

Arhitektura senzorske komunikacijske mreže u zatvorenim prostorima

Mitar, Nikola

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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:119:074240>

Rights / Prava: [In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-24**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -
Institutional Repository](#)



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

**ARHITEKTURA SENZORSKE KOMUNIKACIJSKE
MREŽE U ZATVORENIM PROSTORIMA
ARCHITECTURE OF SENSOR COMMUNICATION
NETWORK IN CLOSED SPACES**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Marko Periša

Student: Nikola Mitar

JMBAG: 013525746

Zagreb, kolovoz 2023.

Zagreb, 22. svibnja 2023.

Zavod: **Zavod za informacijsko komunikacijski promet**
Predmet: **Arhitektura telekomunikacijske mreže**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 7211

Pristupnik: **Nikola Mitar (0135257462)**
Studij: **Promet**
Smjer: **Informacijsko-komunikacijski promet**

Zadatak: **Arhitektura senzorske komunikacijske mreže u zatvorenim prostorima**

Opis zadatka:

U radu je potrebno opisati elemente arhitekture sustava za ispruku podataka i informacija u zatvorenim prostorima. Također, je potrebno navesti karakteristike rada senzora u zatvorenim prostorima te odgovarajuću komunikacijsku tehnologiju na primjeru logističkog procesa.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

izv. prof. dr. sc. Marko Periša

ARHITEKTURA SENZORSKE KOMUNIKACIJSKE MREŽE U ZATVORENIM PROSTORIMA

SAŽETAK

Zbog slojevite strukture senzorske komunikacijske mreže moguće su raznovrsne primjene u različitim okruženjima. S obzirom na izgled arhitekture senzora i njihove moguće primjene, može se reći da su izuzetno korisni u gotovo svim aspektima života, za što je također zaslužna i mogućnost različitih topologija. Sve navedeno čini ih odličnim sudionicima pri logističkim procesima pogotovo zbog toga što mogu imati različite primjene. Također možemo reći da su revolucionirali logističke procese i nastavljaju činiti isto zbog velikog broja prednosti koje nude upravo u tim procesima. Daljnjim razvojem, smanjenjem veličine i integracijom novih tehnologija, povećavat će se značaj i uporaba senzora i senzorskih mreža u logističkim procesima.

KLJUČNE RIJEČI: arhitektura senzorske mreže; logistički procesi; razvoj senzora; senzori

SUMMARY

Due to the layered structure of the sensor communication network, various applications in different environments are possible. Considering the appearance of sensor architecture and their possible applications, it can be said that they are extremely useful in almost all aspects of life, which is also due to the possibilities of different topologies. All of the above makes them excellent participants in logistics processes, especially because they can have different applications. We can also say that they have revolutionized logistics processes and continue to do the same due to the large number of advantages they offer precisely in these processes. With further development, size reduction and integration of new technologies, the importance and use of sensors and sensor networks in logistics processes will increase.

KEYWORDS: logistic processes; sensors; sensor development; sensor network architecture

SADRŽAJ

1.	UVOD	1
2.	ELEMENTI ARHITEKTURE SENZORSKE KOMUNIKACIJSKE MREŽE.....	3
2.1.	Elementi arhitekture sustava za isporuku podataka u zatvorenim prostorima	5
2.2.	Slojevita struktura senzorske mreže	7
2.2.1.	Aplikacijski sloj.....	8
2.2.2.	Transportni sloj.....	8
2.2.3.	Mrežni sloj	9
2.2.4.	Podatkovni sloj	10
2.2.5.	Fizički sloj.....	10
3.	VRSTE I KARAKTERISTE SENZORSKIH KOMUNIKACIJSKIH MREŽA I SENZORA	12
3.1.	Primjena isprepletene (Mesh) mreže	15
3.2.	Mobilne senzorske mreže	16
3.3.	Podvodne senzorske mreže	17
3.4.	Podzemne senzorske mreže	18
3.5.	Multimedijske senzorske mreže	19
3.6.	Zemaljske senzorske mreže	19
3.7.	Klasifikacija senzora.....	20
4.	MOGUĆNOSTI PRIMJENE SENZORA U ZATVORENIM PROSTORIMA NA PRIMJERU LOGISTIČKOG PROCESA	23
4.1.	Prednosti primjene senzora u logistici.....	26
4.2.	Prikaz logističkog procesa temeljenog na sensorima	28
5.	PERSPEKTIVE RAZVOJA SENZORSKIH KOMUNIKACIJSKIH MREŽA I SENZORA	31
5.1.	Minijaturizacija i multisenzorski sustavi	31
5.2.	Integracija IoT-a, Edge i Fog računalstvo	32

