gdje su oni izravno dostupni medicinskom osoblju. Također, u

slučaju većih oscilacija vitalnih parametara od standardnih vrijednosti aktivira se alarm koji omogućuje pravovremenu reakciju medicinskog osoblja.



Slika 10. Medicinska primjena bežične senzorske mreže
Izvor: [12]

Senzorske mreže se mogu upotrebljavati i za nadzor kroničnih bolesnika i starije populacije u okruženju njihovog vlastitog doma te za praćenje medicinskog osoblja kako bi se povećala njihova učinkovitost u kriznim situacijama. Osim bolesnika, senzorske mreže mogu koristiti i zdravi ljudi za praćenje određenih parametara prilikom treninga i tjelovježbe te kao pomoć u razvijanju vlastitih programa tjelesne aktivnosti. Također, senzorske mreže se koriste i za upravljanje i raspodjelu lijekova i medicinskih materijala unutar zdravstvenih institucija [1].

3.3. Primjena u zaštiti okoliša

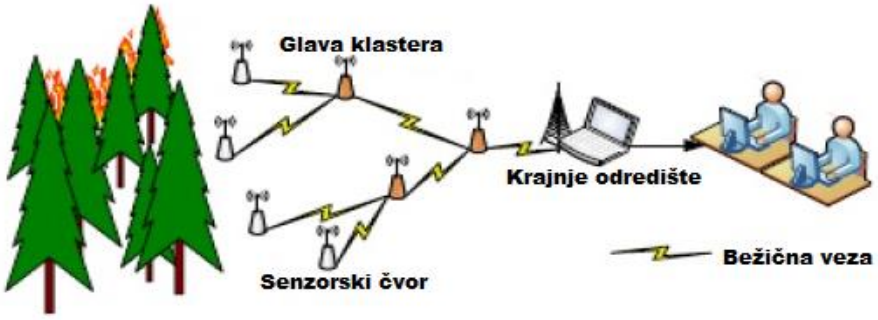
Aplikacije s ciljem zaštite okoliša koje zahtijevaju kontinuirano praćenje okolišnih uvjeta u neprijateljskim i udaljenim područjima mogu se poboljšati korištenjem bežičnih senzorskih mreža. Prema [13] primjena bežičnih senzorskih mreža za zaštitu okoliša uključuje sljedeća područja:

- unutarnji nadzor okoliša
- vanjski nadzor okoliša
- primjene u poljoprivredi.

Unutarnji nadzor okoliša karakterizira mjerenje temperature, svjetla, strujanja zraka i onečišćenja zraka u zatvorenom prostoru s ciljem optimalne kontrole unutarnjeg okruženja. Štoviše, nepotrebno zagrijavanje ili hlađenje unutarnjih prostora uzrokuje veliki gubitak energije

te time izravno šteti okolišu. Nadalje, primjena bežičnih senzorskih mreža u zatvorenom prostoru može ublažiti štete od požara. Detekcija požara i dima u zgradama je, u većini zemalja, nužna i propisana relevantnim zakonima. Također, postojanje svjetlosnih signala koji ukazuju na izlaze u slučaju opasnosti je obavezno u velikim zgradama. Međutim, instalacija senzorskih mreža u zgradama može dovesti do integracije ova dva sustava što pruža dodatnu sigurnost ljudima te manji rizik od zagađenja okoliša. Također, bežične senzorske mreže mogu biti korisne nakon potresa zbog mogućeg pregleda konstrukcija temeljenih na vibracijama. Ugradnja bežičnih senzora unutar cementnih blokova tijekom izgradnje ili njihovo pričvršćivanje na strukturne jedinice omogućuje snimanje vibracija tijekom životnog vijeka zgrade. Pregled zgrade nakon potresa, korištenjem ovog sustava, neće biti ograničen na procjenu pukotina i oštećenja, već će biti popraćen stvarnim podacima [13].

Vanjsko praćenje i nadzor okoliša obuhvaćaju praćenje kretanja i životnih navika životinja i životinjskih staništa čime se ne narušava prirodna ravnoteža prisutnošću čovjeka. Uz pomoć različitih vrsta senzora, cilj je pratiti prirodni okoliš životinja i njihovo ponašanje u skladu s klimatskim promjenama. Nadalje, ostale primjene koje se odnose na vanjsko praćenje uključuju promatranje okoliša i predviđanje vremenskih pojava. Bežična senzorska mreža može pružiti bolje rješenje za upravljanje katastrofama i spašavanje. Moguće ju je primjenjivati za vrlo rano otkrivanje šumskih požara, što je prikazano na slici 10, čime se omogućava njihova brza lokalizacija i sprječava ekološka nesreća. Također, senzorski čvorovi mogu se koristiti i u sustavima za otkrivanje potresa i uzbunjivanje te otkrivanje poplava slanjem alarma ukoliko senzori bilježe neuobičajene parametre.



Slika 11. Primjena bežične senzorske mreže za otkrivanje požara
Izvor: [14]

Bežične senzorske mreže se koriste i u području poljoprivrede i proizvodnje zdrave hrane, te predstavljaju jednu od ključnih tehnologija u konceptu precizne poljoprivrede (eng. *precision agriculture*). Primjenom bežičnih senzorskih mreža opremljenih senzorima za mjerenje vlažnosti i sastava tla moguće je pratiti razinu pesticida, razinu erozije tla te postići optimalnu potrošnju vode i gnojiva. Također, bežične senzorske mreže mogu koristiti za otkrivanje bolesti i štetočina, ali i za racionalizaciju primjene različitih agrotehničkih mjera [1].

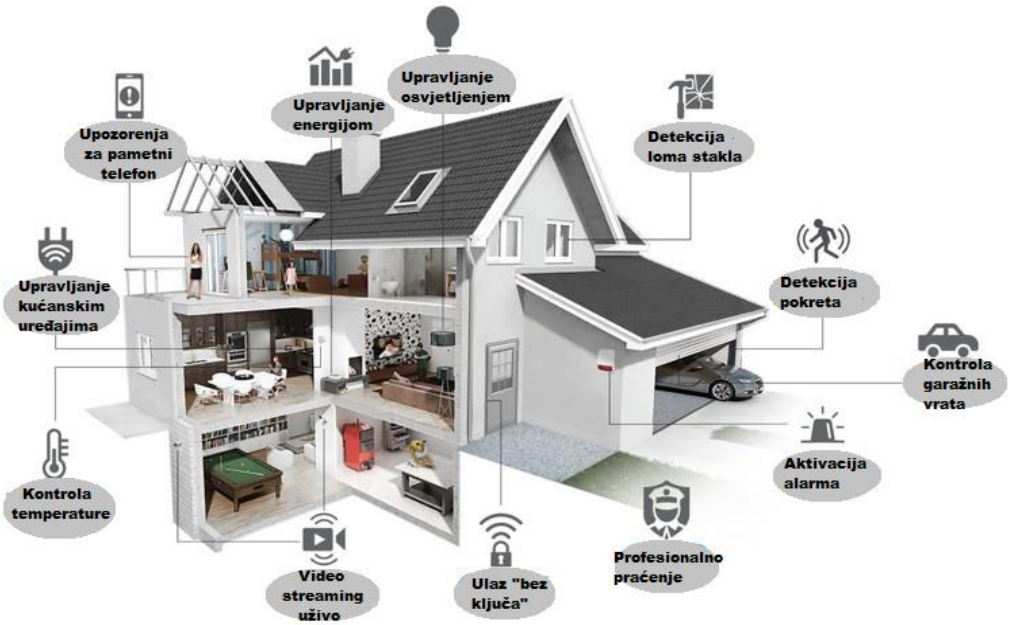
3.4. Primjena u kućanstvu

Primjenom tehnologije bežičnih senzorskih mreža u kućanstvu se kreira inteligentno okruženje čije komponente dinamično komuniciraju i brzo reagiraju na prilagodljiv način potrebama stanara i promjenama u ambijentalnim uvjetima. Sve što u domu koristi električnu energiju može se staviti na kućnu mrežu koja može uključivati uređaje, rasvjetu, grijanje, klimatizaciju, televizore, računala, sustave za zabavu, velike kućanske uređaje kao što su perilice, sušilice, hladnjaci i zamrzivači, zatim sigurnosne sustave i sustave kamera koji mogu međusobno komunicirati te biti daljinski kontrolirani pomoću vremenskih rasporeda, telefona, mobitela ili Interneta. Pametna kuća uključuje kontrolu i automatizaciju sve svoje ugrađene tehnologije.

Instalacija senzorskih čvorova u kućanske uređaje omogućuje praktičnost primjene te uštedu vremena, novca i energije. Takvi su sustavi prilagodljivi stalnim promjenjivim potrebama stanovnika kuće. Instalacija bežičnih senzorskih mreža omogućuje upravljanje rasvjetom koje se odnosi na uključivanje ili prigušivanje svjetla iz bilo koje utičnice čime se smanjuje potreba za novim žičanim vezama, a istovremeno omogućuje jednostavna uporaba i fleksibilnost. Štoviše, upravljanje energijom omogućuje prikupljanje podataka vezanih uz temperaturu, vlažnost, svjetlost što omogućuje kontrolu korištenja prozorskih zavjesa, vrata, grijanja, te ventilacijskih i klimatizacijskih sustava s ciljem minimiziranja energetske potrošnje [1].

Također, sigurnosni sustavi visoke razine mogu uključivati nekoliko senzora koji detektiraju anomalije poput dima, poplave te drugih prisutnosti kako bi se identificirali potencijalni rizici. Shodno tome, postoje sustavi koji se izravno povezuju s vatrogasnim službama ili policijskim postajama kako bi se spriječile neželjene posljedice. Također, bežične senzorske mreže omogućuju medicinsku brigu na daljinu pružajući pomoć pacijentima, invalidima i starijim građanima. Različiti parametri vezani uz tijelo i zdravlje, poput krvnog tlaka, razine hormona i/ili šećera, razine tjelesne temperature ili brzine otkucaja srca mogu se prijaviti bežičnim senzorima za praćenje i

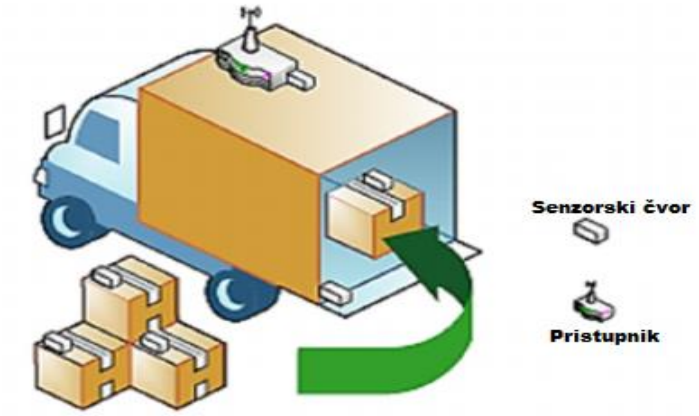
nadzor pacijenata [15]. Na slici 11 prikazane su osnovne značajke pametne kuće temeljene na bežičnoj senzorskoj mreži.



Slika 12. Mogućnosti pametne kuće bazirane na bežičnim senzorskim mrežama
Izvor: [16]

3.5. Ostale komercijalne primjene

Uz navedene primjene, postoji još čitav niz drugih mogućih primjena bežičnih senzorskih mreža. Štoviše, bežične senzorske mreže se sve više koriste u industrijskoj proizvodnji tijekom upravljanja i vođenja automatiziranih postrojenja, praćenje stanja inventara i skladišta te kontrole kvalitete [1]. Nadalje, sektor transportne logistike zahtijeva niske troškove i visoku pouzdanost tijekom isporuke dobara. Bežične senzorske mreže su prikladne za vremensko nadziranje okolišnih uvjeta u transportnoj logistici te omogućavaju pravovremene informacije. Razvojem i implementacijom bežičnih senzorskih mreža u logistici omogućeno je praćenje prijevoza i prijevoznih uvjeta poput temperature i vlažnosti unutar tovarnog kontejnera što je prikazano na slici 13.



Slika 13. Implementacija bežične senzorske mreže u transportnoj logistici
Izvor: [8]

Bežične senzorske mreže se često upotrebljavaju u velikim poslovnim zgradama i institucijama za regulaciju i nadzor sustava za grijanje i hlađenje, ventilaciju te regulaciju osvjetljenja. Primjenom bežične senzorske mreže moguće je regulirati osvjetljenje i temperaturu u svakoj prostoriji čime se postižu značajne uštede u potrošnji energije. Bežične senzorske mreže se ugrađuju unutar sigurnosnih sustava, poput protuprovalnih i protupožarnih sustava, gdje se koriste za detekciju uljeza. Štoviše, urbanizacija je izazvala potrebu za pametnim gradovima koji predstavljaju urbana područja koje koriste različite vrste senzora za prikupljanje podataka, a zatim koriste prikupljene podatke za učinkovito upravljanje imovinom, resursima i uslugama. Primjene bežičnih senzorskih mreža u gradovima uključuju automatizaciju zgrada i institucija, aplikacije medicinske pomoći, gradske sigurnosne službe, upravljanje cestovnim prometom i strukturno praćenje zdravlja [8].

Također, ističe se primjena bežičnih senzorskih mreža u prometu gdje se senzorske mreže ugrađuju radi redukcije zagušenja u prometu. Sustavi se instaliraju duž glavnih autocesta gdje digitalna senzorska mreža prikuplja podatke o brzini i broju vozila te gustoći kolnika te prenosi podatke do podatkovnog centra [7]. Bežične senzorske mreže se koriste i u automobilskoj industriji gdje se posebno ističe otkrivanje i praćenje krađa automobila, kontrola zagađenja okoliša automobilom te kontrola intenziteta brzine i farova, udaljenosti između automobila u vožnji te ostalih komponenti sa svrhom veće sigurnosti u prometu.

Nadalje, posljednjih se godina posebno ističe primjena bežičnih senzorskih mreža u robotici. Roboti koriste bežične senzorske mreže kako bi ažurirali podatke o detekciji podražaja. Štoviše,

svaki senzor konstruira prometnu kartu detektiranog područja koja se naposljetku integrira zajedno s ostalim senzorskim čvorovima u jednu veliku kartu. Svrha prometne karte je biranje optimalne rute kojom će se željeni podaci proslijediti [8].

4. Topologije bežičnih senzorskih mreža

Ispravan odabir mrežne topologije osigurava minimalnu udaljenost između susjednih čvorova čime se smanjuje vjerojatnost gubitka poruke. Razvoj i primjena bežičnih senzorskih mreža odveli su tradicionalne mrežne topologije u nove smjerove. Različite topologije bežične senzorske mreže koje se mogu modificirati prema zahtjevima aplikacije su [17]:

- topologija od točke do točke
- sabirnička mrežna topologija
- stablasta mrežna topologija
- zvjezdasta mrežna topologija
- prstenasta mrežna topologija
- isprepletena mrežna topologija
- kružna mrežna topologija
- rešetkasta mrežna topologija.

4.1. Osnovne značajke mrežnih topologija

4.1.1. Topologija od točke do točke

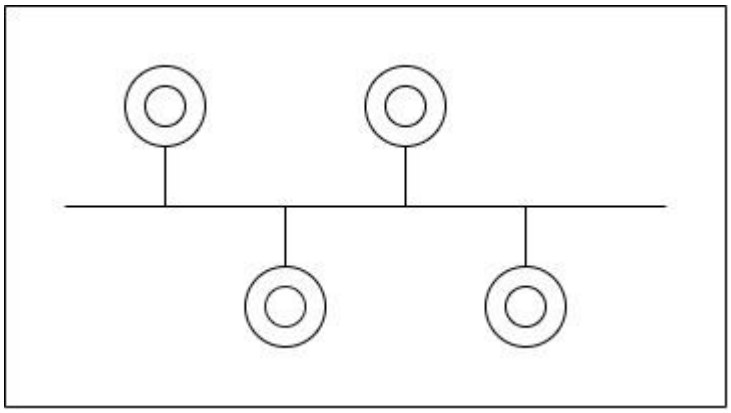
Mrežna topologija od točke do točke sastoji se od namjenske bežične veze velikog dometa i velikog kapaciteta između dva čvora senzora [18]. Topologije od točke do točke predstavljaju osnovni model konvencionalnih mreža te ih karakterizira tradicionalni način povezivanja čvorova i u ostalim vrstama mrežnih topologija. Na slici 10 prikazana je mrežna topologija od točke do točke.

Slika 14. Mrežna topologija od točke do točke
Izvor: [18]

Glavna prednost, ali i nedostatak ove topologije, jest jedan podatkovni komunikacijski kanal. Zajamčena je sigurnost komunikacije, no s druge strane neuspjeh kanala potpuno će ugasiti komunikaciju između dva senzorska čvora.

4.1.2. Sabirnička mrežna topologija

Sabirnička mrežna topologija jest topologija mreže u kojoj su svi čvorovi izravno povezani sa zajedničkom poludupleksnom vezom koja se naziva sabirnica. Svaka će postaja, odnosno čvor senzora, primiti sav mrežni promet, a promet koji generira svaka stanica će imati jednak prioritet prijenosa. Na slici 11 je prikazana sabirnička mrežna topologija u kojoj svi čvorovi mogu vidjeti emitiranu poruku, ali samo namijenjeni primatelj zapravo prihvaća i obrađuje poruku.

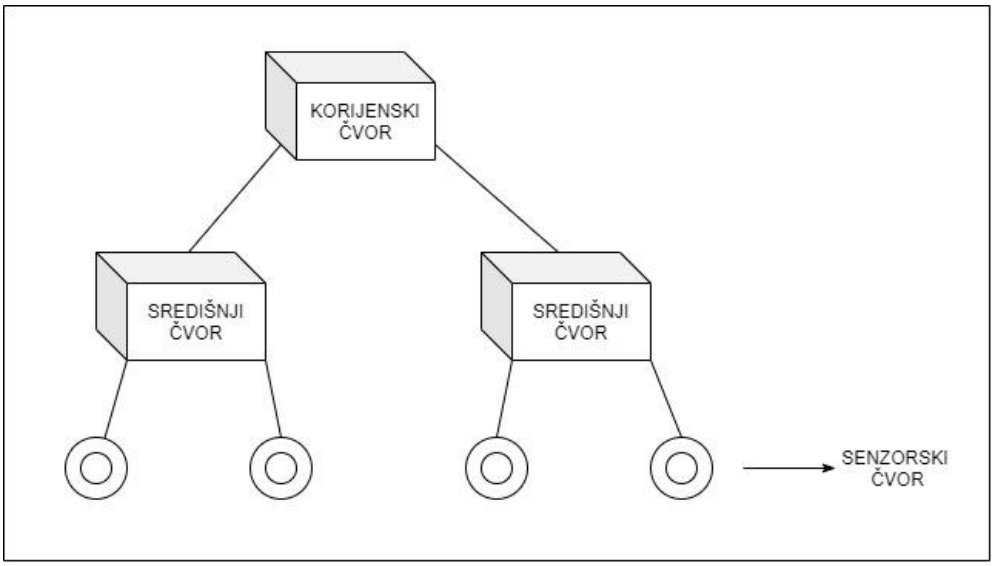


Slika 15. Sabirnička mrežna topologija
Izvor: [18]

Nedostatak sabirničke mrežne topologije vidljiv je kada više čvorova šalje podatke u isto vrijeme pri čemu postoji mogućnost sudara poruka. U slučaju sudara poruka čvor čeka neko slučajno odabrano vrijeme i zatim ponovno šalje poruku. Ukoliko dođe do prekida u sabirničkoj mrežnoj topologiji, prekida se komunikacija između svih čvorova [18].

4.1.3. Stablasta mrežna topologija

Stablastu mrežnu topologiju karakterizira središnje čvorište poznato i kao korijenski čvor koje ima funkciju glavnog komunikacijskog usmjerivača. U hijerarhiji, središnje čvorište je jednu razinu ispod korijenskog čvora te navedena niža razina čini zvjezdastu mrežu. Stablasta mrežna topologija se može smatrati hibridom zvjezdaste mrežne topologije te mrežne topologija „veza od točke do točke“ kao što je prikazano na slici 12.