5.3. Izazovi u razvoju senzorske mreže	33
6. ZAKLJUČAK.....	35
LITERATURA.....	36
POPIS SLIKA	38

1. UVOD

U eri brzog tehnološkog napretka, točna i brza razmjena informacija postala je sastavni dio našeg svakodnevnog života. Integracija različitih senzorskih tehnologija i komunikacijskih mreža dovela je do revolucionarnog razvoja u načinima na koji percipiramo i komuniciramo sa svijetom oko nas. Među tim inovacijama, koncept senzorne komunikacijske mreže pojavio se kao ključni pokretač napretka, olakšavajući razmjenu podataka koji nas guraju u međusobno povezaniju budućnost.

Ovaj rad istražuje utjecaj komunikacijskih mreža senzora unutar ograničenih okruženja, te daje uvid u arhitekturu, vrste, karakteristike i potencijalne primjene takvih mreža, s posebnim fokusom na zatvorene prostore. Osim toga, cilj je prikazati mogućnosti uporabu komunikacijskih mreža senzora za poboljšanje operacija u zatvorenom prostoru, koristeći logistički proces kao praktičan primjer. Na kraju, rad se bavi budućim mogućnostima ovih mreža i senzora, prikazujući njihov razvoj i mogućnosti uporabe.

Uzimajući u obzir navedene informacije rad je podijeljen na 6 poglavlja:

1. Uvod
2. Elementi arhitekture senzorske mreže
3. Vrste i karakteristike senzorskih komunikacijskih mreža i senzora
4. Mogućnosti primjene senzora u zatvorenim prostorima na primjeru logističkog procesa
5. Perspektive razvoja senzorskih mreža i senzora
6. Zaključak

U drugom poglavlju, nakon uvoda, naziva Elementi arhitekture senzorske mreže definirana je arhitektura senzorskog čvora, senzorske komunikacijske mreže, te je prikazana slojevita struktura senzorske mreže i objašnjena po spomenutim slojevima.

Treće poglavlje naziva Vrste i karakteristike senzorskih komunikacijskih mreža i senzora objašnjava podjelu senzorskih mreža s obzirom na topologiju, поближе objašnjava isprepletenu

topologiju te s obzirom na okruženje. Također je prikazana i podjela senzora s obzirom na različite klasifikacije, te s obzirom na primjenu od kojih su neki i pobliže objašnjeni.

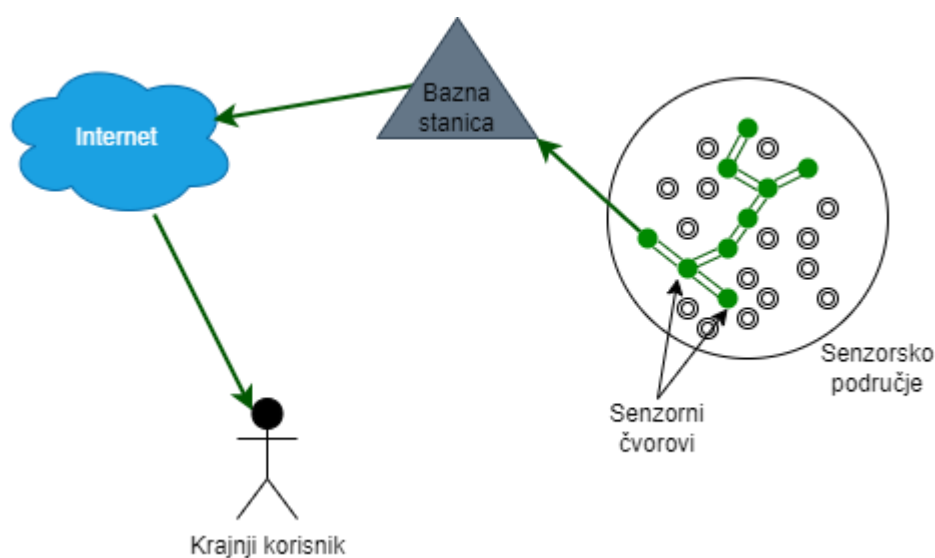
U četvrtom poglavlju, pod nazivom Mogućnosti primjene senzora u zatvorenim prostorima na primjeru logističkog procesa, objašnjena je primjena senzora u logističkoj industriji, prikazane su prednosti uporabe senzora, te je objašnjen i logistički proces temeljen na sensorima.