Slika 16. Stablasta mrežna topologija
Izvor: [17]

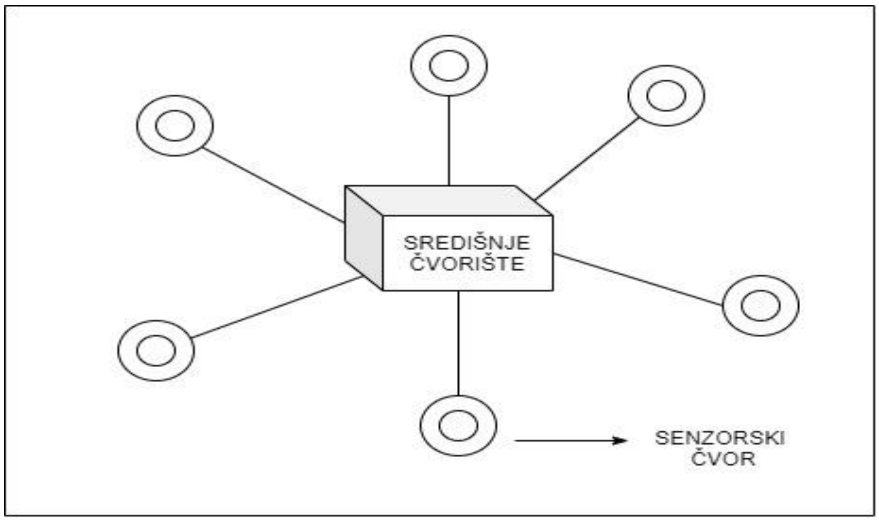
Stablastu mrežnu topologiju karakterizira piramidalna hijerarhija te postoji jasan odnos roditelj-dijete pri čemu odnos između čvorova nije jednak. U ovoj je strukturi gornji čvor mreže koordinator koji ima ulogu klastera, drugi nadređeni čvorovi su usmjerivači, a terminalni čvorovi krajnji uređaji. Prednosti stablaste mrežne topologije su sljedeće:

- Budući da je mreža hijerarhijska, vrijeme kašnjenja prijenosa podataka može se predvidjeti.
- Usmjerivač, odnosno središnji čvor, uvijek prati status vlastitih podređenih čvorova, a status veze mreže prikuplja koordinator, odnosno korijenski čvor.

S druge strane, postoji samo jedan komunikacijski put te informacije možda neće doći do odredišnog čvora ukoliko dođe do komunikacijskog kvara. Budući da se informacije agregiraju na koordinatoru, prometna zagušenja nastaju bliže koordinatoru, a iskorištenost mrežnih resursa nije uravnotežena [19].

4.1.4. Zvjezdasta mrežna topologija

U zvjezdastoj mrežnoj topologiji čvorovi senzorske mreže su povezani s centraliziranim komunikacijskim čvorištem. Cjelokupna komunikacija mora biti usmjerena kroz centralizirano čvorište te čvorovi ne mogu izravno međusobno komunicirati. Svaki čvor ima ulogu klijenta, dok je središnje čvorište poslužitelj kao što je prikazano na slici 13.

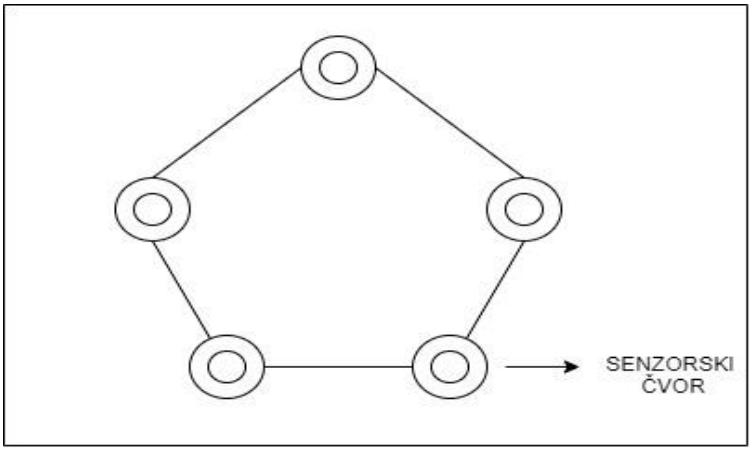


Slika 17. Zvjezdasta mrežna topologija
Izvor: [17]

S obzirom da informacija putuje samo rasponom do središnjeg čvorišta izravnom komunikacijom, vrijeme kašnjenja prijenosa podataka je kratko te rijetko dolazi do sudara informacija. S druge strane, nedostatak je što je pokrivenost mrežom relativno mala, a pouzdanost komunikacije niska, jer je moguća samo jednosmjerna komunikacija [19].

4.1.5. Prstenasta mrežna topologija

Prstenasta mrežna topologija je kružno postavljena što je vidljivo na slici 14. U ovoj se konfiguraciji svaki čvor povezuje s točno dva druga čvora i podaci se prenose u jednom smjeru od izvora do svakog čvora dok informacija ne pronađe željenog primatelja.



Slika 18. Prstenasta mrežna topologija
Izvor: [19]

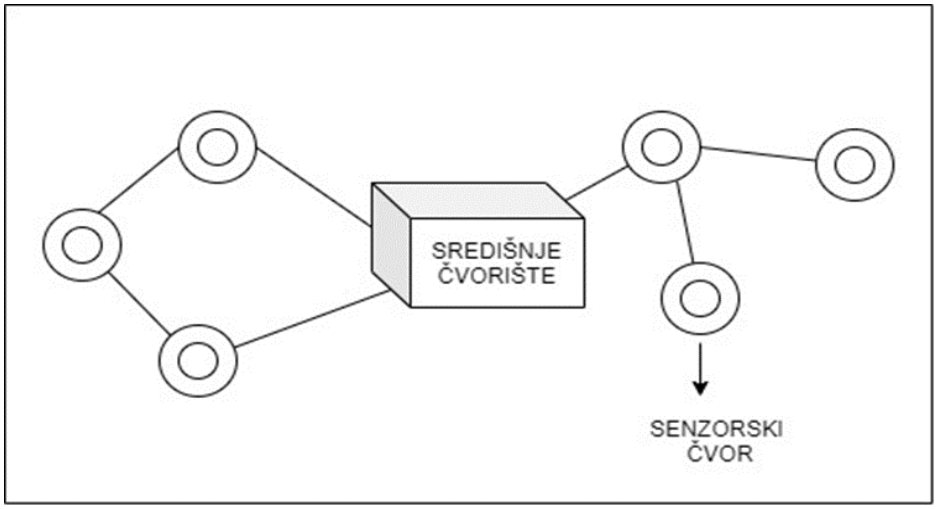
Samo susjedni senzorski čvorovi mogu komunicirati jedan s drugim. Ako je bilo koji čvor ili veza oštećen tijekom komunikacije, to se odražava smetnjama u cijeloj senzorskoj mreži. Jedna od prednosti prstenaste mrežne topologije jest da senzorska mreža ne sadrži središnji čvor te su svi senzori jednake važnosti.. Zbog konfiguracije „veza od točke do točke“ uređaja s obje strane, prilično je jednostavno instalirati i ponovno konfigurirati mrežu jer dodavanje ili uklanjanje uređaja zahtijeva pomicanje samo dvije veze [19].

4.1.6. Isprepletena mrežna topologija

Isprepletena mrežna topologija uključuje čvorove koji su povezani s više čvorova ili barem s jednim drugim čvorom. Karakterizira ju da svaki čvor može slati i primati poruke od drugih čvorova te informacija može proći bilo koji od nekoliko putova od izvorišta do odredišta. Postoje dvije vrste isprepletene mrežne topologije [20]:

- potpuna isprepletena mrežna topologija
- djelomična isprepletena mrežna topologija.

Kod potpune isprepletene mrežne topologije svaki čvor je izravno povezan sa svakim drugim čvorom čime se omogućuje slanje poruke individualnim putanjama. S druge strane, djelomično isprepletenom mrežnom topologijom nisu svi čvorovi izravno međusobno povezani što je prikazano na slici 15. Takva mrežna arhitektura ima manje ruta kojima se poruka kreće, te je jednostavnija za implementaciju.

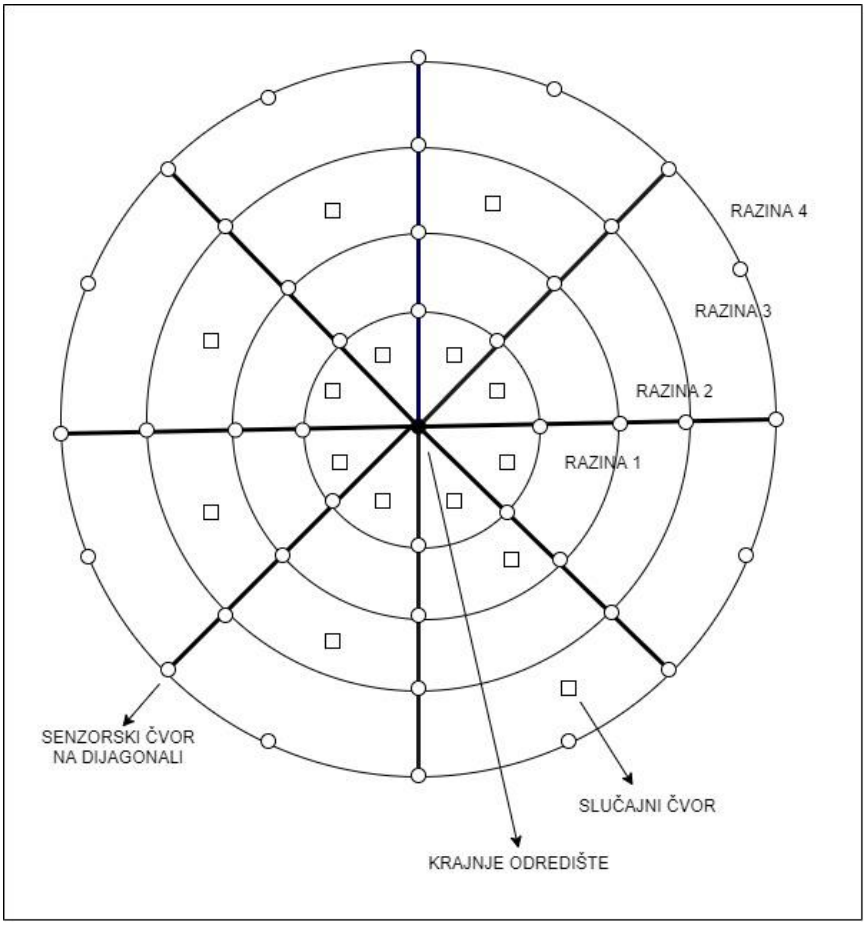


Slika 19. Isprepletena mrežna topologija
Izvor: [20]

Sastavljanje čvorova u potpunu isprepletenu mrežu omogućuje brže slanje poruka jer postoji mnogo mogućih ruta kojima će poruka putovati. Međutim, potpune isprepletene mrežne topologije imaju i svojih nedostataka poput nepraktičnog postavljanja zbog velikog broja potrebnih veza te mnogo održavanja.

4.1.7. Kružna mrežna topologija

U ovoj topologiji postoji kružno senzorsko područje u čijem se središtu nalazi krajnje odredište. Senzorski čvorovi prepoznaju događaj od interesa te prenose podatke u krajnje odredište. Čvorovi su nasumično raspoređeni ujednačene gustoće oko krajnjeg odredišta kao što je prikazano na slici 13. Ovisno o udaljenosti čvora od krajnjeg odredišta i opsegu prijenosa čvorova, poruke moraju preći putanju od jedan ili više skokova.

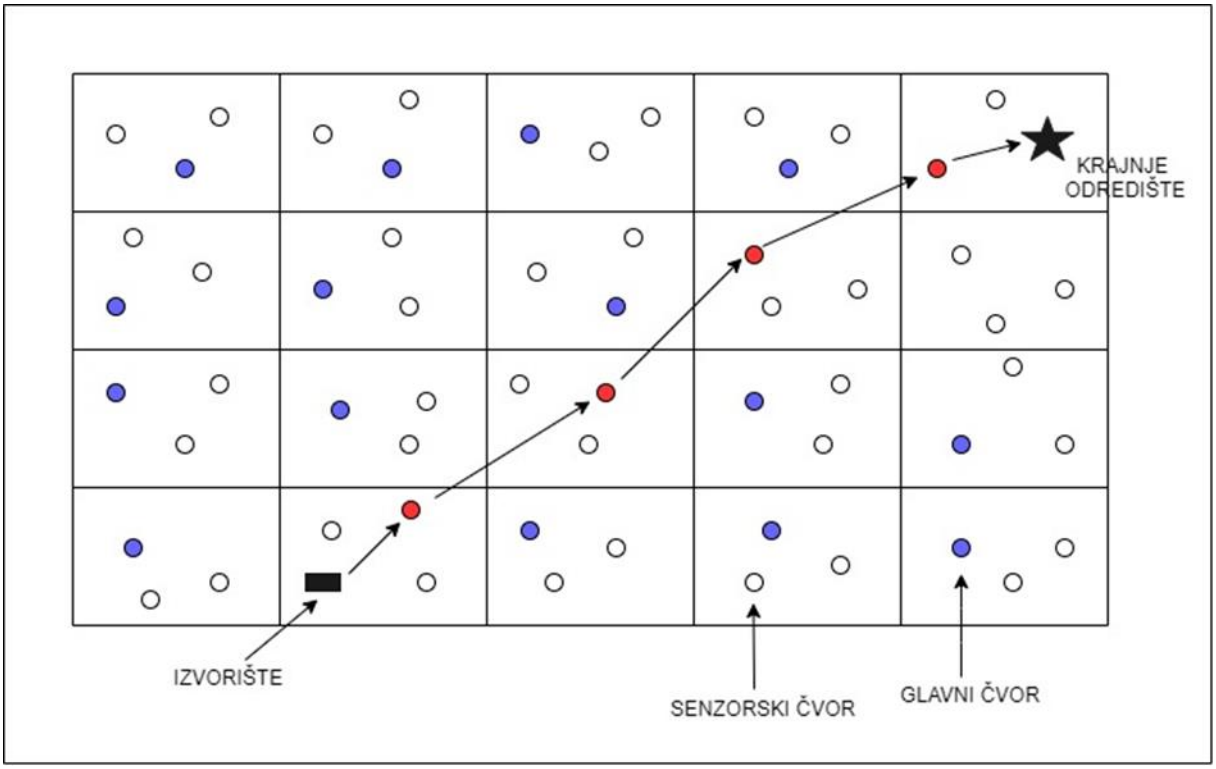


Slika 20. Kružna mrežna topologija
Izvor: [17]

Kružna mrežna topologija reducira potrošnju energije s obzirom da u određenom vremenskom intervalu samo neki čvorovi sudjeluju u komunikaciji, dok su drugi čvorovi u stanju mirovanja. Svaki senzorski čvor na dijagonali slijedi svoj izvorni put za komunikaciju te prosljeđuje pakete krajnjem odredištu [17].

4.1.8. Rešetkasta mrežna topologija

Polje rešetkaste senzorske mreže dijeli se na rešetke kao što je prikazano na slici 14. Mrežno područje podijeljeno je u kvadratnu mrežu jednake veličine koja se ne preklapa. Unutar svake mreže odabran je jedan čvor kao glava mreže koji je odgovoran za prosljeđivanje informacija o usmjeravanju i prijenos paketa podataka.



Slika 21. Rešetkasta mrežna topologija
Izvor: [17]

Rešetkasta mrežna topologija ima najpovoljniji pristup budući da se topologija mreže može dinamički konfigurirati s obzirom na izvorišne i odredišne čvorove. Također, postoji više putova između izvora i odredišta, što čini izbor puta prosljeđivanja fleksibilnim i pristup mreži osmišljen je za postizanje jednakosti čvorova u mreži [17].

4.2. Usporedba performansi topologija bežičnih senzorskih mreža

Konfiguracija odnosno topologija mreže jest ključna stavka za određivanje mrežnih performansi. Topologija mreže je način na koji je mreža uređena, uključujući fizičke i logičke putanje kojim su čvorovi međusobno povezani. U tablici 1 je prikazana usporedba izvedbe topologija s obzirom na broj ruta, učestalost kvara čvorova, ravnotežu opterećenja, zagušenja na putu paketa, omjer prijema paketa, potrošnju energije, životni vijek mreže, te pouzdanost.

Omjer prijema paketa je definiran kao postotak čvorova koji uspješno primaju paket od označenog čvora s obzirom na to da su svi primatelji unutar raspona prijenosa pošiljatelja u trenutku slanja paketa [21]. Nadalje, životni vijek mreže se definira kao vrijeme tijekom kojeg mreža radi. Drugim riječima, životni vijek mreže podrazumijeva vrijeme rada mreže tijekom kojeg je mreža sposobna izvoditi namjenske zadatke [22].

Tablica 1. Usporedba performansi mrežnih topologija

Performanse	Sabirnička mrežna topologija	Stablasta mrežna topologija	Zvjezdasta mrežna topologija	Prstenasta mrežna topologija	Isprepletena mrežna topologija	Kružna mrežna topologija	Rešetkasta mrežna topologija
Ruta	Pojedinačna	Pojedinačna	Pojedinačna	Dvostruka (u istom smjeru)	Višestruke	Višestruke	Višestruke
Kvar čvora	Često	Često	Često	Često	Rjeđe	Rjeđe	Rijetko
Ravnoteža opterećenja	Manja	Veća nego kod sabirničke	Manja nego kod stablaste	Manja	Veća	Veća	Najveća
Zagušenja na putu paketa	Često	Često	Često	Često	Rjeđe	Rjeđe	Rijetko
Omjer prijema paketa	Manji	Manji	Manji	Manji	Veći	Veći	Najveći
Potrošnja energije	Veća	Veća	Veća	Veća	Manja	Manja	Najmanja
Životni vijek mreže	Kraći	Kraći	Kraći	Kraći	Duži	Duži	Najduži
Pouzdanost	Manja	Manja	Manja	Manja	Veća	Veća	Najveća

Izvor: [17]

Vidljivo je da rešetkasta mrežna topologija ima optimalne performanse u pogledu svih kategorija. Rešetkastu mrežnu topologiju karakteriziraju višestruke putanje čime se povećava omjer prijema paketa na krajnje odredište te sama pouzdanost mreže. Ako je jedna ruta blokirana,

druga ruta se može koristiti za podatkovnu komunikaciju čime se smanjuje zagušenje u mreži, reducira se potrošnja energije, a samim tim rjeđe dolazi do kvara čvorova te je ravnoteža opterećenja najveća. Slične karakteristike imaju isprepletena i kružna mrežna topologija u bežičnim senzorskim mrežama. S druge strane, sabirničku, stablastu, zvjezdastu i prstenastu mrežnu topologiju označavaju pojedinačne putanje gdje kvar jednog čvora uzrokuje kvar cijele mreže. Samim time dolazi do češćih zagušenja u mreži, veće potrošnje energije, manjeg omjera prijema paketa, kraćeg životnog vijeka mreže te manje pouzdanosti bežične senzorske mreže.

5. Izazovi u usmjeravanju i klasifikacija protokola usmjeravanja

Unatoč mnogobrojnim i različitim primjenama, glavni zadatak svih bežičnih senzorskih čvorova jest reagiranje na podražaje iz okoline, prikupljanje podataka iz ciljane domene te prosljeđivanje podatkovnih paketa do krajnjeg odredišta. Jedan od glavnih ciljeva projektiranja bežičnih senzorskih mreža jest provođenje podatkovne komunikacije uz duži životni vijek mreže te sprječavanje degradacije povezivanja primjenom agresivnih tehnika upravljanja energijom. Za kvalitetno postizanje ovog zadatka potreban je energetski učinkovit protokol usmjeravanja za postavljanje ruta između čvorova senzora i krajnjeg odredišta.