Peto poglavlje, naziva Perspektive razvoja senzorskih mreža i senzora, prikazuje moguća poboljšanja u daljnjem razvoju senzora i senzorskih mreža, te se oslanja na minijaturizaciju i uporabu multisenzora. Također opisuje integraciju IoT-a, primjenu Edge i Fog tehnologija, te ukratko prikazuje i izazove s kojim se susreće senzorska mreža.

U posljednjem poglavlju iznesen je zaključak koji povezuje sadržaje prethodnih poglavlja, te daje uvid u cjeloviti završni rad.

2. ELEMENTI ARHITEKTURE SENZORSKE KOMUNIKACIJSKE MREŽE

Senzorsku komunikacijsku mrežu možemo definirati kao skup velikog broja senzorskih čvorova koji su međusobno umreženi. Sensori koji se nalaze na čvorovima koriste se kako bi se promatrala, pratila te zabilježila fizička obilježja u okruženju, te interakcija objekata u određenom prostoru. Nakon promatranja i zabilježavanja ponašanja/događaja na senzoru, ujedinjuju se prikupljeni podatci na središnjoj lokaciji, tj. serverima, nakon čega krajnji korisnik dobiva informacije, proces prikazan na slici 1 [1].



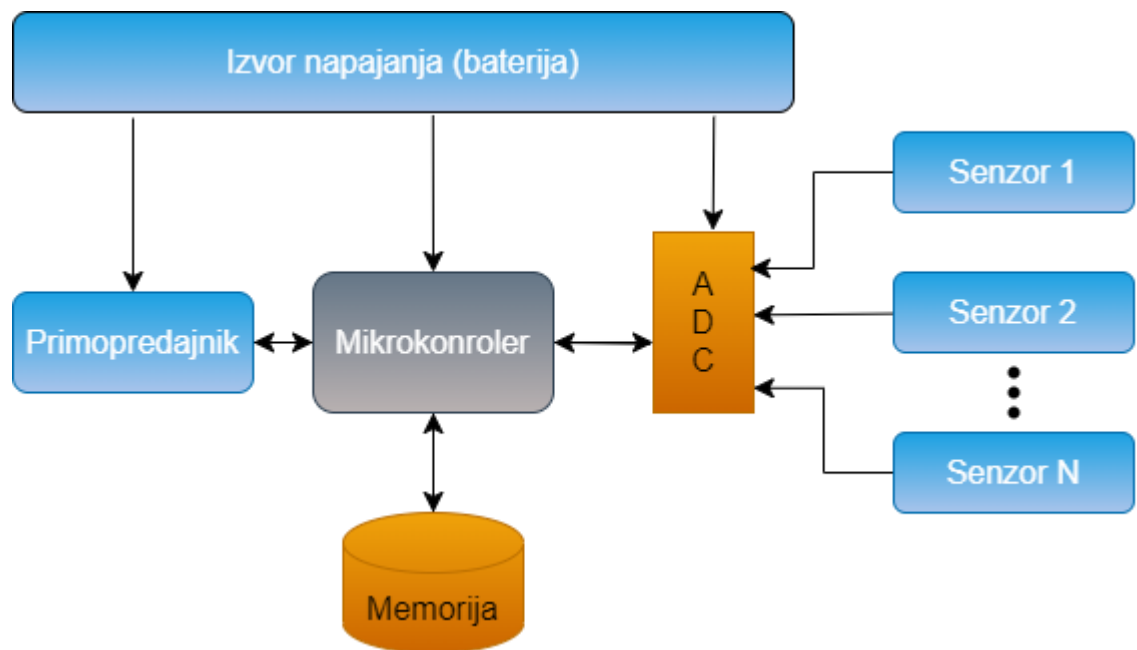
Slika 1. Prikaz općenite arhitekture senzorske mreže

Izvor: [1]

Senzorske mreže mogu mjeriti fizičke komponente poput temperature, izloženost svjetlu, vlagu, tlak, itd. Glavna komponenta senzorske komunikacijske mreže je čvor (senzor). Prikaz arhitekture senzorskog čvora možemo vidjeti na slici 2. U praksi se mreža sastoji od od par desetaka do nekoliko tisuća senzornih uređaja, gdje je svaki uređaj spojen u jedan ili više čvorova. Svaki takav čvor se u principu sastoji od nekoliko dijelova, kao što su [1]:

- Radijski primopredajnik – sadrži internu antenu ili je spojen na vanjsku
- Mikrokontroler – električni krug za povezivanje sa sensorima
- Izvor energije – najčešće baterija

Čvorište može varirati u veličini i cijeni, ovisno o kompleksnosti te potrebnoj energiji, memoriji, radnoj brzini i potrebnoj propusnosti (eng. *bandwidth*) [2].