5.1. Izazovi u usmjeravanju i dizajniranju protokola usmjeravanja

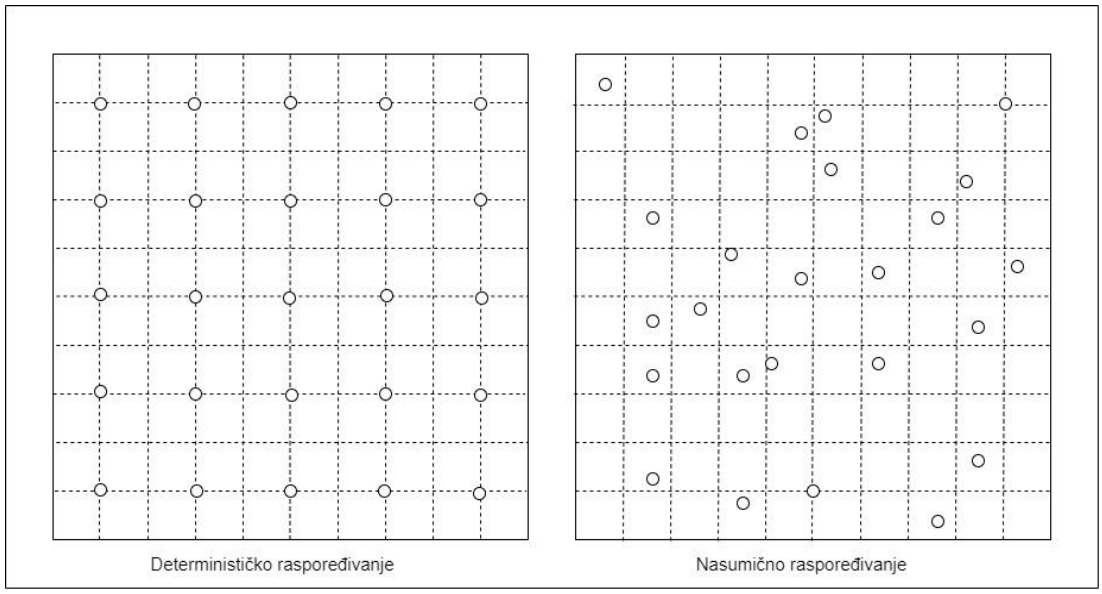
Bežične senzorske mreže karakteriziraju ograničena opskrba energijom, manja računalna snaga te limitirana propusnost bežičnih veza koje povezuju čvorove senzora. Karakteristike okruženja unutar kojeg čvorovi senzora rade, zajedno s ograničenjima resursa i energije, čine usmjeravanje u bežičnim senzorskim mrežama izrazito kompleksnim. Na usmjeravanje i dizajn protokola usmjeravanja u bežičnim senzorskim mrežama utječu sljedeći čimbenici [23]:

- raspoređivanje čvorova
- energetska učinkovitost
- model isporuke podataka
- heterogenost senzorskih čvorova
- tolerancija na kvarove
- skalabilnost
- mrežna dinamika
- pokrivenost mreže i povezivost senzorskih čvorova
- agregacija podataka
- kvaliteta usluge.

5.1.1. Raspoređivanje čvorova

Raspoređivanje čvorova predstavlja temeljni kriterij za efikasno funkcioniranje bežičnih senzorskih mreža. Pravilna shema raspoređivanja čvorova pridonosi boljoj povezanosti i komunikaciji među čvorovima čime se minimizira potrošnja energije te produžuje vijek trajanja bežične senzorske mreže.

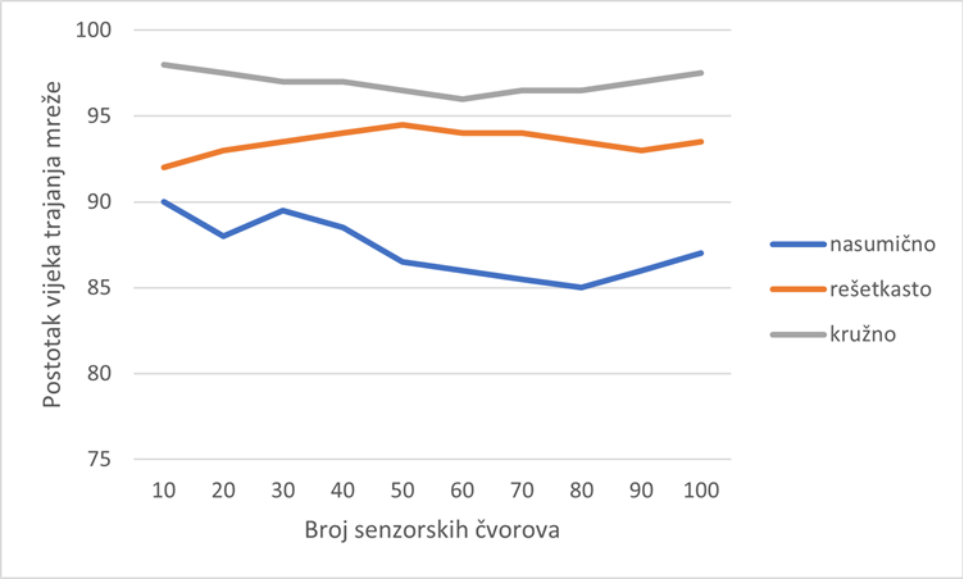
Čvorovi bežične senzorske mreže su raspoređeni na različite načine u različitim scenarijima primjene. Postoje dvije vrste raspoređivanja senzorskih čvorova: determinističko raspoređivanje i nasumično raspoređivanje. Deterministička shema omogućuje postavljanje senzorskih čvorova na unaprijed određene položaje u poznatom aplikacijskom i kontroliranom okruženju poput poslovnih institucija, tvornica i bolnica. S druge strane, u nasumičnom raspoređivanju se obično primjenjuje više čvorova koji zahtijevaju složenije mehanizme raspoređivanja senzora [24]. Na slici 18 prikazano je determinističko raspoređivanje gdje se paketi usmjeravaju putem unaprijed određenih puteva te nasumično raspoređivanje koje karakteriziraju nasumično razbacani senzorski čvorovi.



Slika 22. Determinističko i nasumično raspoređivanje senzorskih čvorova
Izvor: [25]

Ako nasumična raspodjela čvorova nije jednolika, optimalno grupiranje postaje potrebno kako bi se omogućila povezanost i energetski učinkovit rad mreže. Komunikacija između senzora obično je unutar kratkih raspona prijenosa zbog ograničenja energije i propusnosti te se odvija putem više skokova.

Na grafikonu 1 vidljiv je postotak trajanja životnog vijeka mreže u odnosu na broj senzorskih čvorova u mreži i mogućnosti raspoređivanja senzorskih čvorova. Na temelju analitičkih i simulacijskih rezultata dokazano je da nasumično raspoređivanje ima manje područje pokrivanja s većim brojem čvorova raspoređenih na nejednakim udaljenostima što dovodi do veće iskorištenosti energije te smanjenja ukupnog vijeka trajanja mreže. Rešetkasta i kružna mrežna arhitektura imaju veće područje pokrivanja s manjim brojem čvorova raspoređenih na jednakim udaljenostima što jamči uštedu energije i dulji životni vijek mreže.



Grafikon 1. Odnos između postotka vijeka trajanja mreže i broja senzorskih čvorova
Izvor: [25]

5.1.2. Energetska učinkovitost

Najveći izazov tijekom dizajniranja protokola usmjeravanja za bežičnu senzorsku mrežu predstavlja energetska učinkovitost. Svaki čvor senzora se oslanja na svoju ograničenu baterijsku snagu za prikupljanje, obradu, prijenos i prijem podataka, te baterije čvorova senzora nije izvedivo zamijeniti ili napuniti. Prema tome, vijek trajanja senzorskih čvorova pokazuje snažnu ovisnost o vijeku trajanja baterije. Svaki čvor senzora ima različitu stopu potrošnje energije zbog nejednakosti prilikom detekcije događaja i različitih udaljenosti do bazne stanice. To dovodi do razlika u potrošnji energije između čvorova senzora u mreži, što zauzvrat skraćuje životni vijek mreže. Kao rezultat, ta ograničenja nameću važan zahtjev bilo kojem QoS mehanizmu potpore koji se koriste za procjenu performansi mreže.

Senzorske čvorove karakteriziraju tri načina rada koja troše energiju: detekcija događaja, obrada podataka i komunikacijski proces. Od tri načina rada, maksimalna energija troši se na komunikacijski proces odnosno proces prosljeđivanja podataka. Osjetilnoj jedinici povjerena je odgovornost za otkrivanje fizičkih karakteristika okoliša te ima potrošnju energije koja ovisi o prirodi hardvera i primjenama. Međutim, energija koju troši osjetilna jedinica senzorskog čvora predstavlja oskudan postotak cjelokupne potrošnje energije u cijeloj bežičnoj senzorskoj mreži. U usporedbi s tim, energija potrebna za obradu podataka je puno veća [26].

5.1.3. Model isporuke podataka

Protokoli usmjeravanja su pod velikim utjecajem modela isporuke podataka s obzirom na potrošnju energije i stabilnost rute. Model isporuke podataka se može kategorizirati na [1]:

- Vremenski zasnovan model isporuke podataka koji je prikladan aplikacijama koje zahtijevaju periodično praćenje podataka.
- Model isporuke podataka vođen događajima pri čemu se odmah reagira na iznenadne i drastične promjene.
- Model isporuke podataka na temelju upita koji podrazumijeva odgovaranje na upite generirane od strane bazne stanice ili drugog čvora u mreži.

U modelima isporuke podataka temeljenim na događajima i upitima, čvorovi senzora odmah reagiraju na promjene vrijednosti osjetnog atributa uslijed pojave određenog događaja te su oni vrlo pogodni za vremenski kritične primjene. Štoviše, moguća je i kombinacija navedenih modela što dovodi do pojave hibridnog modela isporuke podataka.

5.1.4. Heterogenost senzorskih čvorova

Ovisno o različitoj mogućnosti primjene, čvorovi senzora se mogu razlikovati po svojim ulogama i energetskom kapacitetu. Prema tome, postojanje heterogenog skupa senzora postavlja mnoga tehnička pitanja vezana uz usmjeravanje podataka. Na primjer, neke aplikacije mogu zahtijevati mnoštvo različitih senzora za praćenje temperature, tlaka i vlažnosti zraka u fizičkom okruženju, otkrivanje kretanja zvučnim signalima i praćenje objekata putem snimljene slike ili videozapisa. Navedeni senzori se mogu postaviti neovisno ili različite funkcionalnosti mogu biti uključene u iste čvorove senzora. Također, prikupljanje i isporuka podataka mogu biti generirani

iz ovih senzora različitim brzinama te podložni različitim ograničenjima kvalitete usluge. Štoviše, hijerarhijsku arhitekturu bežične senzorske mreže karakterizira čvor glave klastera koji je različit od ostalih senzora. Prema tome, hijerarhijski protokoli usmjeravanja mogu odabrati glavu klastera iz raspoređenih senzora pri čemu glava klastera ima veće kapacitete u smislu energije, propusnosti i memorije [1].

5.1.5. Tolerancija na kvarove

Kvar čvora senzora te nedostatak komunikacijske veze ili podataka su neizbježni u bežičnim senzorskim mrežama. Navedene probleme uzrokuju različiti čimbenici poput okolišnih smetnji, fizičkih oštećenja, nedostatka napajanja i mnogih drugih. Sposobnost mreže da pruži željenu razinu funkcionalnosti bez prekida čak i ako postoje greške u mreži se naziva tolerancija na kvarove.

Protokoli usmjeravanja moraju omogućiti stvaranje novih veza između čvorova i ruta do baznih stanica za prikupljanje i usmjeravanje podataka. To može zahtijevati aktivno podešavanje prijenosnih snaga na postojećim vezama radi smanjenja potrošnje energije ili preusmjeravanja paketa u područja mreže u kojima je dostupno više energije. Prema tome, potrebno je više razina redundancije kako bi bežična senzorska mreža bila tolerantna na kvarove [1]

5.1.6. Skalabilnost

Kako se usmjeravanje paketa unutar bežične senzorske mreže događa na čvorovima koji imaju vrlo ograničene resurse za pohranu podataka i ažuriranje tablica usmjeravanja, proces usmjeravanja predstavlja vrlo izazovno pitanje. Stoga je, kako bi se reducirala navedena ograničenja, potreban učinkovit i skalabilan dizajn protokola usmjeravanja za usmjeravanje paketa u bežičnim senzorskim mrežama. Takvi protokoli usmjeravanja trebaju izbjegavati pogoršanje performansi bežičnih senzorskih mreža kako se mreža širi. Skalabilnost senzorskih mreža podrazumijeva podržavanje proširenja mreže uključivanjem više čvorova koji se ne mogu predvidjeti tijekom početne faze projektiranja mreže. Protokoli usmjeravanja bi trebali podržavati mrežnu skalabilnost tako što bi s porastom mreže i opterećenja radili jednako efikasno kao i prije. Procjena skalabilnosti bežičnih senzorskih mreža pravi je izazov zbog raznolikosti protokola usmjeravanja, velikog broja čvorova i širokog spektra aplikacija senzorskih mreža.

5.1.7. Mrežna dinamika

Iako većina mrežnih arhitektura pretpostavlja statične čvorove senzora, mobilnost senzorskih čvorova ili bazne stanice je potrebna u mnogim aplikacijama. U mobilnim senzorskim mrežama različiti dinamički uvjeti okoliša utječu na mrežne performanse. Pomicanje čvora uzrokovano utjecajima iz mrežnog okruženja čini senzore posebno ranjivim na kvarove ruta, što nadalje utječe na učinkovitost i pouzdanost mobilnih mreža. Stoga je mobilnost važan čimbenik u dizajniranju protokola usmjeravanja jer stabilnost rute predstavlja jedan od ključnih kriterija za stabilnu mrežu.

Štoviše, osjetni fenomen može, ovisno o aplikaciji, biti dinamičan ili statičan. Praćenje statičkih događaja omogućuje da mreža radi u reaktivnom načinu rada, jednostavno generirajući promet prilikom izvještavanja. S druge strane, dinamični događaji u većina aplikacija zahtijevaju periodično izvještavanje i posljedično generiraju značajan promet za usmjeravanje do krajnjeg odredišta [23].

5.1.8. Pokrivenost i povezivost senzorskih čvorova

S obzirom da senzorski čvorovi mogu komunicirati samo na kratke udaljenosti, komunikacija kroz više skokova se koristi se za prijenos detektiranih mjerenja do udaljene bazne stanice. Prema tome, pokrivenost senzorskog polja senzorskim čvorovima i povezivost čvorova predstavljaju ključne kriterije za funkcioniranje bežičnih senzorskih mreža. Pokrivenost senzorske mreže je mjera koja predstavlja koliko dobro senzorski čvorovi nadziru područja interesa u kojem su raspoređeni. S druge strane, povezivost senzorskih čvorova predstavlja koliko dobro senzorski čvorovi međusobno komuniciraju. Karakterizacija ove dvije mjere pomaže u izgradnji kvalitetnije senzorske bežične mreže za različite primjene. Problem pokrivenosti može se formulirati kao problem optimizacije gdje se teži maksimiziranju životnog vijeka mreže održavajući povezivost senzorskih čvorova uz minimalnu pokrivenost mreže.

5.1.9. Agregacija podataka

Senzorski čvorovi prilikom prikupljanja prometa često generiraju značajne suvišne podatke. Slični paketi iz više čvorova se mogu objediniti čime se smanjuje broj prijenosa i reducira potrošnja energije. Navedeni proces se naziva agregacija podataka te obuhvaća prikupljanje i objedinjavanje korisnih podataka prema određenoj funkciji udruživanja. Udruživanje podataka se koristi za

postizanje energetske učinkovitosti, uštedu ograničenih resursa i optimizaciju prijenosa podataka u brojnim protokolima usmjeravanja.

U istorazinskim mrežama svaki čvor senzora ima istu ulogu i opremljen je baterijom približno istih kapaciteta. U takvim mrežama agregacija podataka je postignuta usmjeravanjem temeljenom na podacima gdje krajnje odredište obično prenosi poruku upita do senzorskog čvora koji željene podatke šalje natrag krajnjem odredištu. Izbor određenog komunikacijskog protokola ovisi o konkretnoj primjeni bežične senzorske mreže. S druge strane, agregacija podataka u hijerarhijskim mrežama podrazumijeva skupljanje podataka na posebnim čvorovima, što smanjuje broj poruka prenesenih do krajnjeg odredišta. Time se poboljšava energetska učinkovitost mrežnog rada te smanjuje opterećenje krajnjeg odredišta [27].

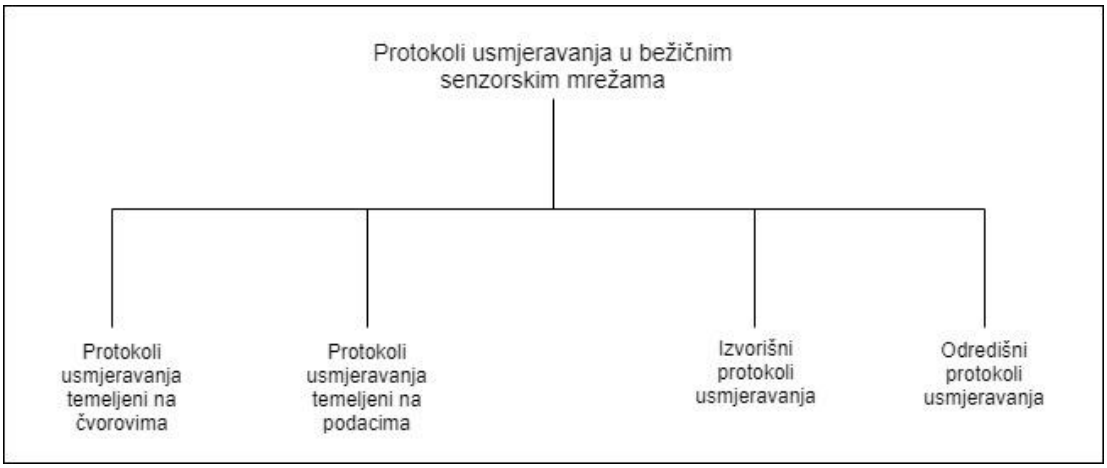
5.1.10. Kvaliteta usluge

Za razliku od tradicionalne mreže, senzorska mreža podržava više vrsta usluga te iz tog razloga pruža različite kvalitete usluge. Vrste usluga se kreću od konstantne brzine prijenosa (CBR, eng. *Constant Bit Rate*) koja jamči propusnost, kašnjenje i kolebanje kašnjenja (eng. j*itter*) do neodređene brzine prijenosa (UBR, eng. *Unspecified Bit Rate*) koja praktički ne nudi nikakva jamstva [28].

Kvaliteta usluge u bežičnim senzorskim mrežama se dijeli na dvije perspektive: kvaliteta usluge specifična za aplikaciju te kvaliteta usluge specifična za mrežu. Aplikacijski dio se odnosi na QoS parametre specifične za aplikaciju kao što su implementacija i pokrivenost senzorskog polja te broj aktivnih čvorova senzora. Kvaliteta usluge specifična za mrežu se odnosi na to kako komunikacijska mreža može zadovoljiti potrebe aplikacija uz učinkovito korištenje mrežnih resursa, poput propusnosti i potrošnje energije.

5.2. Sistematizacija protokola usmjeravanja

Protokoli usmjeravanja definiraju kako će čvorovi međusobno komunicirati i kako će se informacije širiti kroz mrežu. Postoji mnogo načina za klasifikaciju protokola usmjeravanja u bežičnim senzorskim mreža [29]. Osnovna klasifikacija protokola usmjeravanja prikazana je na slici 19.