Slika 2. Arhitektura senzornog čvora

Izvor: [1]

Bazna postaja je također bitan dio, tj. komponenta senzorske komunikacijske mreže. Bazne postaje su jedna od komponenti senzorske mreže s mnogo više značajki kao što su računanje, očuvanje energije i mogućnost dijeljenje zabilježenih podataka. One igraju ulogu pristupnika (eng. *gateway*) između senzorskih čvorova i krajnjeg korisnika. Ovi su pristupnici obično korisni za prosljeđivanje snimljenih podataka sa senzora na servere [2].

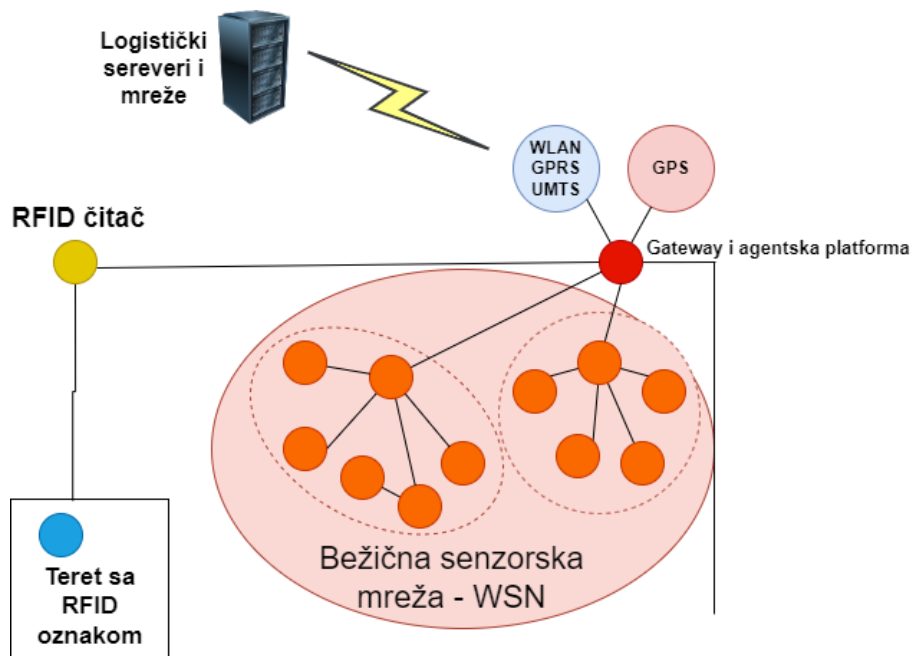
Senzorska mreža radi na primjeru da kada senzor osjeti fizički događaj, daje izlaznu informaciju u obliku analognog signala. Analogno-digitalni konverter zatim zabilježenu informaciju pretvara u digitalni signal, koji se predaje mikrokontrolorima. Mikrokontrolori su glavna komponenta senzorskog čvora iz razloga što kontroliraju funkcionalnost ostalih dijelova čvora, te se većinom sastoje od centralne procesne jedinice (eng. *central processing unit - CPU*), memorijskog modula, te ostalih komponenti ugrađenih u jedan integrirani krug. Mikrokontrolori se mogu isprogramirati kako bi se odlučilo što će se činiti sa zabilježenim informacijama, što pohraniti u memoriju itd [3].

Primopredajnik uz to što ima mogućnosti primanja i predaje, ima i 4 operativna stanja: slanje, primanje, mirovanje i spavanje. Također, bitan dio čvora je i vanjski izvor napajanja koji omogućuje funkcioniranje svih ostalih dijelova senzornog čvora [2].