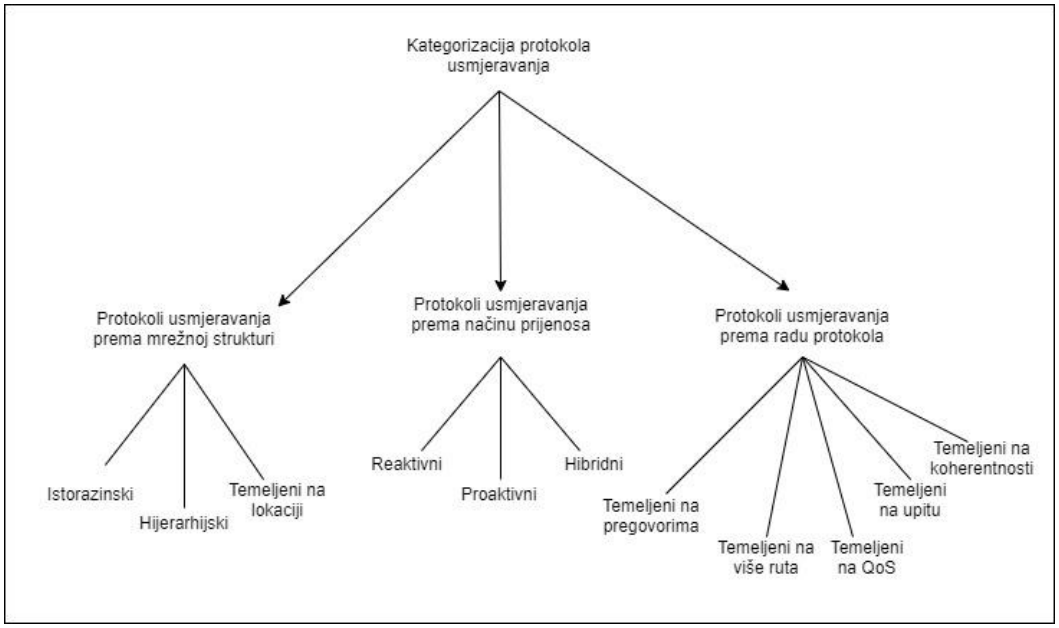
Slika 23. Osnovna klasifikacija protokola usmjeravanja
Izvor: [29]

Krajnji čvor šalje upite u određena područja bežične senzorske mreže gdje se podaci izabiru temeljem atributa potrebnih za specificiranje svojstava podataka. U tradicionalnom usmjeravanju baziranom na adresama, rute se stvaraju između adresabilnih čvorova temeljem mehanizama mrežnog sloja. Zbog velikog broja čvorova u bežičnim senzorskim mrežama nije praktično dodijeliti globalne identifikatore svakom čvoru. Zajedno s potencijalnim slučajnim raspoređivanjem senzorskih čvorova, navedeni razlozi otežavaju odabir određenih područja bežičnih senzorskih mreža za primljeni upit. To je dovelo do razvoja usmjeravanja temeljenog na podacima čiji protokoli usmjeravanja mogu odabrati skup čvorova senzora i koristiti agregaciju podataka tijekom prijenosa podatkovnih paketa. S druge strane, protokoli usmjeravanja temeljeni na čvorovima pripadaju skupini hijerarhijskih protokola koje karakteriziraju klasteri sastavljeni od senzorskih čvorova pri čemu je jedan čvor definiran kao glava klastera i ima ulogu usmjerivačkog čvora unutar mreže.

Nadalje, izvorišne protokole usmjeravanja karakterizira izvorni čvor koji se oglašava kada ima podatke za dijeljenje, a zatim se generira ruta od izvorišnog do odredišnog čvora. Suprotno tome, odredišni protokoli usmjeravanja koriste tablice koje sadržavaju odredišne redne brojeve za održavanje ruta i prosljeđivanje podataka [29].

Za prijenos podataka u senzorskim mrežama koriste se dvije tehnike: preplavljivanje i prenošenje. Preplavljivanje karakterizira emitiranje primljenog paketa podataka svim ostalim susjedima u mreži. Proces emitiranja se nastavlja sve dok nije zadovoljen jedan od dva sljedeća uvjeta: paket je uspješno stigao do svog odredišta ili dosegnut je najveći broj skokova paketa.

Glavne prednosti preplavljivanja su jednostavnost implementacije i usmjeravanja. Nedostaci su implozija koja nastaje ukoliko čvor isporučuje pakete bez obzira jesu li već primili kopiju paketa s drugog mjesta te mogućnost korištenja nepotrebnih resursa. Suprotno tome, prenošenje je naprednija verzija preplavljivanja. Čvor senzora, koji prima podatkovni paket, proizvoljno prenosi primljeni paket odabranom susjedu. Na sljedećem skretanju, senzorski čvorovi opet nasumično odabiru druge čvorove i šalju im podatke. Na ovaj način ne dolazi do implozije paketa, ali dolazi do većeg kašnjenja paketa. Glavne kategorije protokola usmjeravanja u bežičnim senzorskim mrežama prikazane su na slici 20.



Slika 24. Kategorizacija protokola usmjeravanja
Izvor: [29]

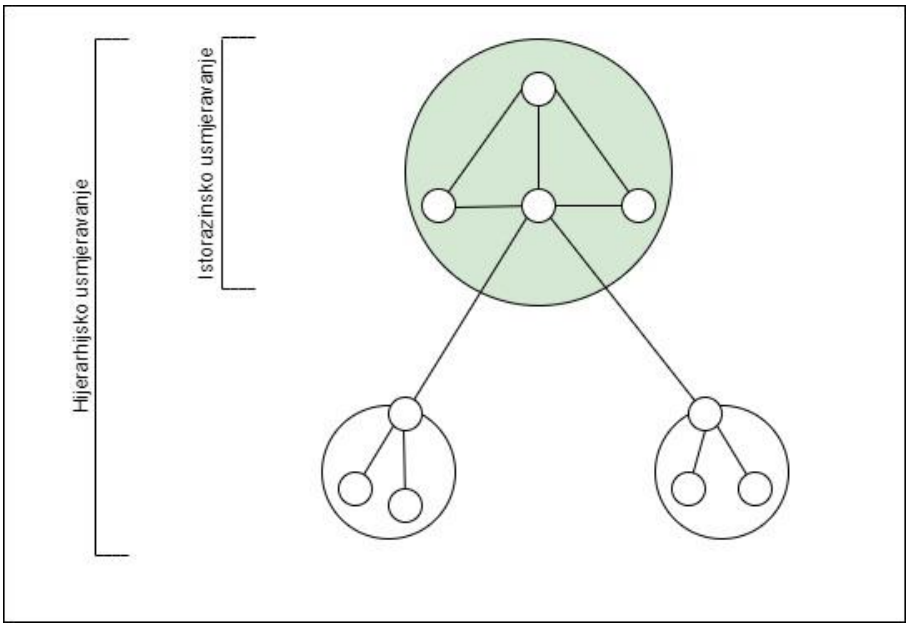
5.2.1. Protokoli usmjeravanja prema mrežnoj strukturi

U skladu s rasporedom mrežnih elemenata unutar mreže, protokole usmjeravanja prema mrežnoj strukturi se dijele na:

- istorazinski protokoli usmjeravanja
- hijerarhijski protokoli usmjeravanja
- protokoli usmjeravanja temeljeni na lokaciji.

Protokol istorazinskog usmjeravanja je mrežni komunikacijski protokol u kojem se svi senzorski čvorovi jednako tretiraju. Podatkovni paketi se usmjeravaju između međusobno povezanih senzorskih čvorova bez uspostavljene hijerarhije ili organizacije između istih. Protokoli istorazinskog usmjeravanja ne rade prema unaprijed definiranom mrežnom rasporedu čime omogućuju isporuku paketa među čvorovima putem bilo koje dostupne rute bez razmatranja hijerarhije, distribucije i sastava mreže. S druge strane, hijerarhijski protokoli usmjeravanja koji se temelje na klasterima dijele mrežu na više klastera te pritom definiraju hijerarhije između senzorskih čvorova. Svaki senzorski čvor prikuplja informacije i prosljeđuje ih glavi klastera koja prikupljene informacije prosljeđuje glavnoj baznoj stanici na temelju unaprijed definiranog algoritma usmjeravanja [29].

Na slici 21 ilustrirana je razlika između istorazinskog i hijerarhijskog usmjeravanja u bežičnoj senzorskoj mreži. Vidljivo je da se u istorazinskim mrežama svaki dolazni paket šalje na svaku odlaznu rutu izuzev putanje kojom je stigao čime se generira ogroman broj dupliciranih paketa. Hijerarhijsko usmjeravanje predstavlja efikasno rješenje za smanjenje potrošnje energije u bežičnim senzorskim mrežama zbog smanjenja redundantnog prijenosa podataka. Osim toga, omogućuje ravnotežu opterećenja među čvorovima senzora dodjeljujući različite zadatke za svaki čvor senzora prema njegovim mogućnostima.



Slika 25. Komparacija istorazinskog i hijerarhijskog usmjeravanja
Izvor: [30]

U usmjeravanju temeljenom na lokaciji izvorišni čvor, koji posjeduje paket za slanje, dodaje odredišno mjesto u svaki podatkovni paket. Posrednički čvorovi na ruti primaju paket i prosljeđuju ga susjednim čvorovima koji su zemljopisno najbliži odredištu jednim skokom. Proces se nastavlja sve dok odredišni čvor ne primi podatkovni paket. Protokoli usmjeravanja temeljeni na lokaciji imaju niske komunikacijske troškove te ne zahtijevaju uspostavu ili održavanje ruta. Štoviše, usmjeravanje na temelju lokacije štedi energetske resurse i propusnost jer prosljeđivanje nije potrebno nakon udaljenosti od jednog skoka [31].

5.2.2. Protokoli usmjeravanja prema načinu prijenosa

Jedna od klasifikacija protokola usmjeravanja za bežične senzorske mreže jest prema načinu na koji se informacije prikupljaju te na načinu kako se ti podaci koriste za izračunavanje ruta. Protokoli usmjeravanja prema načinu prijenosa podatkovnih paketa se mogu podijeliti na sljedeće strategije usmjeravanja:

- proaktivni protokoli usmjeravanja
- reaktivni protokoli usmjeravanja
- hibridni protokoli usmjeravanja.

Proaktivne protokole usmjeravanja karakterizira periodično širenje informacija o usmjeravanju radi održavanja dosljednih i točnih tablica usmjeravanja na svim čvorovima mreže. Tablice usmjeravanja se održavaju za cijelu mrežu prenošenjem mrežnih informacija putem ruta koje su unaprijed definirane prije njihove uporabe. S druge strane, reaktivne strategije usmjeravanja uspostavljaju rute prema ograničenom skupu odredišta na zahtjev. Reaktivni protokoli ne održavaju cijelu topologiju mreže, nego se aktiviraju na zahtjev kada bilo koji čvor želi poslati podatke na drugi čvor. Na taj način se stvaraju rute pri pokretanju upita.

Hibridne strategije karakterizira hijerarhijska mrežna arhitektura gdje je mreža podijeljena na klastere koji se dinamički održavaju ukoliko se senzorski čvorovi pridruže klasteru ili napuste dodijeljene klastere. Hibridni protokoli usmjeravanja najčešće koriste proaktivno usmjeravanje unutar klastera te reaktivno usmjeravanje između klastera. Glavni izazov hibridnih strategija jest redukcija režijskih troškova potrebnih za održavanje klastera [29].

5.2.3. Protokoli usmjeravanja prema načinu rada

Aplikacije bežičnih senzorskih mreža su kategorizirane prema svojim funkcionalnostima. Sukladno tome, protokoli usmjeravanja su razvrstani prema djelovanju kako bi zadovoljili te funkcionalnosti. Razlog za njihovu klasifikaciju je postizanje optimalnih performansi i ušteda oskudnih resursa mreže. Protokoli prema načinu rada se dijele u sljedeće skupine:

- protokoli usmjeravanja temeljeni na pregovorima
- protokoli usmjeravanja temeljeni na više ruta
- protokoli usmjeravanja temeljeni na kvaliteti usluge
- protokoli usmjeravanja temeljeni na upitu
- protokoli usmjeravanja temeljeni na koherentnosti.

Protokole usmjeravanja temeljene na pregovorima karakterizira visoka razina deskriptora za pregovaranje između senzorskih čvorova kako bi se smanjile duplicirane informacije i izbjegli suvišni podaci. Općenito, pregovaranje se obavlja prije stvarnog prijenosa podataka između izvorišnog i odredišnog čvora [32]. Također, podaci koje deskriptori imenuju se nazivaju metapodaci te se koriste u pregovorima kako bi se uštedila energija i mrežni resursi.

Višesmjerno usmjeravanje koristi više ruta za prijenos podataka, čime se može postići uravnoteženje opterećenja i tolerancija grešaka. Postoje dvije različite vrste protokola usmjeravanja temeljenih na više ruta: podijeljeno usmjeravanje i isprepleteno usmjeravanje. Podijeljeno usmjeravanje podrazumijeva alternativne puteve koji se međusobno ne sijeku. S druge strane, većina metoda usmjeravanja su primjenjive samo na mreže s gustom distribucijom čvorova te se izvedba opisane metode usmjeravanja ne može jamčiti u mreži s rijetkim rasporedom čvorova. Umjesto korištenja alternativne staze, isprepleteno višeslojno usmjeravanje poboljšava pouzdanost stvaranjem rezervnog čvora za svaki čvor na glavnoj stazi. Ako bilo koji čvor na primarnoj putanji ne uspije, rezervni čvor koristi se za osiguravanje povezivanja izvorišnog i odredišnog čvora.

Zadatak protokola usmjeravanja temeljenih na kvaliteti usluge jest pronalazak rute od izvorišta do odredišta koja zadovoljava razinu metrika povezanih s dobrom kvalitetom usluge, poput protoka i isporuke podataka, potrošnje energije i kašnjenja te optimalnog korištenja mrežnih resursa. Protokoli bazirani na kvaliteti usluge su usredotočeni na ravnotežu između razine QoS parametara i potrošnje energije.

U protokolima usmjeravanja temeljenim na upitu odredišni čvor generira upite za pronalaženje detektiranih podražaja među senzorskim čvorovima unutar bežične senzorske mreže. Odredišni čvor šalje upit od interesa za primanje određenih informacija, a izvorišni čvor detektira događaje i šalje ih natrag čvoru koji je pokrenuo zahtjev. Strategije koje se koriste za usmjeravanje upita i generiranih odgovora mogu se klasificirati u dvije velike skupine: protokole usmjeravanja usredotočene na uštedu energije i protokole usmjeravanja usredotočene na uravnoteženu potrošnju energije. Protokoli usmjeravanja bazirani na uštedi energije pokušavaju smanjiti potrošnju energije mreže u cjelini i time povećati radni vijek što pritom obično dovodi do korištenja najkraćih putova. S druge strane, protokoli usmjeravanja bazirani na uravnoteženu potrošnju energije nastoje izbalansirati potrošnju energije senzorskih čvorova kako bi spriječili dijeljenje mreže [33].

Koherentni i nekoherentni protokoli usmjeravanja predstavljaju protokole usmjeravanja temeljene na obradi podataka. U nekoherentnoj obradi podataka čvorovi vrše lokalnu obradu sirovih podataka prije slanja podataka drugim čvorovima na daljnju obradu. Suprotno tome, u koherentnom usmjeravanju, podaci se prosljeđuju čvorovima zaduženim za agregaciju podataka nakon minimalne obrade poput označavanja i odbacivanja duplikata [34].

6. Analiza kriterija za odabir protokola usmjeravanja i komparativna analiza performansi

Senzorske aplikacije zahtijevaju komunikaciju čvorova za izvršavanje određenih procedura ili algoritama. Algoritam usmjeravanja pokreće se prema podacima zabilježenim u tablici usmjeravanja kako bi se izračunao optimalni put od izvorišta do odredišta. Prema [35] tri vrste algoritama mogu se izvesti na bežičnim senzorskim mrežama [35]:

- Centralizirani algoritmi koji se izvode u čvoru koji posjeduje informacije o cijeloj mreži te se rijetko koriste zbog visokih troškova prijenosa informacija.
- Distribuirani algoritmi koji podržavaju prosljeđivanje podatkovnih paketa između čvorova. Karakterizira ih decentraliziranost čvorova jer nijedan čvor ne posjeduje informacije o ostatku mreže.
- Lokalni algoritmi koji se izvode u jednom čvoru te primaju informacije o usmjeravanju korištenjem lokalnih podataka.

Paradigma algoritma važan je faktor koji treba uzeti u obzir pri odabiru protokola usmjeravanja koji će se koristiti u bežičnoj senzorskoj mreži. Ukoliko se koriste lokalizirani algoritmi, protokol usmjeravanja bi trebalo ojačati i optimizirati komunikaciju između susjednih čvorova. S druge strane, za centralizirane algoritme kombiniranje podatkovnih paketa koji istovremeno idu do središnjeg čvora može biti prednost. Nadalje, distribuirani algoritmi trebaju učinkovito podržavati komunikaciju između bilo koja dva para čvorova.

Štoviše, mrežna arhitektura korištena u bežičnoj senzorskoj mreži predstavlja ključni kriterij za odabir protokola usmjeravanja. Prema tome, istorazinski protokoli usmjeravanja se uglavnom koriste u homogenim mrežama gdje su svi čvorovi istih karakteristika i funkcionalnosti. Heterogene mreže većinom primjenjuju hijerarhijske protokole usmjeravanja gdje su određeni čvorovi u mreži superiorniji nad drugima. Usmjeravanje na temelju lokacije korisno je u aplikacijama u kojima je položaj odredišnog čvora unutar zemljopisnog područja mreže relevantan za upit koji je poslao izvorišni čvor.

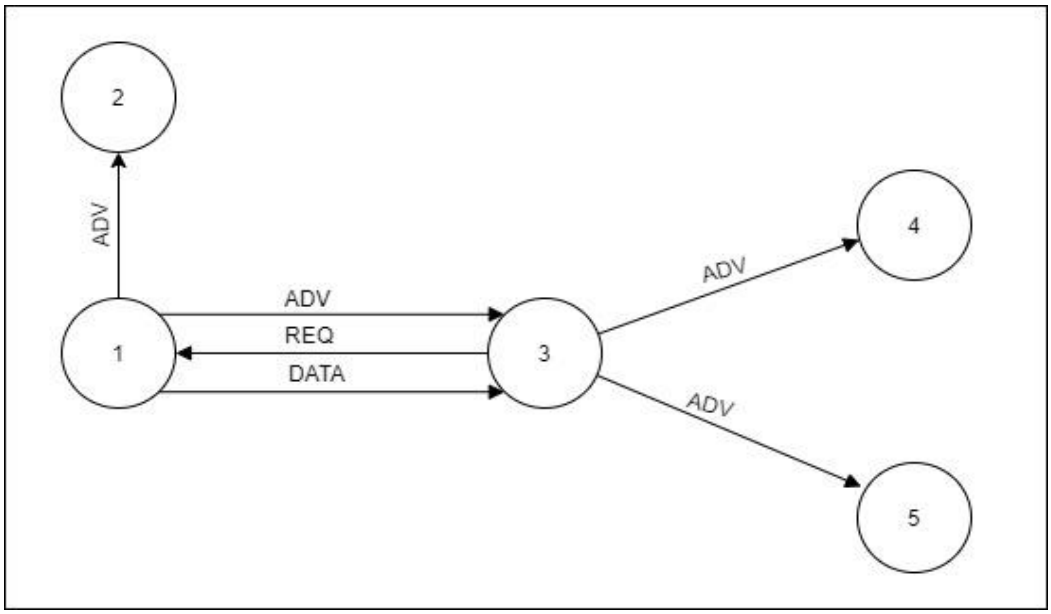
Među najpoznatijim hijerarhijskim protokolima usmjeravanja ističu se sljedeći protokoli: PEGASIS (eng. *The power-efficient gathering in sensor information systems*), LEACH (eng. *Low energy adaptive clustering hierarchy*), TEEN (eng. *Threshold sensitive energy efficient sensor*

network) i APTEEN (eng. *Adaptive threshold sensitive energy efficient network*). Nadalje, najpoznatiji predstavnici istorazinskih protokola usmjeravanja su DD (eng. *Direct diffusion*) i SPIN (eng. *Sensor protocol information via negotiation*). Također, primjeri protokola usmjeravanja temeljenih na lokaciji su GEAR (eng. *Geographical and energy aware routing*) i GAF (engl. *Geographic adaptive fidelity*) [29]. Karakteristike navedenih protokola usmjeravanja te njihove performanse prikazane su u nastavku.

6.1. SPIN

Najpoznatiji predstavnik kategorije istorazinskih protokola usmjeravanja je SPIN koji također pripada protokolima usmjeravanja temeljenim na pregovorima, upitu i postojanju više ruta. Glavni cilj SPIN protokola je učinkovito prosljeđivanje prikupljenih zapažanja pojedinačnih senzorskih čvorova svim ostalim čvorovima u mreži.

SPIN protokol koristi tri vrste poruke: ADV, REQ i DATA. Senzorski čvor emitira svim čvorovima u mreži ADV poruku koja uključuje određene atribute podataka odnosno specificira vrstu podataka koju sadrži oglasni čvor. Zainteresirani čvorovi koji su dobili ADV poruku šalju REQ poruku oglasnom čvoru tražeći podatke. Oglasni čvor šalje podatke zainteresiranim čvorovima, odnosno šalje DATA poruku te se opisani proces nastavlja [29]. Cijeli model SPIN protokola prikazan je na slici 22.



Slika 26. SPIN protokol
Izvor: [29]

Protokole poput preplavljivanja i prenošenja karakterizira jednostavnost prosljeđivanja i minimalno održavanje topologije. Međutim, performanse navedenih protokola poput kašnjenja i korištenja resursa se pogoršavaju rastom mreže i prometnog opterećenja. Sukladno navedenom, glavni cilj SPIN -a jest uklanjanje nedostataka konvencionalnih protokola za širenje informacija i njihovih performansi. Osnovna načela ove obitelji protokola se temelje na pregovaranju i prilagodbi resursa. Prije pregovaranja, SPIN vrši imenovanje podataka, pri čemu čvorovi povezuju metapodatke s podacima koje proizvode i koriste te opisne podatke za izvođenje pregovora prije slanja stvarnih podataka. Odredišni čvor koji iskazuje interes za sadržajem podatka može poslati zahtjev, odnosno upit, za dodjeljivanje željenih podataka. Opisani oblik semantičkih pregovora osigurava da se podaci šalju samo zainteresiranim čvorovima, čime se eliminira implozija prometa te značajno smanjuje prijenos suvišnih podataka Nadalje, upotreba deskriptora metapodataka uklanja mogućnost preklapanja podataka jer čvorovi mogu ograničiti svoje zahtjeve da imenuju samo tražene podatke.

Prilagođavanje resursa omogućuje čvorovima senzora koji koriste SPIN protokol da prilagode svoje aktivnosti do trenutnog stanja njihovih energetskih izvora. Svaki čvor u mreži može pratiti potrošnju vlastitih resursa prije prijenosa ili obrade podataka. Ukoliko razina energije u mreži postane niska, senzorski čvor može reducirati ili prekinuti aktivnosti poput prosljeđivanja metapodataka ili podataka trećih strana. Značajka prilagodbe resursa SPIN-a omogućuje senzorskim čvorovima u mreži produljenje njihovog vijeka trajanja i posljedično, vijeka trajanja mreže [7].

Rezultati simulacije pokazuju da je SPIN energetski učinkovitiji od tehnika preplavljivanja i prenošenja te pritom uklanja nedostatke navedenih protokola. Nadalje, rezultati također pokazuju da je brzina kojom SPIN distribuira podatke veća ili jednaka brzini bilo kojeg od ovih protokola. Lokalizacijom promjena topologije i uklanjanjem širenja suvišnih informacija semantičkim pregovaranjem SPIN postiže prednost u odnosu na druge protokole. Tablica 2 prikazuje usporedbu performansi protokola preplavljivanja i SPIN-a gdje je evidentno da SPIN ima prednost u gotovo svim metrikama što ga čini izrazito pouzdanim i energetski učinkovitim.

Tablica 2. Usporedba performansi između SPIN protokola i preplavljivanja

	Preplavljivanje	SPIN
Mrežna topologija	Nije potrebna	Potrebna
Isporuka podataka	Garantirana	Nije garantirana
Suvišni podaci	Prisutni	Nisu prisutni
Potrošnja energije	Visoka	Niska
Latencija	Visoka	Niska
Veći broj čvorova	Poželjan	Nije potreban
Temeljen na upitu	Ne	Da
Propusnost	Nisko	Visoko
Pouzdanost	Nisko	Visoko
Životni vijek čvorova	Nisko	Visoko
Energetska učinkovitost	Nisko	Visoko
Svijest o energetskim resursima	Ne	Da

Izvor: [36]

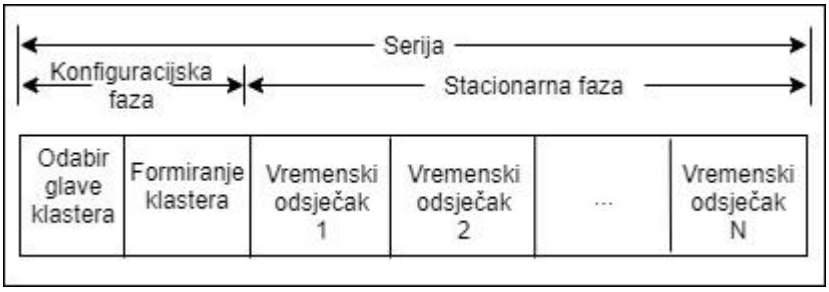
6.2. LEACH

Protokolima usmjeravanja temeljenim na čvorovima pripada LEACH protokol. LEACH je protokol usmjeravanja koji organizira klaster tako da se energija jednako podijeli u svim čvorovima senzora u mreži. Također, LEACH protokol karakterizira nekoliko klastera sastavljenih od senzorskih čvorova pri čemu je jedan čvor definiran kao glava klastera i ima ulogu usmjerivačkog čvora unutar mreže. Prema tome, LEACH protokol se ubraja u hijerarhijske protokole usmjeravanja gdje se grupiraju čvorovi u mreži i smanjuje količina poslanih informacija. Glava klastera se odabire slučajnim izborom iz grupe čvorova što čini ovaj protokol dugotrajnijim jer baterija jednog čvora nije dugo opterećena [29].

Glava klastera preuzima odgovornost za izvršavanje nekoliko zadataka. Prvi zadatak sastoji se od povremenog prikupljanja podataka od članova klastera. Nakon prikupljanja podataka, glava klastera agregira podatke u nastojanju da ukloni redundanciju među vrijednostima. Drugi zadatak glave klastera jest prijenos agregiranih podataka izravno na baznu stanicu putem jednog skoka. Posljednji zadatak glave klastera je stvaranje rasporeda temeljenog na višestrukom pristupu s vremenskom podjelom, pri čemu se svakom čvoru klastera dodjeljuje vremenski odsječak koji

može koristiti za prijenos. Glava klastera oglašava raspored članovima klastera putem emitiranja. Kako bi se smanjila vjerojatnost sudara među senzorskim čvorovima unutar i izvan klastera, LEACH koristi i višestruki pristup s kodnom raspodjelom za komunikaciju koji omogućuje istovremeno slanje podatkovnih paketa putem iste rute [7].

Osnovne operacije LEACH-a organizirane su u dvije različite faze te su prikazane na slici 23. Prva faza je faza konfiguracije koja se sastoji se od dva koraka: odabir glave klastera i formiranje klastera. Druga faza predstavlja stacionarnu fazu koja je usredotočena na prikupljanje i agregiranje podataka te njihovu isporuku u baznu stanicu putem formiranih vremenskih odsječaka.

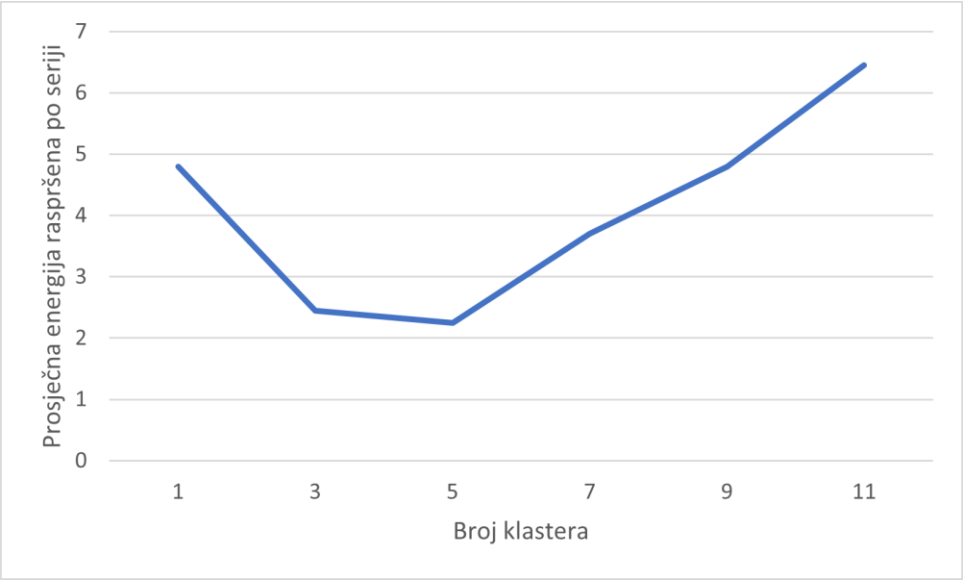


Slika 27. Faze LEACH protokola
Izvor: [37]

Postupak odabira glave klastera osigurava da se ova uloga rotira među čvorovima senzora, ravnomjerno raspoređujući potrošnju energije na svim čvorovima mreže. Kako bi se utvrdilo na kojem je čvoru red da postane glava klastera, čvor *n* generira slučajni broj *v* između 0 i 1 te ga uspoređuje s pragom odabira glave klastera *T(n)*. Čvor postaje glava klastera ako je njegova generirana vrijednost *v* manja od *T(n)*.

Nakon formiranja klastera, svaka glava klastera stvara i distribuira TDMA (eng, *Time-division multiple access*) raspored, koji specificira vremenske intervale dodijeljene za svakog člana klastera. Svaka glava klastera također odabire CDMA (engl. *Code-division multiple access*) kod koji se zatim distribuira svim članovima njegova klastera. Završetak konfiguracijske faze signalizira početak stacionarne faze tijekom koje čvorovi prikupljaju informacije i koriste svoja dodijeljena mjesta za prijenos prikupljenih podataka na glavu klastera [7].

Grafikon 2 pokazuje da je optimalan broj klastera u mreži od 100 čvorova od 3 do 5. Samim time, protokol LEACH potvrđuje da se energija koja se raspršuje po jednoj seriji značajno povećava kada je broj klastera 6 i više.



Grafikon 2. Prosječna energija raspršena po seriji u odnosu na broj klastera
Izvor: [38]

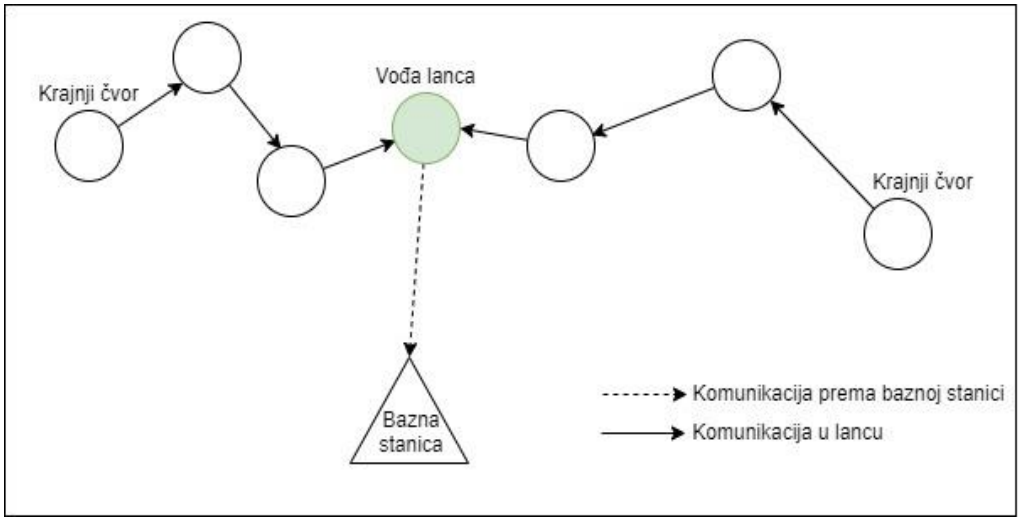
LEACH karakterizira nekoliko svojstava koja omogućuju smanjenje potrošnje energije. Potreba za energijom u LEACH -u raspoređena je na sve čvorove senzora jer preuzimaju ulogu glave klastera na način koji se zasniva na njihovom zaostatku energije. LEACH je potpuno distribuiran algoritam koji ne zahtijeva kontrolu informacija s bazne stanice. Nadalje, upravljanje klasterima postiže se lokalno što briše potrebu za znanjem o globalnoj mreži. Također, agregacija podataka od strane klastera uvelike doprinosi uštedi energije pri čemu čvorovi više nisu potrebni za slanje svojih podataka izravno u krajnje odredište.

Rezultati simulacije pokazuju da LEACH postiže značajne uštede energije koje ovise prvenstveno o omjeru agregacije podataka koju je klaster postigao. Unatoč navedenim prednostima, LEACH bilježi nekoliko nedostataka. Pretpostavka da svi čvorovi mogu doći do bazne stanice u jednom skoku nije nužno ostvariva, budući da se sposobnosti i rezerve energije čvorova mogu mijenjati tijekom vremena. Nadalje, duljina stacionarnog razdoblja ključna je za postizanje smanjenja energije potrebne za nadoknadu troškova uzrokovanih tijekom procesa odabira glave klastera. Kratko stacionarno razdoblje povećava troškove, dok dugo stacionarno razdoblje može dovesti do iscrpljivanja energije glave klastera. Za rješavanje opisanih nedostataka predložen je prošireni LEACH protokol koji uzima u obzir razinu energije čvora prilikom postupka odabira glave klastera [7].

6.3. PEGASIS

PEGASIS jest protokol koji također pripada obitelji hijerarhijskih protokola usmjeravanja. Cilj protokola jest razvoj strukture usmjeravanja i sheme agregacije za smanjenje potrošnje energije te isporuka prikupljenih podataka baznoj stanici uz minimalno kašnjenje balansiranjem potrošnje energije među senzorskim čvorovima. Mrežni model koji razmatra PEGASIS pretpostavlja homogen skup čvorova raspoređenih po zemljopisnom području koji posjeduju znanje o položajima drugih čvorova u mreži [7].

Suprotno drugim protokolima koji definiraju hijerarhijsku organizaciju mreže zasnovanu na klasteru za prikupljanje i usmjeravanje podataka, PEGASIS koristi lanac strukture. Na temelju strukture, čvorovi komuniciraju sa svojim najbližim susjedima. Mrežni čvorovi dodaju se u lanac postupno, počevši od najbližeg susjednog čvora do krajnjeg čvora. Kako bi odredio najbližeg susjeda, vođa lanca koristi jačinu signala za mjerenje udaljenosti do svih svojih susjednih čvorova. Koristeći ove informacije, vodeći čvor podešava jačinu signala tako da se može čuti samo najbliži čvor. Prije serije, odabire se čvor koji predstavlja vođu lanca čija je odgovornost prenijeti sakupljene podatke baznoj stanici [7]. Na slici 24 prikazan je lanac strukture PEGASIS protokola sa označenim tijekovima komunikacije.



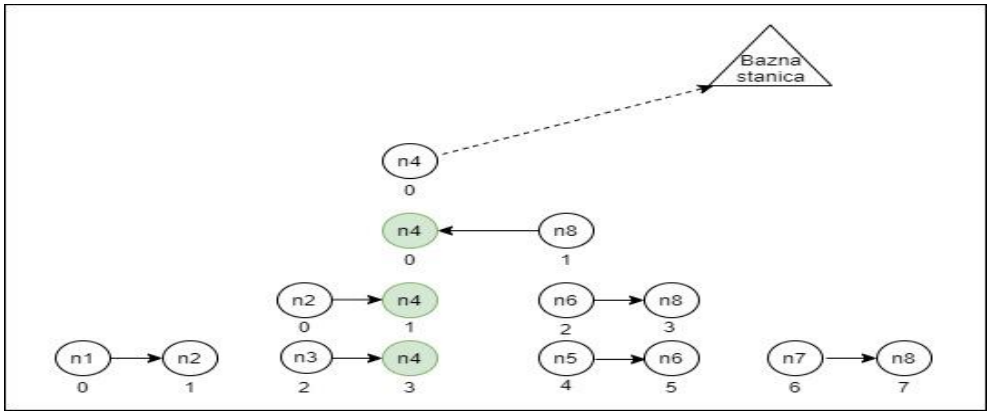
Slika 28. Lanac strukture u PEGASIS protokolu
Izvor: [39]

Uloga vođe lanca mijenja se u pozicioniranju lanca nakon svake serije. Rotacija vodeće uloge među čvorovima lanca osigurava uravnoteženu potrošnju energije među svim čvorovima mreže.

Štoviše, čvorovi koji preuzimaju ulogu vođe lanca mogu biti proizvoljno udaljeni od bazne stanice pri čemu rastom udaljenosti raste i snaga potrebna kako bi čvor dosegao baznu stanicu.

Agregacija podataka u PEGASISU-u izvodi se uzastopno duž lanca. Vođa lanca izdaje znak krajnjem čvoru na desnom kraju lanca da prenese svoje podatke susjednom čvoru. Susjedni čvor objedinjuje prikupljene podatke i prenosi ih sljedećem susjednom čvoru u lancu. Taj se proces nastavlja sve dok zbirni podaci ne dođu do vođe lanca. Po primitku podataka s desne strane lanca, vođa izdaje znak za lijevi krajnji čvor koji provodi isti postupak. Nakon primitka podataka s obje strane lanca, vođa lanca objedinjuje podatke i prenosi ih u baznu stanicu. Shema uzastopne agregacije podataka može rezultirati dugim kašnjenjima prije nego što se zbirni podaci dostave baznoj stanici [7].

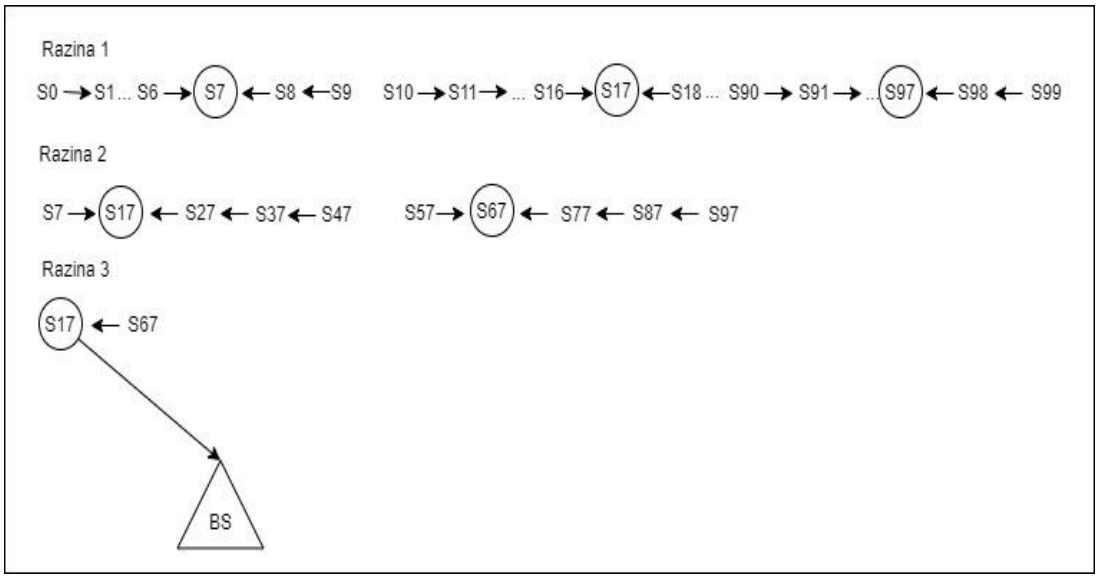
Potencijalni pristup za smanjenje kašnjenja jest korištenje paralelnog prikupljanja podataka duž lanca, odnosno binarne agregacije podataka. Ova shema funkcionira prvenstveno za CDMA pristup gdje može postojati istovremena komunikacija između bilo kojeg para čvorova ako je svakom čvoru dodijeljen jedinstveni CDMA kod. Lanac formiran pomoću pohlepnog algoritma zasnovanog na udaljenosti se i dalje koristi kao osnova za prikupljanje podataka [40]. Na slici 25 prikazana je binarna shema prikupljanja i agregacije podataka u lancu. Vidljivo je da je vođa u prvoj seriji prijenosa podataka čvor n4, na poziciji 3, te sukladno tome, svi čvorovi šalju vlastite podatke susjednom čvoru s desne strane. Na sljedećoj razini se ponavlja isti postupak pri čemu čvor n4 ostaje na vodećoj poziciji. Nadalje, čvor n8 agregira vlastite podatke na idućoj razini te ih šalje čvoru n4 koji pritom objedinjava vlastite podatke s pristiglim podacima te ih šalje baznoj stanici.