2.1. Elementi arhitekture sustava za isporuku podataka u zatvorenim prostorima

Suradnički logistički procesi trebaju informacije o svom okruženju kako bi omogućili donošenje odluka. Te se informacije mogu podijeliti na vanjski uvid (npr. informacije o prometu, tržišne cijene) i unutarnji uvid za istraživanje transportnog okruženja koje utječe na kvalitetu transportirane robe. Unutarnji uvid dobivaju čvorovi senzora koji se mogu pričvrstiti na stavke tereta ili se mogu postaviti zasebno tijekom procesa utovara. Ti senzorski čvorovi autonomno formiraju bežične senzorske mreže. Dobivena očitavanja senzora prikupljaju se, agregiraju i prethodno obrađuju u mreži senzora i prosljeđuju pristupnom sustavu na razini transportnog sustava (npr. kontejner). U ovom se pristupniku očitavanja senzora pretvaraju u dinamičke informacije o kvaliteti pomoću ugrađenog sustava procjene. Ove informacije o kvaliteti koriste se za određivanje utjecaja kvalitete tijekom transportnog procesa u danim uvjetima. *Gateway* može komunicirati s udaljenim logističkim poslužiteljima i mrežama putem *UMTS*-a, *GPRS*-a ili *WLAN*-a, ovisno o dostupnosti. Neposredan gubitak kvalitete (npr. zbog kvara rashladnog agregata) može pokrenuti ponovno planiranje rute do sljedećeg dostupnog skladišta. Slika 3 prikazuje arhitekturu sustava i implementaciju autonomnog logističkog prijevoznika tereta na primjeru inteligentnog kontejnera [4]

Osnovni elementi inteligentnog kontejnera su centralni *gateway* sustav na razini transportnog sustava i senzorska mreža, kao što je prikazano na slici 3.



Slika 3. Sistemska arhitektura pametnog kontejnera

Izvor: [4]

Gateway sustav se u osnovi sastoji od *RFID* čitača, komunikacijskog *front-enda* i ugrađene host platforme. *RFID* čitač je potreban za identifikaciju teretnih stavki koje se utovaraju ili istovaraju iz transportnog sustava i izravno je povezan s ugrađenom platformom. Korištenjem *RFID* tehnologije mogu se osigurati dodatne popratne informacije (npr. trenutni poslužitelj na kojem je pokrenut agent za predstavljanje). Komunikacijski *front-end* pruža vezu između transportnih medija i vanjskog svijeta. Pomoću ove veze mogu se prikupljati globalni podaci (npr. pozicioniranje, promet, informacije o tržištu). Ovu komunikacijsku vezu također koristi agentski sustav unutar pristupnika[4].

Bežična senzorska mreža (eng. *Wireless Sensor Network* – WSN) nadzire teretni prostor. Čvorovi mreže dodaju se zasebno tijekom procesa učitavanja i adaptivno formiraju energetske učinkovite topologije[4].

Prije nego što se teretna stavka utovari u kontejner, njezinu *RFID* oznaku čita sustav pratioca tereta (eng. *Cargo Attendant* - CA) unutar skladišta. CA postavlja softverskog agenta koji nadzire stavku, pohranjuje potrebne parametre okruženja i sprječava model koji ukazuje na utjecaj

kvalitete tijekom procesa transporta. Čim se teret utovari u inteligentni spremnik, očitava se njegova *RFID* oznaka. Ova oznaka sadrži adresu izvornog CA i povezana je s prethodno raspoređenim CA agentom i utovarenim teretom. CA agent se sada može preuzeti na agentsku platformu inteligentnog kontejnera, a inteligentni kontejner sada može konfigurirati WSN prema parametrima koje zahtijeva teret. Ovo se radi za sve učitane stavke. Ako vrsta senzora nedostaje, osoblju za utovar naređuje se da postavi tu vrstu senzora u kontejner prije pokretanja[4].

Novo postavljene senzorske čvorove automatski se dodaju u mrežu. Autentifikaciju u WSN-u može jamčiti hibridni *RFID/ECC* (kriptosustav eliptičke krivulje) mehanizam. Potrebna je energetska učinkovita topološka kontrola kako bi se osigurao dug životni vijek sustava. Stoga će sustav koristiti višeslojnu topologiju stabla klastera. Kako bi se osigurao robustan rad, izvršit će se samo testiranje svakog senzora kao i unakrsna provjera očitavanja senzora na razini klastera kako bi se povećala pouzdanost očitavanja senzora. Čim se teret utovari, CA agent će započeti dinamički nadzor kvalitete na temelju očitavanja senzora koje je prikupio WSN. Ako se otkrije bilo koji događaj (npr. smanjenje kvalitete izvan nominalnog područja) koji može uzrokovati ozbiljno oštećenje tereta, CA agent će pokrenuti alarm koji se signalizira distribuiranim instancama planiranja koristeći najbolji dostupni mobilni komunikacijski kanal. Ti agenti procjenjuju situaciju i mogu pokrenuti ponovno planiranje rute do sljedećeg dostupnog skladišta ili tržnice. Po dolasku na odredište, izvorni CA bit će obaviješten da je teret uspješno isporučen, a prenosi se i trenutno stanje kvalitete[4].