Slika 29. Lančana shema prikupljanja i agregacije podataka
Izvor: [7]

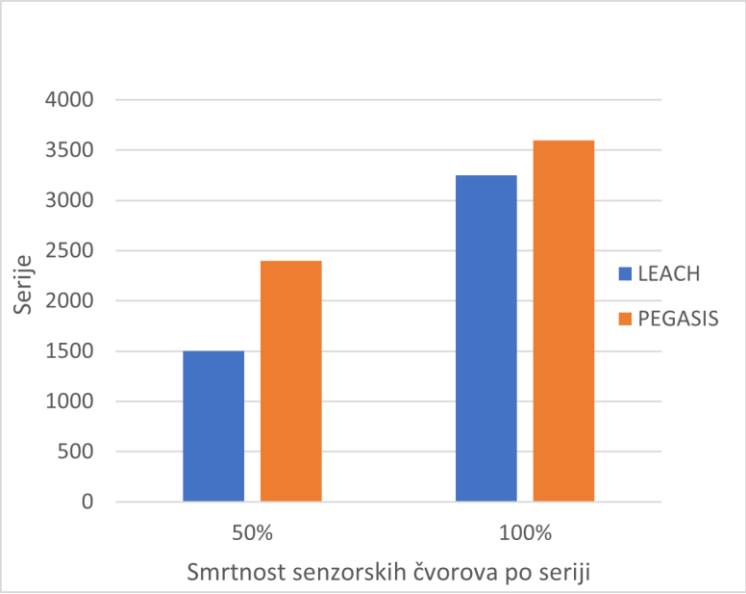
Binarni pristup temeljen na strukturi lanca koristi se u PEGASIS protokolu kao alternativa postizanju paralelnog načina rada čvorova. Zajedno sa senzorskim čvorovima označenim CDMA kodovima, binarna shema izravno utječe na smanjenje kašnjenja i uravnoteženu potrošnju energije između senzorskih čvorova.

Uz uzastopnu i binarnu shemu prikupljanja podataka, postoji i treća shema koja ne zahtijeva da čvorni primopredajnici budu opremljeni CDMA kodovima te nastoji uravnotežiti opisane metode i postići određenu dozu paralelizma. Osnovna ideja sheme je ograničiti istovremeni prijenos podataka na čvorove koji su prostorno odvojeni. Na temelju ovog ograničenja stvara se hijerarhijski PEGASIS čija je osnova hijerarhija podijeljena na tri razine. Podaci se istovremeno prikupljaju unutar svake skupine te prosljeđuju do bazne stanice. Nadalje, hijerarhija na tri razine mora se pravilno restrukturirati kako bi se omogućila rotacija vodstva među čvorovima grupe [7]. Na Slici 26 prikazan je hijerarhijski PEGASIS gdje je, na prvoj razini, lanac podijeljen u 3 grupe unutar kojih podatke agregiraju i prenose vođe grupe. Na drugoj razini su čvorovi podijeljeni u dvije grupe s drugačijim vođama grupa koji na trećoj razini agregiraju podatke te čvor koji predstavlja vođu grupe prenosi podatke baznoj stanici.



Slika 30. Hijerarhijski PEGASIS
Izvor: [41]

PEGASIS nudi energetski učinkovitiji prijenos podataka za bežične senzorske mreže od LEACH protokola u smislu potrošnje energije i paketnog prijenosa. Samim time, vijek trajanja mreže postaje duži zbog bolje energetske učinkovitosti i minimiziranja udaljenosti između čvorova. Grafikon 3 prikazuje komparaciju smrtnosti senzorskih čvorova po seriji koristeći LEACH i PEGASIS protokol usmjeravanja. Evidentno je da kod LEACH protokola 50% čvorova u mreži umre na približno 1500 serija, a 100% čvorova na približno 2350 serija. Sukladno tome, PEGASIS postiže bolje rezultate od LEACH-a u smislu vijeka trajanja čvora, a samim time i mreže. PEGASIS proširuje mrežu što je vidljivo u podatku da 50% čvorova postaje neaktivno nakon približno 2400 serija, odnosno 100% čvorova se smatra neupotrebljivim nakon približno 3550 serija prijenosa.



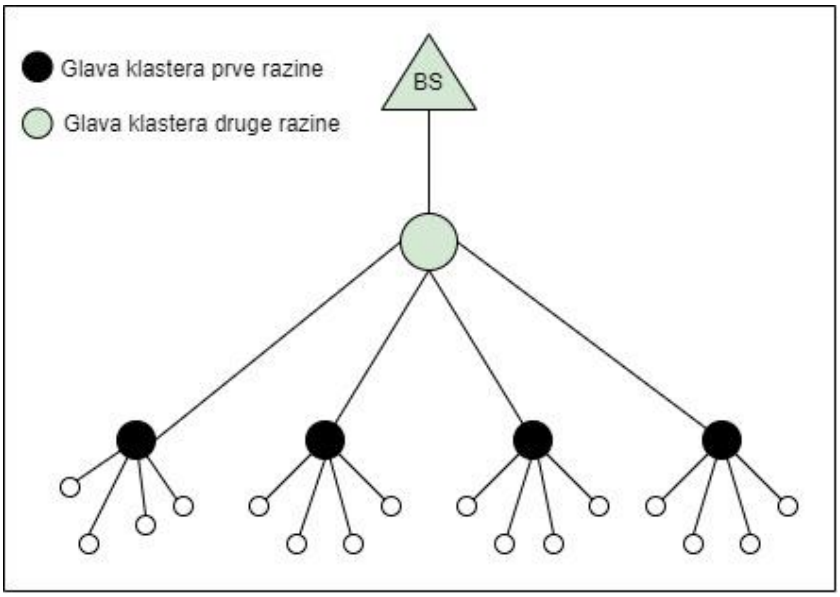
Grafikon 3. Smrtnost senzorskih čvorova u odnosu na broj serija
Izvor: [42]

6.4. TEEN i UPTEEN

TEEN protokol jest hijerarhijski protokol usmjeravanja zasnovan na LEACH-u te se koristi za vremenski kritične aplikacije. Temelji se na pretpostavkama da bazna stanica i senzorskih čvorovi imaju istu početnu energiju pri čemu bazna stanica može izravno prenositi podatke na sve čvorove u mreži. Senzorski čvorovi neprestano detektiraju događaje iz svog okruženja, no prijenos podataka u baznu stanicu se rjeđe obavlja.

TEEN koristi LEEACH strategiju za formiranje klastera, te se sukladno tome mreža sastoji od jednostavnih čvorova, glava klastera prve razine i glava klastera druge razine. Glave klastera prve

razine se formiraju dalje od bazne stanice, a glave klastera druge razine u blizini bazne stanice. Štoviše, glava klastera prenosi dvije vrste podataka: tvrde i meke podatke. U tvrdom stanju čvorovi prenose podatke ukoliko je osjetni atribut u rasponu interesa i na taj način smanjuje broj prijenosa. S druge strane, meko stanje bilježi svaku promjenu vrijednosti osjetnog atributa [43]. Na slici 27 prikazana je mrežna arhitektura TEEN protokola.



Slika 31. Mrežna arhitektura TEEN protokola
Izvor: [43]

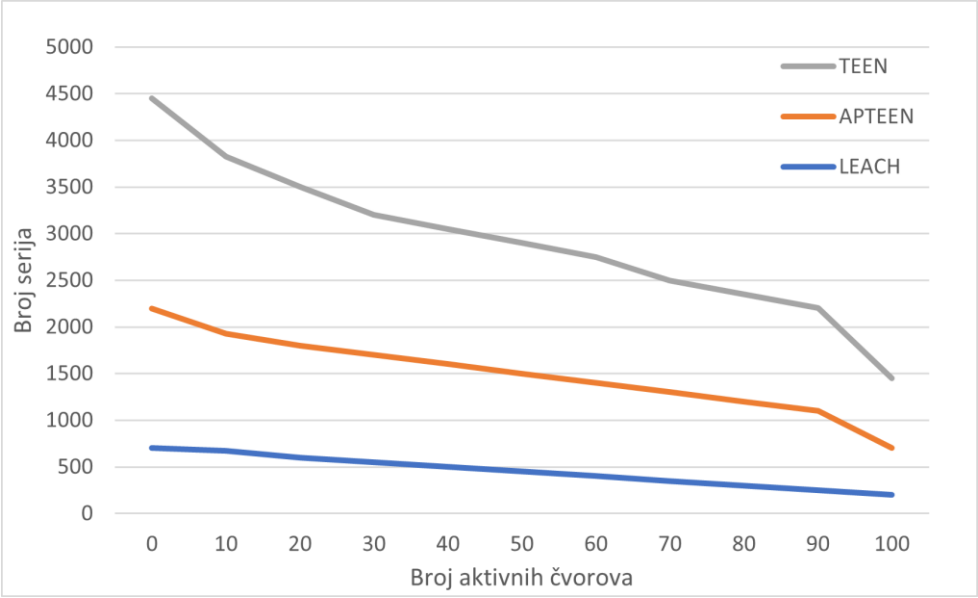
Nadalje, protokol TEEN karakteriziraju određeni nedostaci u performansama. Senzorski čvor može čekati svoje vremensko razdoblje za prijenos podataka pri čemu se može izgubiti vremenski odsječak ukoliko čvor nema podatke za prijenos. Također, glave klastera uvijek čekaju podatke iz čvorova što zahtijeva stalnu aktivnost odašiljača.

Poboljšana verzija protokola TEEN je APTEEN koji je razvijen za hibridne mreže. APTEEN podržava upite poput povijesne analize vrijednosti prošlih podataka, snimke trenutnog prikaza mreže ili praćenje događaja tijekom određenog vremenskog razdoblja. U svakoj seriji, glava klastera emitira sljedeće parametre [43] :

- atribute, odnosno fizičke parametre
- granične vrijednosti tvrdog i mekog stanja
- vremenski raspored pomoću TDMA
- maksimalno vremensko razdoblje između dva uzastopna izvješća poslana od čvora.

Ako čvor ne pošalje podatke za vremensko razdoblje jednako maksimalnom vremenskom razdoblju između dva uzastopna izvješća poslana od čvora, prisiljen je ponovno detektirati podražaje i poslati podatke čime se održava potrošnja energije. Budući da je APTEEN hibridni protokol, može oponašati proaktivnu ili reaktivnu mrežu ovisno o graničnim vrijednostima i maksimalnom vremenskom razdoblju između dva izvješća. Nedostatak ovog protokola je dodatna složenost potrebna za implementaciju funkcije graničnih vrijednosti i vremenskih značajki.

Na grafikonu 4 prikazana je odnos broja serija prijenosa podataka i broja aktivnih čvorova za protokole LEACH, TEEN i APTEEN. Općenito, performanse APTEEN protokola se nalaze između LEACH i TEEN protokola. Nakon otprilike 800 serija prijenosa, većina čvorova u APTEEN-u je još uvijek aktivno, dok u LEACH protokolu svi čvorovi prelaze u neaktivno stanje. Na temelju podataka vidljivo je da APTEEN produljuje vijek trajanja mreže za više od 100% u odnosu na LEACH protokol. Štoviše, evidentno je da najdulji vijek trajanja mreže u odnosu na LEACH i APTEEN protokole ima TEEN protokol. S druge strane, TEEN prenosi samo vremenski kritične podatke tijekom detekcije podražaja iz okruženja, dok protokol APTEEN karakterizira i periodično prikupljanje podataka čime daje kompletnu sliku o stanju mreže. Također APTEEN, brže reagira na drastične promjene u mreži što ga čini osjetljivim na vremenski kritične situacije.



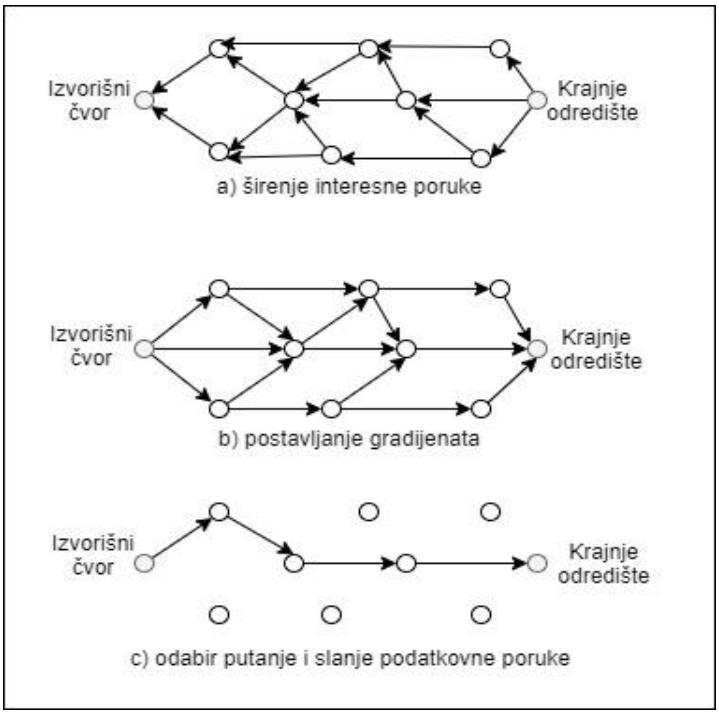
Grafikon 4. Broj aktivnih čvorova u odnosu na broj serija
Izvor: [44]

6.5. DD

DD, odnosno izravna difuzija, jest protokol usmjeravanja usmjeren na podatke za prikupljanje i prosljeđivanje informacija u bežičnim senzorskim mrežama. Glavni cilj DD protokola je postizanje energetske uštede kako bi se produljio životni vijek mreže što postiže održavanjem interakcija između čvorova, u smislu razmjena poruka, lokaliziranih unutar ograničene mreže. Korištenjem lokalizirane interakcije, protokol nastoji i dalje ostvariti prijenos putem više putova pritom održavajući broj mrežnih putova minimalnim.

Glavni elementi DD protokola uključuju interesne poruke, podatkovne poruke, gradijent i selekciju. Krajnji čvorovi stvaraju zadatke ili interesne zahtjeve za informacijama koji se šire po senzorskoj mreži kako bi otkrili postoji li senzorski čvor koji može izvršiti traženi zadatak. Svi čvorovi prate neispunjene interesne poruke koje identificiraju u mreži na način da prate predmemoriju interesa. Štoviše, svaki čvor zauzvrat može odlučiti proslijediti interesnu poruku susjednim čvorovima u mreži. Bitna komponenta DD protokola je korištenje gradijenata, povezanih sa svakim unosom u predmemoriju interesa, koji se koriste za usmjeravanje i kontrolu protoka informacija [7]. Gradijent je definiran kao minimalni kumulativni trošak veze ili čvora duž rute, koji će se koristiti za prijenos podataka do krajnjeg odredišta. Čvor senzora prenosi podatke samo prema susjednim čvorovima koji imaju manji gradijent [45]. Također, selekcija kao element DD protokola ima ulogu odabira odgovarajuće putanje iz više mogućih putanja. Atribut vremenske oznake u interesnoj poruci se koristi za razlikovanje ponavljanih emisija od ranije verzije poruke, [7].

Na slici 28 su prikazani procesi DD protokola i njegovih elemenata. Bazna stanica, odnosno krajnje odredište, raspršuje interesni upit prema čvorovima u zainteresiranoj regiji. Svaki senzor prima upit te postavlja gradijent prema čvorovima senzora od kojih prima upit. Navedeni se proces nastavlja sve dok se ne uspostave gradijenti od izvorišnog čvora natrag do bazne stanice. Posljednji korak karakterizira odabir odgovarajuće rute iz više mogućih ruta te slanje podatkovne poruke tražene od bazne stanice. Prema karakteristikama elemenata, DD protokol također možemo svrstati u protokole usmjeravanja temeljene na upitu i protokole usmjeravanja temeljene na pregovorima te prema mrežnoj arhitekturi, u istorazinske protokole usmjeravanja



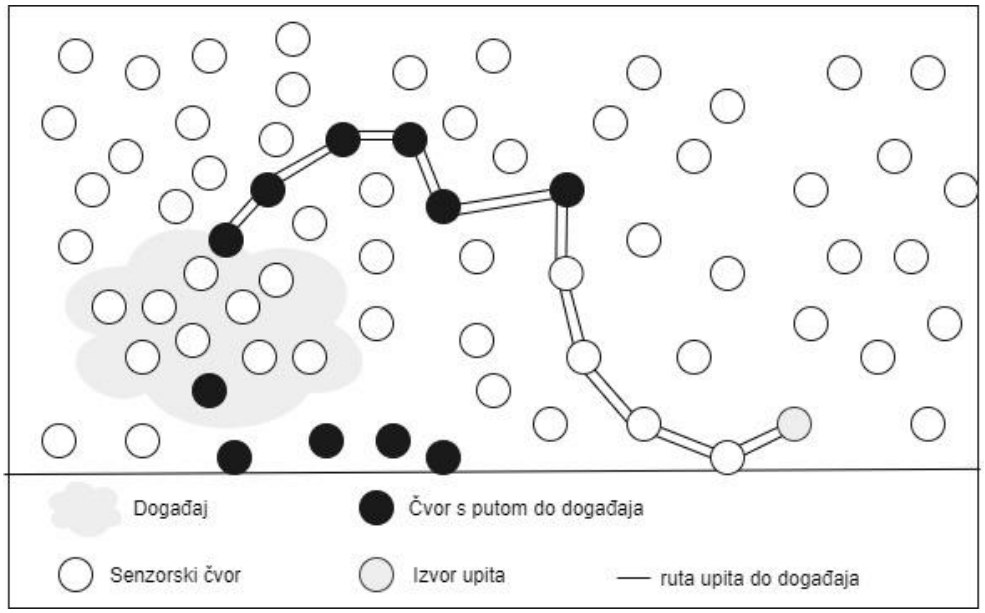
Slika 32. Procesi DD protokola
Izvor: [43]

DD protokoli usmjeravanja omogućuju energetsku uštedu uporabom predmemorije interesa, odabirom optimalnih ruta i načinom obrade podataka u mreži. Lokalizirana interakcija u mreži omogućuje postizanje relativno visokih performansi na neoptimiziranim rutama. Također, posrednički čvorovi imaju mogućnost agregacije podataka ovisno o podatkovnoj poruci, odnosno o nazivu podataka i vrijednostima atributa, čime se smanjuju troškovi komunikacije. S druge strane, za skupljanje podataka potrebna je tehnika sinkronizacije vremena koju nije lako postići u bežičnim senzorskim mrežama. Drugi je problem povezan s općim troškovima uključenim u praćenju neispunjenih interesnih poruka čime se povećavaju troškovi čvora senzora.

6.6. RR

RR protokol predstavlja vrstu izravne difuzije koja se koristi u aplikacijama u kojima geografsko usmjeravanje nije izvedivo. Glavna ideja RR protokola usmjeravanja jest stvaranje ruta koje vode do svakog događaja kada se događaj dogodi i koje se koriste za usmjeravanje generiranih upita. Ovaj protokol karakteriziraju gusto raspoređeni mrežni čvorovi među kojima su dopušteni prijenosi izričito na kratke udaljenosti uz obavezne dvosmjerne veze.

U slučaju DD protokola usmjeravanja koristi se tehnika preplavljivanja za raspršivanje upita po cijeloj mreži. Međutim, ponekad su traženi podaci iz čvorova vrlo mali pa je tehnika preplavljivanja nepotrebna. U tom slučaju se upotrebljava drugi pristup koji raspršuje događaje kada je broj događaja mali, a broj upita veliki. Kako bi preplavio događaje kroz mrežu, protokol usmjeravanja RR koristi dugotrajne pakete nazvane agentima. Kada čvor detektira događaj, dodaje takav događaj u svoju lokalnu tablicu odnosno, tablicu događaja, i generira agenta. Agenti putuju mrežom slučajnim putem s povezanim podacima o događaju te posjećuju čvorove koji pritom tvore rutu prema događaju [43]. Na slici 29 prikazan je rad protokola RR koji, za razliku od izravne difuzije, održava samo jedan put između izvorišta i odredišta.



Slika 33. Prijenos podataka u RR protokolu
Izvor: [46]

Rezultati simulacije pokazuju da je protokol usmjeravanja RR pouzdan u smislu isporuke upita do događaja u velikoj mreži te pruža efikasnost pri rješavanju kvara čvora pri čemu degradiraju brzinu isporuke linearno s brojem kvarova na čvorovima. Također, protokolom se postiže značajna ušteda energije u odnosu na tehniku preplavljivanja [46].

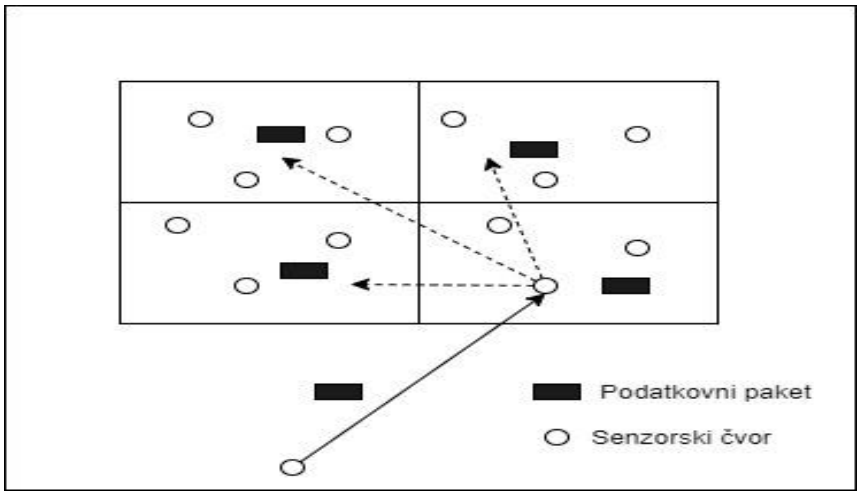
6.7. GEAR

Protokoli usmjeravanja temeljeni na lokaciji zahtijevaju informacije o lokaciji svih senzorskih čvorova za izračunavanje udaljenosti između bilo koja dva čvora. Lokacijski protokol usmjeravanja GEAR koristi GIS (Geografski informacijski sustav) za pronalaženje lokacije senzorskih čvorova

u bežičnoj senzorskoj mreži. Za razliku DD protokola gdje se interesni upiti šalju u cijelu mrežu, GEAR protokol razmatra samo određenu regiju čime ograničava broj interesnih upita te samim time postiže značajnu uštedu energije.

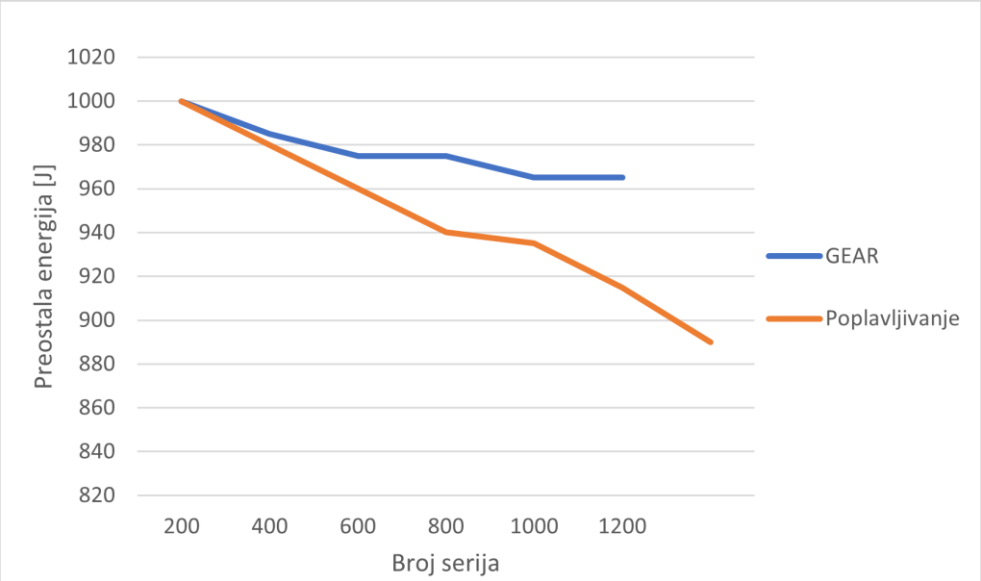
Nadalje, u GEAR protokolu postoje dvije faze prosljeđivanja podatkovnih paketa. U prvoj fazi paketi se prosljeđuju prema ciljnom području. Nakon što primi paket, senzorski čvor traži susjedni čvor koji je bliži ciljnoj regiji te putem skoka prosljeđuje paket izabranom čvoru. Ukoliko senzorski čvor nema bližih susjednih čvorova prema ciljnoj regiji, nastaje rupa. Sukladno tome, sljedeći čvor kojem će paket biti proslijeđen bira se na temelju funkcije stvarnih troškova. Štoviše, svaki čvor pohranjuje dvije vrste troškova tijekom stizanja do odredišta: procijenjene troškove i stvarne troškove. Procijenjeni trošak je kombinacija preostale energije i udaljenosti do odredišta, a stvarni trošak predstavlja izmijenjeni procijenjeni trošak koji uzima u obzir usmjeravanje oko rupa u mreži. U slučaju da nema rupa, procijenjeni trošak jednak je stvarnom trošku [7].

Druga faza obuhvaća distribuiranje paketa unutar regije. Kada paket stigne u željeno područje, dolazi do procesa raspršivanja paketa unutar regije što se vrši rekurzivnim geografskim prosljeđivanjem ili ograničenim poplavljivanjem. Ukoliko senzori nisu gusto raspoređeni, koristi se ograničeno poplavljivanje regije. S druge strane, geografsko prosljeđivanje se koristi u gusto raspoređenim mrežama podijeljenima na četiri podregije što je prikazano na slici 30. Tim procesom se stvaraju četiri kopije paketa te se proces nastavlja sve dok ne preostanu regije sa samo jednim čvorom.



Slika 34. Geografsko prosljeđivanje u GEAR protokolu
Izvor: [47]

Na grafikonu 5 prikazan je odnos preostale energije u bežičnoj senzorskoj mreži i broja serija prijenosa za protokol GEAR i tehniku poplavljivanja koja se koristi kako bi se upitni zahtjev distribuirao svim čvorovima u mreži kod DD protokola. Zabilježena je manja energetska potrošnja rastom broja serija prijenosa kod GEAR protokola zbog energetski usmjerene selekcije susjednog čvora za usmjeravanje paketa prema ciljnom području. S druge strane, poplavljivanje rasipa veliku količinu energije rastom broja zabilježenih rundi što pridonosi kraćem životnom vijeku mreže u odnosu na GEAR protokol.

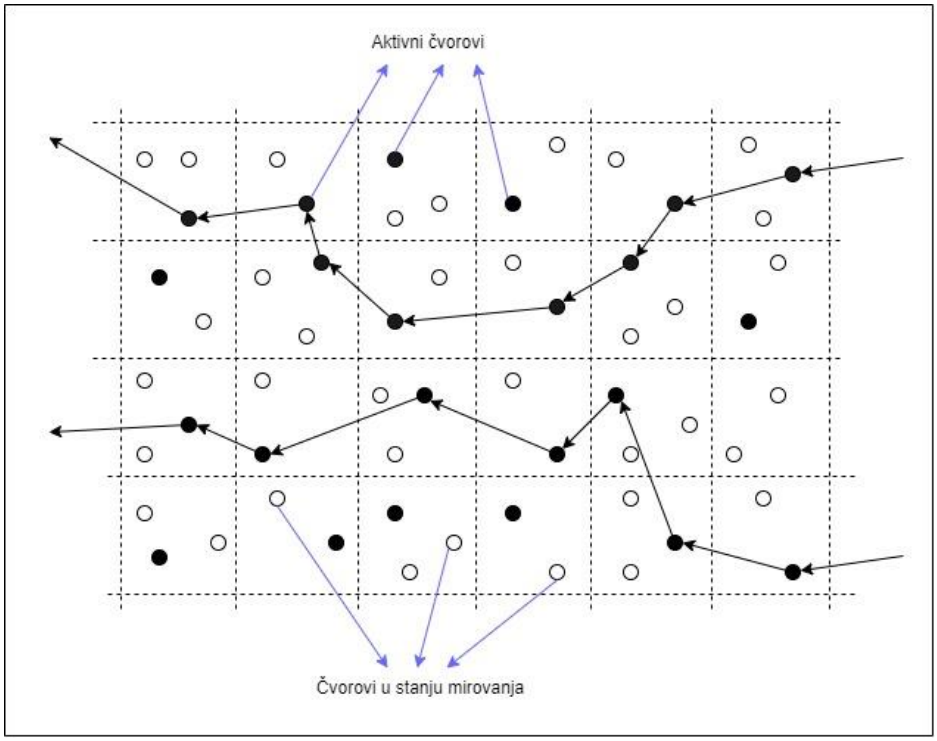


Grafikon 5. Preostala energija u odnosu na broj serija
Izvor: [48]

6.8. GAF

GAF predstavlja protokol usmjeravanja temeljen na lokaciji koji dijeli mrežu na rešetke te pritom održava aktivnim po jedan čvor iz svake rešetke za detekciju podražaja. Premda je GAF protokol zasnovan na lokaciji, može biti implementiran kao hijerarhijski protokol gdje se klasteri temelje na geografskom položaju. Čvorovi u svakoj rešetci imaju različite funkcije i svaki čvor koristi svoju lokaciju označenu GPS-om za pridruživanje točaka u mreži. Čvorovi koji su postavljeni na istoj točki se smatraju ekvivalentima u smislu cijene usmjeravanja paketa. Štoviše, ekvivalentnost se iskorištava na način da se istovjetni čvorovi u određenom području mreže stavljaju u stanje mirovanja. GAF štedi energiju isključivanjem nepotrebnih čvorova bez utjecaja na razinu vjernosti usmjeravanja što doprinosi duljem životnom vijeku mreže [43].

Čak i uz geografsko definiranje senzora, nije moguće odrediti ekvivalentne senzore za prijenos između senzorskih čvorova. Senzori koji su ekvivalentni za komunikaciju određenim senzorima, ne moraju biti ekvivalentni za druge senzore. Prema tome, GAF koristi konceptualnu virtualnu mrežu kojom je cijela regija podijeljena na nekoliko malih kvadratnih rešetki pri čemu bilo koji senzor jedne rešetke može komunicirati s bilo kojim senzorom u susjednoj rešetci što je prikazano na slici 31. Unutar rešetke je aktivan samo jedan senzor, dok se ostali čvorovi nalaze u stanju mirovanja što doprinosi dugoročnosti mreže.



Slika 35. GAF protokol
Izvor: [49]

Detekcija, akcija i mirovanje su tri stanja koja definira protokol GAF. Detekcija uključuje odabir odgovarajućeg susjednog čvora kojem će se proslijediti paket, dok akcija podrazumijeva proces usmjeravanja paketa kroz mrežu. U stanju mirovanja senzorski čvor se isključuje, odnosno postaje neaktivan. Svaki čvor u mreži procjenjuje vrijeme napuštanja mreže te ga pritom šalje susjednim čvorovima koji u skladu s tim prilagođavaju stanje mirovanja kako bi održali vjernost rute [43].

Ograničenje tradicionalnog GAF protokola jest mogućnost prosljeđivanja podataka u dva moguća smjera: horizontalno i vertikalno. Sukladno tome, došlo je do razvoja generalizirane

verzije GAF protokola pod nazivom Dijagonalni GAF gdje se senzorsko polje dijeli na jednake virtualne četvrtaste ćelije koje omogućuju komunikaciju sa susjednim ćelijama i u dijagonalnom smjeru [50].

6.9. Usporedba parametara protokola umjeravanja

Tablica 3 prikazuje komparativnu analizu načina usmjeravanja i performansi protokola usmjeravanja s obzirom na različite kriterije poput mobilnosti, upravljanja napajanjem, životnog vijeka mreže, skalabilnosti, klasifikacije, agregacije podataka i mogućnosti postojanja više putanji za usmjeravanje podataka.

Tablica 3. Komparativna analiza parametara protokola usmjeravanja

Protokol	Mobilnost	Upravljanje napajanjem	Životni vijek mreže	Skalabilnost	Klasifikacija	Agregacija podataka	Postojanje više ruta
SPIN	Moguća	Ograničeno	Dobar	Ograničena	Istorazinski/proaktivni	Da	Da
LEACH	Fiksna bazna stanica	Maksimalno	Vrlo dobar	Dobra	Hijerarhijski/proaktivni	Ne	Ne
PEGASIS	Fiksna bazna stanica	Maksimalno	Vrlo dobar	Dobra	Hijerarhijski/reaktivni	Da	Ne
TEEN	Fiksna bazna stanica	Maksimalno	Vrlo dobar	Dobra	Hijerarhijski/reaktivni	Da	Ne
APTEEN	Fiksna bazna stanica	Maksimalno	Vrlo dobar	Dobra	Hijerarhijski/Hibridni	Da	Ne
DD	Ograničena	Ograničeno	Dobar	Ograničena	Istorazinski/proaktivni	Da	Da
RR	Vrlo ograničena	Nije podržano	Vrlo dobar	Dobra	Istorazinski/hibridni	Da	Ne
GEAR	Ograničena	Ograničeno	Dobar	Ograničena	Lokacijski/proaktivni	Ne	Ne
GAF	Ograničena	Ograničeno	Dobar	Ograničena	Lokacijski/hibridni	Ne	Ne

Izvor: [43]

Protokoli LEACH, PEGASIS, TEEN i UPTEEN imaju slične karakteristike, sličnu mrežnu arhitekturu te fiksnu infrastrukturu. LEACH, TEEN i APTEEN pripadaju obitelji hijerarhijskih protokola usmjeravanja temeljenih na klasteru, dok PEGASIS protokol koristi lanac strukture za komunikaciju susjednih čvorova. LEACH protokol ne podržava agregaciju podataka što utječe na povećanje potrošnje energije u odnosu na protokole PEGASIS, TEEN i APTEEN koji koriste

objedinjavanje podataka kao učinkovit način za uštedu ograničenih resursa. S druge strane, protokol SPIN karakterizira istorazinska mrežna arhitektura gdje svi senzorskih čvorovi imaju isti kapacitet i sposobnosti s ciljem detekcije događaja, obrade podataka i prosljeđivanja podatkovnih paketa krajnjem odredištu. Sukladno tome, obitelj hijerarhijskih protokola usmjeravanja odlikuje dulji životni vijek mreže, bolja skalabilnost i maksimalno upravljanje napajanjem u odnosu na istorazinski protokol SPIN. Usprkos tome, SPIN protokol karakterizira agregacija podataka te postojanje više mogućih ruta za prijenos podataka što pridonosi boljoj toleranciji na kvarove u odnosu na protokol LEACH.

Protokoli usmjeravanja DD i RR, temeljeni na istorazinskoj mrežnoj arhitekturi, te lokacijski protokoli usmjeravanja GEAR i GAF bilježe značajnu ograničenost u mobilnosti i upravljanju napajanjem. Unatoč tome, DD i RR pripadaju energetski učinkovitim protokolima usmjeravanja koji koriste agregaciju podataka s ciljem produljenja vijeka trajanja bežičnih senzorskih mreža. Protokol usmjeravanja RR označava prijenos podataka na iznimno malim udaljenostima u gustoj mreži čvorova što omogućuje postojanje više putanja za prijenos i dobru skalabilnost u odnosu na protokole DD, GEAR i GAF. Nadalje, protokoli koji za komunikaciju koriste informacije o položaju čvorova, GEAR i GAF, ne podržavaju objedinjavanje prikupljenih podataka u bežičnoj senzorskoj mreži već dijele mrežu na regije i rešetke kako bi reducirali broj prijenosa podataka unutar mreže.

7. Zaključak

Bežična senzorska mreža se sastoji od autonomnih senzorskih čvorova za praćenje fizičkih i okolišnih uvjeta te zajedničko prosljeđivanje prikupljenih informacija do odredišta putem mrežne infrastrukture. Usmjeravanje u tradicionalnim bežičnim mrežama nije primjenjivo na bežične senzorske mreže zbog različitih i jedinstvenih svojstava senzorskih čvorova poput energetskih ograničenja, načina obrade informacija, prijenosa prikupljenih informacija, nepostojanja globalne adrese, potencijalnog nasumičnog raspoređivanja čvorova senzora i mnogih drugih karakteristika. Shodno tome, razvijeni su različiti protokoli usmjeravanja s ciljem prilagodbe bežičnim senzorskim mrežama različitih svojstava i primjena. Štoviše, krajnji cilj protokola usmjeravanja jest ostvariti energetsku učinkovitost i povećati ukupni vijek trajanja mreže.

Sve veća upotreba bežičnih senzorskih mreža, različitost mrežnih arhitekturi i heterogenost uređaja predstavljaju izazove u dizajnu protokola usmjeravanja bežičnih senzorskih mreža. Kategorizacija protokola usmjeravanja obuhvaća podjelu protokola prema mrežnoj arhitekturi, prema načinu prijenosa podataka te prema radu protokola. S obzirom na mrežnu arhitekturu, protokoli usmjeravanja se dijele na istorazinske i hijerarhijske, te protokole usmjeravanja temeljene na lokaciji.

Istorazinski protokoli usmjeravanja se temelje na istorazinskoj mrežnoj arhitekturi gdje se svi čvorovi smatraju ravnopravnima, a detekcija podražaja i prosljeđivanje zabilježenih rezultata se obavljaju međusobnom suradnjom svih senzorskih čvorova. Istorazinska mrežna arhitektura uključuje prednosti poput minimalnih troškova za održavanje infrastrukture te ima potencijal za otkrivanje više ruta između posredničkih čvorova s ciljem tolerancije grešaka. Protokoli usmjeravanja SPIN, DD i RR su predstavnici obitelji istorazinskih protokola usmjeravanja čije karakteristike omogućuju senzorskim čvorovima u mreži produljenje njihovog vijeka trajanja i samim time, vijeka trajanja mreže.

Nadalje, hijerarhijske protokole usmjeravanja karakterizira postojanje mrežne hijerarhije s ciljem postizanja energetske učinkovitosti i stabilnosti. U hijerarhijskom usmjeravanju, mrežno područje je podijeljeno na klastere pri čemu senzorski čvorovi s većom energijom imaju ulogu vođe klastera te su odgovorni za koordiniranje aktivnosti unutar klastera i prosljeđivanje informacija između klastera. Protokoli usmjeravanja LEACH, PEGASIS, TEEN i APTEEN pripadaju obitelji hijerarhijskih protokola usmjeravanja koji podrazumijevaju energetski

učinkovito usmjeravanje u bežičnim senzorskim mrežama te doprinose ukupnoj skalabilnosti sustava i vijeku trajanja.

Nadalje, usmjeravanje temeljeno na lokaciji u bežičnim senzorskim mrežama koristi podatke o lokaciji senzorskih čvorova s ciljem pružanja veće učinkovitosti i skalabilnosti. Protokoli usmjeravanja temeljeni na lokaciji predstavljaju prednost u smislu usmjeravanja podatkovnih paketa jer koriste lokalne informacija o lokaciji umjesto globalnih informacija o stanjima u mreži. Štoviše, cilj protokola usmjeravanja GEAR i GAF temeljenih na lokaciji jest ušteda energetskih resursa prilikom selekcije susjednog čvora za usmjeravanje paketa prema ciljnom području.

S obzirom da su bežične senzorske mreže specifične za različite aplikacije, postoji više mogućih strategija kao izvedivih rješenja za probleme usmjeravanja. Buduće perspektive u bežičnim senzorskim mrežama su usmjerene na izmjenu opisanih protokola usmjeravanja s ciljem minimiziranja potrošnje energetskih resursa i maksimiziranja životnog vijeka mreže. Kako raste učestalost primjene bežičnih senzorskih mreža, napredak u mrežnoj tehnologiji i tehnologiji baterija otvorit će put do praktične i isplative implementacije ovih protokola usmjeravanja.