2.2. Slojevita struktura senzorske mreže

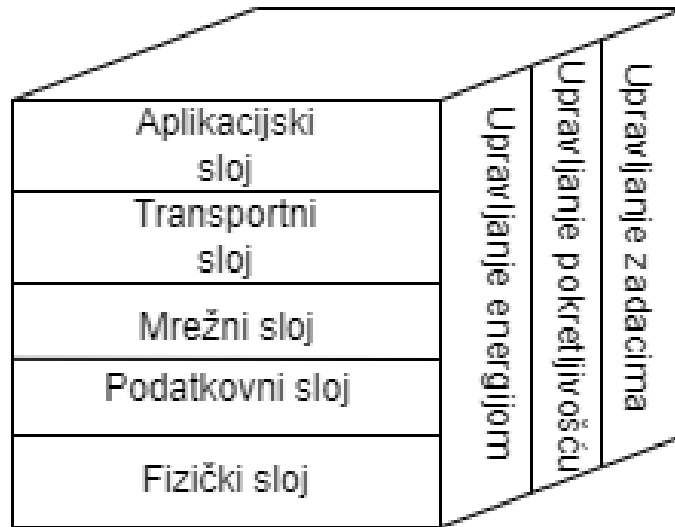
Senzorska mreža ima slojevitost strukturu, te je ispravan dizajn protokolarnog stoga vidljiv na slici 3. Sastoji se od pet OSI slojeva [5]:

- aplikacijski,
- transportni,
- mrežni,
- podatkovni,
- fizički

te tri preklopna sloja:

- upravljanja energijom,

- upravljanja pokretljivošću,
- upravljanja zadacima



Slika 4. Slojeviti prikaz arhitekture senzorske mreže

Izvor: [5]

2.2.1. Aplikacijski sloj

Brojni protokoli aplikacijskog sloja, poput onih za širenje upita, lokalizaciju čvorova, vremensku sinkronizaciju i mrežnu sigurnost, uključeni su u aplikacijski sloj. Protokol za upravljanje senzorima (eng. *sensor management protocol* - SMP) ilustracija je protokola za upravljanje aplikacijskim slojem koji nudi softverske operacije za obavljanje raznih zadataka, kao što je razmjena podataka povezanih s lokacijom, sinkronizacija senzorskih čvorova, pomicanje senzorskih čvorova, raspoređivanje senzornih čvorova i upit statusa senzorskih čvorova. Korisničke aplikacije mogu postavljati upite, odgovarati na upite i prikupljati odgovore korištenjem sučelja koje pruža senzorski protokol za upite i diseminaciju podataka (eng. *sensor query and data dissemination protocol* - SQDDP). Senzorski jezik upita i zadataka (eng. *sensor query and tasking language* - SCTL) pruža senzorski programski jezik koji se koristi za implementaciju među softvera u senzorskoj mreži [6].

2.2.2. Transportni sloj

Općenito, transportni sloj odgovoran je za pouzdanu isporuku podataka od kraja do kraja između senzorskih čvorova i odvodnika. Zbog ograničenja energije, računanja i pohrane senzorskih

čvorova, tradicionalni transportni protokoli ne mogu se primijeniti izravno na senzorske mreže bez modifikacije. Na primjer, konvencionalni mehanizmi kontrole pogrešaka temeljeni na end-to-end ponovnom prijenosu i mehanizmi kontrole zagušenja koji se koriste u protokolu kontrole prijenosa (eng. *Transmission Control Protocol* - TCP) ne mogu se izravno koristiti za senzorske mreže jer nisu učinkoviti u korištenju resursa [6].

S druge strane, senzorske mreže su specifične s obzirom na primjenu. Mreža senzora obično se postavlja za specifičnu primjenu, na primjer, praćenje staništa, kontrolu inventara i nadzor bojišta. Različite aplikacije mogu imati različite zahtjeve pouzdanosti, što ima veliki utjecaj na dizajn protokola prijenosnog sloja. Osim toga, isporuka podataka u senzorskim mrežama prvenstveno se odvija u dva smjera: od čvorova do bazne stanice, te od bazne stanice prema izvornom čvoru [6].

2.2.3. Mrežni sloj

Mrežni sloj ima zadaću usmjeravanja podataka iz izvornih senzornih čvorova do baznih stanica. U senzorskoj mreži čvorovi su raspoređeni u određenom senzorskom području kako bi se promatrao događaj od interesa. Zabilježeni događaj ili podaci se trebaju poslati prema baznoj stanici. Izvorni čvor općenito može poslati očitane podatke u baznu stanicu izravno putem bežične komunikacije velikog dometa s jednim skokom (*single-hop*) ili putem bežične komunikacije kratkog dometa s više skokova (*multi-hop*). Međutim, bežična komunikacija dugog dometa je skupa u smislu potrošnje energije i složenosti implementacije za senzorske čvorove. U kontrastu, multihop komunikacija kratkog dometa ne samo da može značajno smanjiti energiju potrošnju senzorskih čvorova, ali i učinkovito smanjiti širenje signala i efekte slabljenja kanala svojstvene bežičnoj komunikaciji velikog dometa, i stoga se preferira. Budući da su senzorski čvorovi gusto raspoređeni i susjedni čvorovi su blizu jedan drugome, moguće je koristiti multihop komunikaciju kratkog dometa u senzorskim mrežama. U ovom slučaju kako bi se podaci poslali baznoj stanici izvorni čvor mora primijeniti protokol usmjeravanja za odabir energetski učinkovite putanje od čvora do bazne stanice.

Međutim, protokoli usmjeravanja za tradicionalne bežične mreže nisu prikladni za senzorske mreže jer ne smatraju energetska učinkovitost primarnom brigom. Također, podaci iz senzorskog područja prema baznoj stanici stvaraju više prema jednom uzorak prijenosa u senzorskim mrežama. Kombinacija multihop (tj. *hop-by-hop*) i mnogo-na-jedan (*many-to-one*)

komunikacija rezultira značajnim povećanjem intenziteta tranzitnog prometa, a time i zagušenjem paketa, kolizijom, gubitkom, kašnjenjem i potrošnjom energije kako se podaci približavaju odredištu. Senzorski čvorovi bliži odredištu, obično unutar malog broja skokova, izgubit će veći broj paketa i potrošiti mnogo više energije nego čvorovi dalje od odredišta, čime se uvelike smanjuje radni vijek cijele mreže. Stoga je važno uzeti u obzir energetska ograničenja senzorskih čvorova kao i jedinstveni oblik prometa u dizajnu mrežnog sloja i protokola usmjeravanja [6].

2.2.4. Podatkovni sloj

Podatkovni sloj odgovoran je za multipleksiranje toka podataka, stvaranje i otkrivanje okvira podataka, pristup mediju i kontrolu pogrešaka kako bi se osigurao pouzdani prijenos od točke do točke i od točke do više točaka. Jedna od najvažnijih funkcija sloja podatkovne veze je kontrola pristupa mediju (*media access control* - MAC). Primarni cilj MAC-a je pravedno i učinkovito dijeljenje zajedničkih komunikacijskih resursa ili medija među više senzorskih čvorova kako bi se postigla dobra mrežna izvedba u smislu potrošnje energije, mrežne propusnosti i kašnjenja isporuke. Važna funkcija sloja podatkovne veze je kontrola grešaka u prijenosu podataka. U mnogim primjenama mreža senzora se postavlja u teškim uvjetima gdje je bežična komunikacija sklona pogreškama. U ovom slučaju, kontrola pogrešaka postaje nezamjenjiva i kritična za postizanje pouzdanosti veze ili pouzdanog prijensa podataka. Općenito, postoje dva glavna mehanizma kontrole pogrešaka: *Forward Error Correction* - FEC i *Automatic Repeat Quest* - ARQ. ARQ postiže pouzdan prijenos podataka ponovnim slanjem izgubljenih paketa podataka ili okvira. Očito, to uzrokuje značajne troškove retransmisije i dodatnu potrošnju energije, te stoga nije prikladno za senzorske mreže. FEC postiže pouzdanost veze korištenjem kodova za kontrolu pogrešaka u prijenosu podataka, što uvodi dodatne složenosti kodiranja i dekodiranja koje zahtijevaju dodatne resurse obrade u senzorskim čvorovima. Međutim, FEC može značajno smanjiti stopu pogreške kanala (*bit error rate* - BER) za bilo koju snagu prijensa. S obzirom na energetska ograničenja senzorskih čvorova, FEC je još uvijek najučinkovitije rješenje za kontrolu pogrešaka u senzorskim mrežama [6].