Literatura

[1] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. Wireless sensor networks: a survey. Computer networks. 2002 Mar 15;38(4):393-422. Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/222534027_Wireless_Sensor_Networks_A_Survey [Pristupljeno: lipanj 2021.].

[2] Nack F. An overview on wireless sensor networks. Institute of Computer Science (ICS), Freie Universität Berlin. 2010;6. Preuzeto s: https://www.mi.fu-berlin.de/inf/groups/ag-tech/teaching/2008___09_WS/S_19565_Proseminar_Technische_Informatik/nack09verview.pdf [Pristupljeno: lipanj 2021.].

[3] Getelectronicandmobilenews. Basics of Wireless Sensor Networks: Classification, Topologies, Applications. Preuzeto s: https://getelectronicandmobilenews.blogspot.com/2019/03/basics-of-wireless-sensor-networks-wsn.html [Pristupljeno: lipanj 2021.].

[4] Matin MA, Islam MM. Overview of wireless sensor network. Wireless sensor networks-technology and protocols. 2012 Sep 6:1-3. Preuzeto s: https://www.intechopen.com/chapters/38793 [Pristupljeno: lipanj 2021.].

[5] Gui T, Ma C, Wang F, Li J, Wilkins DE. A novel cluster-based routing protocol wireless sensor networks using spider monkey optimization. InIECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society 2016 Oct 23 (pp. 5657-5662). IEEE. Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/312056767_A_novel_cluster-based_routing_protocol_for_wireless_sensor_networks_using_Spider_Monkey_Optimization [Pristupljeno: lipanj 2021.].

[6] Dinh NT, Kim Y. Auto-configuration in wireless sensor networks: A review. Sensors. 2019 Jan;19(19):4281. Preuzeto s: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6806193/ [Pristupljeno: lipanj 2021.].

[7] Sohraby K, Minoli D, Znati T. Wireless sensor networks: technology, protocols, and applications. John wiley & sons; 2007 Apr 6. Preuzeto s: http://www.tfb.edu.mk/amarkoski/WSN/Kniga-w02 [Pristupljeno: srpanj 2021.].

[8] Kandris D, Nakas C, Vomvas D, Koulouras G. Applications of wireless sensor networks: an up-to-date survey. Applied System Innovation. 2020 Mar;3(1):14. Preuzeto s:

https://www.researchgate.net/publication/339488392_Applications_of_Wireless_Sensor_Networks_An_Up-to-Date_Survey [Pristupljeno: srpanj 2021.].

[9] Đurišić MP, Tafa Z, Dimić G, Milutinović V. A survey of military applications of wireless sensor networks. In2012 Mediterranean conference on embedded computing (MECO) 2012 Jun 19 (pp. 196-199). IEEE. Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/261267386_A_Survey_of_Military_Applications_of_Wireless_Sensor_Networks [Pristupljeno: srpanj 2021.].

[10] Tahir R, Javed MY, Cheema AR. Rabbit-MAC: Lightweight authenticated encryption in wireless sensor networks. In2008 International Conference on Information and Automation 2008 Jun 20 (pp. 573-577). IEEE. Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/4365726_Rabbit-MAC_Lightweight_Authenticated__Encryption_in_Wireless_Sensor_Networks [Pristupljeno: srpanj 2021.].

[11] Meharouech A, Elias J, Mehaoua A. Moving towards body-to-body sensor networks for ubiquitous applications: A survey. Journal of Sensor and Actuator Networks. 2019 Jun;8(2):27. Preuzeto s: https://www.mdpi.com/2224-2708/8/2/27 [Pristupljeno: srpanj 2021.].

[12] Tariq M, Niaz M, Tahzeeb M, Kamran S, Wasim M. Wireless Sensor Network to Monitoring the Patient Health System Internet of things (IoT) based using ZigBee. International Journal of Computer Applications. 2018;182(20):17-22. Preuzeto s: https://www.semanticscholar.org/paper/Wireless-Sensor-Network-to-Monitoring-the-Patient-Tariq-Niaz/36aef6199cfcf4bf4b752638430985872eda489f [Pristupljeno: srpanj 2021.].

[13] Arampatzis T, Lygeros J, Manesis S. A survey of applications of wireless sensors and wireless sensor networks. InProceedings of the 2005 IEEE International Symposium on, Mediterrean Conference on Control and Automation Intelligent Control, 2005. 2005 Jun 27 (pp. 719-724). IEEE. Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/4156082_A_Survey_of_Applications_of_Wireless_Sensors_and_Wireless_Sensor_Networks [Pristupljeno: srpanj 2021.].

[14] Seminarsonly. Computational Intelligence in Wireless Sensor Networks. Preuzeto s: https://www.seminarsonly.com/computer%20science/Computational-Intelligence-in-Wireless-Sensor-Networks.php [Pristupljeno: srpanj 2021.].

[15] Cetinkaya O, Akan OB. Use of wireless sensor networks in smart homes. Emerging Communication Technologies Based on Wireless Sensor Networks: Current Research and Future Applications. 2016 Apr 5:233-58. Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/299982390_Use_of_Wireless_Sensor_Networks_in_Smart_Homes [Pristupljeno: srpanj 2021.].

[16] Medium. Why smart homes are no longer superfluous in the world. Preuzeto s: https://medium.com/@JOY_MRC/why-smart-homes-are-no-longer-superfluous-in-the-world-14e5c25d7e23 [Pristupljeno: srpanj 2021.].

[17] Sharma D, Verma S, Sharma K. Network topologies in wireless sensor networks: a review 1. Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/313198672_Network_topologies_in_wireless_sensor_networks_A_review [Pristupljeno: srpanj 2021.].

[18] Sharma S, Kumar D, Kishore K. Wireless sensor networks-A review on topologies and node architecture. International Journal of Computer Sciences and Engineering. 2013 Oct;1(2):19-25. Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/309180675_Wireless_Sensor_Networks-A_Review_on_Topologies_and_Node_Architecture [Pristupljeno: srpanj 2021.].

[19] Yu Y, Xue B, Chen Z, Qian Z. Cluster tree topology construction method based on PSO algorithm to prolong the lifetime of ZigBee wireless sensor networks. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2019 Dec;2019(1):1-3. Preuzeto s: https://jwcn-eurasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/s13638-019-1523-0 [Pristupljeno: srpanj 2021.].

[20] BBC. Network topologies, protocols and layers. Preuzeto s: https://www.bbc.co.uk/bitesize/guides/zr3yb82/revision/2 [Pristupljeno: srpanj 2021.].

[21] Ma X. Packet reception ratios in two-dimensional broadcast ad hoc networks. In2012 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC) 2012 Jan (pp. 412-416). IEEE. Preuzeto s: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6167455 [Pristupljeno: srpanj 2021.].

[22] Kumar N, Singh Y. Routing protocols in wireless sensor networks. InHandbook of Research on Advanced Wireless Sensor Network Applications, Protocols, and Architectures 2017 (pp. 86-

128). IGI Global. Preuzeto s: https://www.igi-global.com/chapter/routing-protocols-in-wireless-sensor-networks/162116 [Pristupljeno: srpanj 2021.].

[23] Al-Karaki JN, Kamal AE. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey. IEEE wireless communications. 2004 Dec 20;11(6):6-28. Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/3436000_Routing_Techniques_in_Wireless_Sensor_Networks_A_Survey [Pristupljeno: srpanj 2021.].

[24] ScienceDirect. Random deployment. Preuzeto s: https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/random-deployment [Pristupljeno: srpanj 2021.].

[25] Bendigeri KY, Mallapur JD. Multiple node placement strategy for efficient routing in wireless sensor networks. Wireless Sensor Network. 2015;7(08):101. Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/281580613_Multiple_Node_Placement_Strategy_for_Efficient_Routing_in_Wireless_Sensor_Networks [Pristupljeno: srpanj 2021.].

[26] Tarannum S. Energy conservation challenges in wireless sensor networks: A comprehensive study. Wireless Sensor Network. 2010 Jun 24;2(06):483. Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/220279273_Energy_Conservation_Challenges_in_Wireless_Sensor_Network_A_Comprehensive_Study [Pristupljeno: srpanj 2021.].

[27] Dagar M, Mahajan S. Data aggregation in wireless sensor network: a survey. International Journal of Information and Computation Technology. 2013;3(3):167-74. Preuzeto s: https://www.ripublication.com/irph/ijict_spl/11_ijictv3n3spl.pdf [Pristupljeno: srpanj 2021.].

[28] Mbowe JE, Oreku GS. Quality of service in wireless sensor networks. Wireless Sensor Network. 2014 Feb 19;2014. Preuzeto s: https://www.scirp.org/html/1-9501323_43028.htm [Pristupljeno: srpanj 2021.].

[29] Shabbir N, Hassan SR. Routing protocols for wireless sensor networks (WSNs). Wireless Sensor Networks-Insights and Innovations. 2017 Oct 4. Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/320266945_Routing_Protocols_for_Wireless_Sensor_Networks_WSNs [Pristupljeno: srpanj 2021.].

[30] Swarna N, Srinivasa AH, Harishkumar HC, Arathi P. Flat Based Network Routing protocol in Wireless Sensor Network. International Journal of Engineering Research & Technology.

Preuzeto s: https://www.ijert.org/research/flat-based-network-routing-protocol-in-wireless-sensor-network-IJERTCONV3IS21007.pdf [Pristupljeno: kolovoz 2021.].

[31] Kumar A, Shwe HY, Wong KJ, Chong PH. Location-based routing protocols for wireless sensor networks: A survey. Wireless Sensor Network. 2017 Jan 17;9(1):25-72. Preuzeto s: https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=73723 [Pristupljeno: kolovoz 2021.].

[32] Sabor N, Sasaki S, Abo-Zahhad M, Ahmed SM. A comprehensive survey on hierarchical-based routing protocols for mobile wireless sensor networks: Review, taxonomy, and future directions. Wireless Communications and Mobile Computing. 2017 Jan 1;2017. Preuzeto s: https://www.proquest.com/docview/2407626975 [Pristupljeno: kolovoz 2021.].

[33] Ahvar E, Ahvar S, Lee GM, Crespi N. An energy-aware routing protocol for query-based applications in wireless sensor networks. The Scientific World Journal. 2014 Feb 13;2014. Preuzeto s: https://www.hindawi.com/journals/tswj/2014/359897/ [Pristupljeno: kolovoz 2021.].

[34] Bakaraniya P, Mehta S. Features of wsn and various routing techniques for wsn: a survey. International Journal of Research in Engineering and Technology. 2012 Nov;1(3):349-54. Preuzeto s: https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.671.6829&rep=rep1&type=pdf [Pristupljeno: kolovoz 2021.].

[35] García Villalba LJ, Sandoval Orozco AL, Trivino Cabrera A, Barenco Abbas CJ. Routing protocols in wireless sensor networks. Sensors. 2009 Nov;9(11):8399-421. Preuzeto s: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3260592/ [Pristupljeno: kolovoz 2021.].

[36] Sharma K, Mittal N, Rathi P. Performance analysis of flooding and spin in wireless sensor networks. International Journal of Future Generation Communication and Networking. 2014;7(3):25-36. Preuzeto s: https://www.semanticscholar.org/paper/Performance-Analysis-of-Flooding-and-SPIN-in-Sensor-Sharma-Mittal/4188d624876480b7c74abb16105f54623e70618e [Pristupljeno: kolovoz 2021.].

[37] Anzola J, Pascual J, Tarazona G, Gonzalez Crespo R. A clustering WSN routing protocol based on kd tree algorithm. Sensors. 2018 Sep;18(9):2899. Preuzeto s:

https://www.researchgate.net/publication/327289160_A_Clustering_WSN_Routing_Protocol_Based_on_k-d_Tree_Algorithm [Pristupljeno: kolovoz 2021.].

[38] Kamarudin LM, Ahmad RB, Ndzi DL, Zakaria A, Kamarudin K, Ahmed ME. Simulation and analysis of leach for wireless sensor networks in agriculture. International Journal of Sensor Networks. 2016;21(1):16-26. Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/304634552_Simulation_and_analysis_of_LEACH_for_wireless_sensor_networks_in_agriculture [Pristupljeno: kolovoz 2021.].

[39] Zytoune O, Aboutajdine D. An optimized energy aware chaining technique for data gathering in wireless sensor networks. International Journal of Digital Information and Wireless Communication (IJDIWC). 2013 Apr 1;3(2):41-9. Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/239522840_AN_OPTIMIZED_ENERGY_AWARE_CHAINING_TECHNIQUE_FOR_DATA_GATHERING_IN_WIRELESS_SENSOR_NETWORKS [Pristupljeno: kolovoz 2021.].

[40] Shukla I, Meghanathan N. Power Efficient Gathering in Sensor Information System (PEGASIS): Impact of Leader Selection Strategies in Networks Containing TDMA and CDMA Nodes. Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/229049212_Power_Efficient_Gathering_in_Sensor_Information_System_PEGASIS_Impact_of_Leader_Selection_Strategies_in_Networks_Containing_TDMA_and_CDMA_Nodes [Pristupljeno: kolovoz 2021.].

[41] Dubey S, Agrawal C. A survey of data collection techniques in wireless sensor network. International Journal of Advances in Engineering & Technology. 2013 Sep 1;6(4):1664. Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/265683874_A_survey_of_data_collection_techniques_in_wireless_sensor_network [Pristupljeno: kolovoz 2021.].

[42] El Ouadi M, Hasbi A. Comparison of LEACH and PEGASIS Hierarchical Routing Protocols in WSN. Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/343645103_Comparison_of_LEACH_and_PEGASIS_Hierarchical_Routing_Protocols_in_WSN [Pristupljeno: kolovoz 2021.].

[43] Bhattacharyya D, Kim TH, Pal S. A comparative study of wireless sensor networks and their routing protocols. sensors. 2010 Dec;10(12):10506-23. Preuzeto s:

https://www.researchgate.net/publication/51872960_A_Comparative_Study_of_Wireless_Sensor_Networks_and_Their_Routing_Protocols [Pristupljeno: kolovoz 2021.].

[44] Manap Z, Ali BM, Ng CK, Noordin NK, Sali A. A review on hierarchical routing protocols for wireless sensor networks. Wireless personal communications. 2013 Sep;72(2):1077-104. Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/257675804_A_Review_on_Hierarchical_Routing_Protocols_for_Wireless_Sensor_Networks [Pristupljeno: kolovoz 2021.].

[45] Yoo H, Shim M, Kim D. A scalable multi-sink gradient-based routing protocol for traffic load balancing. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2011 Dec;2011(1):1-6. Preuzeto s: https://jwcn-eurasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/1687-1499-2011-85 [Pristupljeno: kolovoz 2021.].

[46] Rathi N, Saraswat J, Bhattacharya PP. A review on routing protocols for application in wireless sensor networks. arXiv preprint arXiv:1210.2940. 2012 Oct 10. Preuzeto s: https://arxiv.org/abs/1210.2940 [Pristupljeno: kolovoz 2021.].

[47] Saggi MK, Goyel S. A Systematic Review of Routing Protocols for Wireless Sensor Network. Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/295595436_A_Systematic_Review_of_Routing_Protocols_for_Wireless_Sensor_Network [Pristupljeno: kolovoz 2021.].

[48] Srivastav G. Effective Sensory Communication using GEAR Protocol. International Journal of Science and Research (IJSR) vol. 2013;9:1809-15. Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/317399868_Effective_Sensory_Communication_using_GEAR_Protocol [Pristupljeno: kolovoz 2021.].

[49] Soni V, Mallick DK. A novel scheme to minimize hop count for GAF in wireless sensor networks: Two-level GAF. Journal of Computer Networks and Communications. 2015 Jan 1;2015. Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/273513099_A_Novel_Scheme_to_Minimize_Hop_Count_for_GAF_in_Wireless_Sensor_Networks_Two-Level_GAF [Pristupljeno: kolovoz 2021.].

[50] Aznaoui H, Raghay S, Ouakrim Y, Aziz L. A Heuristic Algorithm of Cooperative Agents Communication for Enhanced GAF Routing Protocol in WSNs. Wireless Communications and

Mobile Computing. 2019 Jun 9;2019. Preuzeto s: https://www.hindawi.com/journals/wcmc/2019/4947610/ [Pristupljeno: kolovoz 2021.].

Popis kratica

APTEEN	Adaptive Threshold Sensitive Energy Efficient Network
BASN	Body Area Sensor Network
DD	Direct diffusion
CBR	Constant Bit Rate
CDMA	Code-Division Multiple Access)
GAF	Geographic Adaptive Fidelity
GEAR	Geographical and Energy Aware Routing
GPS	Global Positioning System
LEACH	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy
LIDAR	Light Detection and Ranging
MAC	Medium Access Control
MANET	Mobile ad hoc network
OSI	Open System Interconnection
PEGASIS	Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems
QoS	Quality of Service
RADAR	Radio Detection and Ranging
RFID	Radio Frequency Identification
SPIN	Sensor Protocol Information via Negotiation
TDMA	Time-Division Multiple Access
TEEN	Threshold Sensitive Energy efficient Sensor Network
UBR	Unspecified Bit Rate

Popis slika

Slika 1. Struktura bežičnog senzorskog čvora 4
Slika 2. Arhitektura bežične senzorske mreže 5
Slika 3. Istorazinska mrežna arhitektura 6
Slika 4. Hijerarhijska mrežna arhitektura 7
Slika 5. Protokolarni stog bežične senzorske mreže 8
Slika 6. Bežična senzorska mreža kategorije 1 11
Slika 7. Bežična senzorska mreža kategorije 2 11
Slika 8. Kooperativno i nekooperativno ponašanje senzorskih čvorova 12
Slika 9. Upotreba bežičnih senzorskih mreža na bojištu 15
Slika 10. Medicinska primjena bežične senzorske mreže 16
Slika 11. Primjena bežične senzorske mreže za otkrivanje požara 17
Slika 12. Mogućnosti pametne kuće bazirane na bežičnim senzorskim mrežama 19
Slika 13. Implementacija bežične senzorske mreže u transportnoj logistici 20
Slika 14. Mrežna topologija od točke do točke 22
Slika 15. Sabirnička mrežna topologija 23
Slika 16. Stablasta mrežna topologija 24
Slika 17. Zvjezdasta mrežna topologija 25
Slika 18. Prstenasta mrežna topologija 25
Slika 19. Isprepletena mrežna topologija 26
Slika 20. Kružna mrežna topologija 27
Slika 21. Rešetkasta mrežna topologija 28
Slika 22. Determinističko i nasumično raspoređivanje senzorskih čvorova 32
Slika 23. Osnovna klasifikacija protokola usmjeravanja 38
Slika 24. Kategorizacija protokola usmjeravanja 39
Slika 25. Komparacija istorazinskog i hijerarhijskog usmjeravanja 40
Slika 26. SPIN protokol 45
Slika 27. Faze LEACH protokola 48
Slika 28. Lanac strukture u PEGASIS protokolu 50
Slika 29. Lančana shema prikupljanja i agregacije podataka 51
Slika 30. Hijerarhijski PEGASIS 52
Slika 31. Mrežna arhitektura TEEN protokola 54
Slika 32. Procesi DD protokola 57
Slika 33. Prijenos podataka u RR protokolu 58
Slika 34. Geografsko prosljeđivanje u GEAR protokolu 59
Slika 35. GAF protokol 61

Popis tablica

Tablica 1. Usporedba performansi mrežnih topologija 29
Tablica 2. Usporedba performansi između SPIN protokola i preplavljivanja 47
Tablica 3. Komparativna analiza parametara protokola usmjeravanja..... 62

Popis grafikona

Grafikon 1. Odnos između postotka vijeka trajanja mreže i broja senzorskih čvorova 33
Grafikon 2. Prosječna energija raspršena po seriji u odnosu na broj klastera 49
Grafikon 3. Smrtnost senzorskih čvorova u odnosu na broj serija 53
Grafikon 4. Broj aktivnih čvorova u odnosu na broj serija 55
Grafikon 5. Preostala energija u odnosu na broj serija 60

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj diplomski rad isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu diplomskog rada pod naslovom **Analiza protokola usmjeravanja u bežičnim senzorskim mrežama**

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

Student/ica:

U Zagrebu, 9/9/2021

Ivanić Hana

(potpis)