2.2.5. Fizički sloj

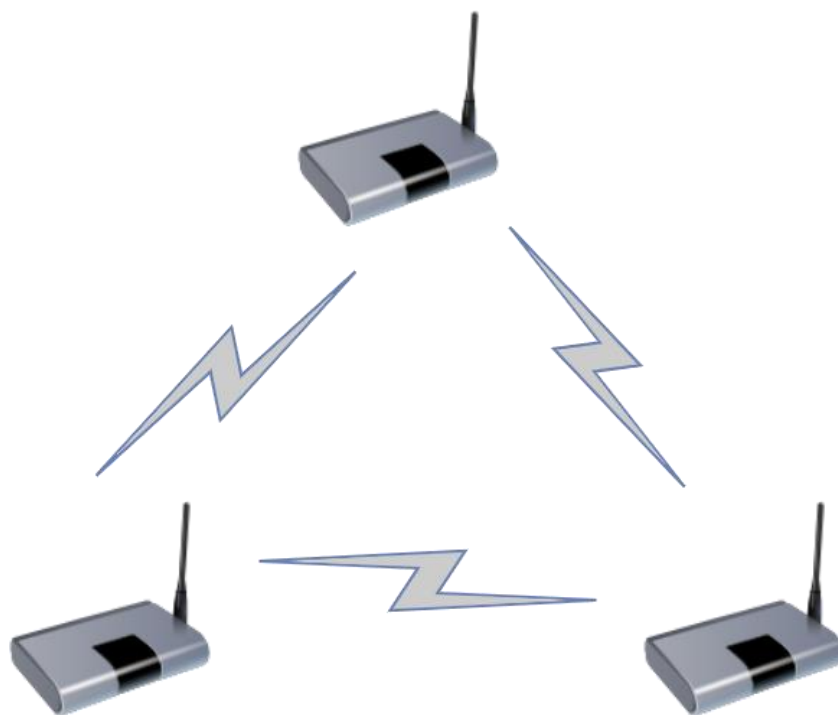
Fizički sloj je odgovoran za pretvaranje tokova bitova iz sloja podatkovne veze u signale koji su prikladni za prijenos preko komunikacijskog medija.

U tu svrhu mora se baviti raznim zadaćama, poput odabira prijenosnog medija i frekvencije, generiranja nosive frekvencije, modulacije i detekcije signala i enkripcije podataka. Osim toga, mora se baviti i dizajnom temeljnog hardvera te raznim električnim i mehaničkim sučeljima. Odabir medija i frekvencije važan je problem za komunikaciju između senzorskih čvorova [6].

3. VRSTE I KARAKTERISTE SENZORSKIH KOMUNIKACIJSKIH MREŽA I SENZORA

Jedan od načina na koje možemo podijeliti senzorsku komunikacijsku mrežu je prema topologiji bežične senzorske mreže. Neke od osnovnih topologija bežične senzorske mreže (eng. *Wireless Sensor Network* – WSN) vidljive na slici 4 su [7]:

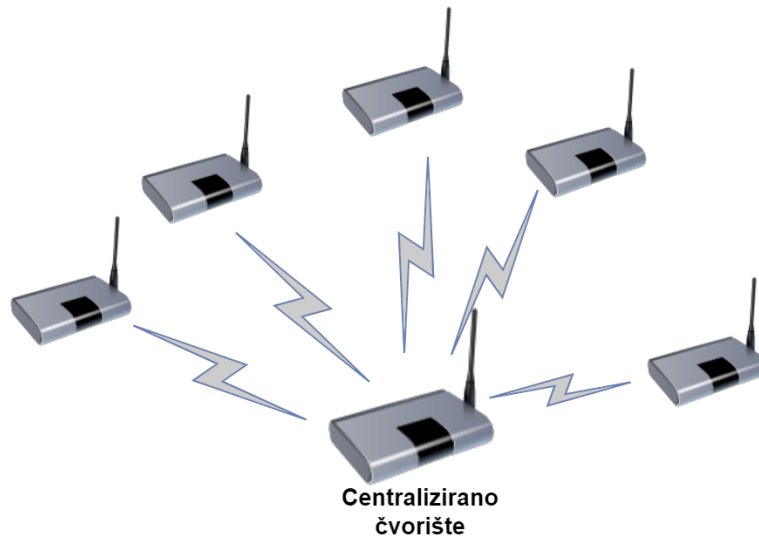
1. Točka-do-točke (eng. *Point-to-Point*) topologija - u ovoj topologiji, prikazanoj na slici 4, središnje čvorište nije potrebno. Senzorski čvor može izravno komunicirati s drugim čvorovima. Ovo je vrlo popularna topologija i ima jedan kanal. Svaki uređaj može se koristiti kao klijent i poslužitelj.



Slika 5. Točka-do-točke topologija

Izvor: [7]

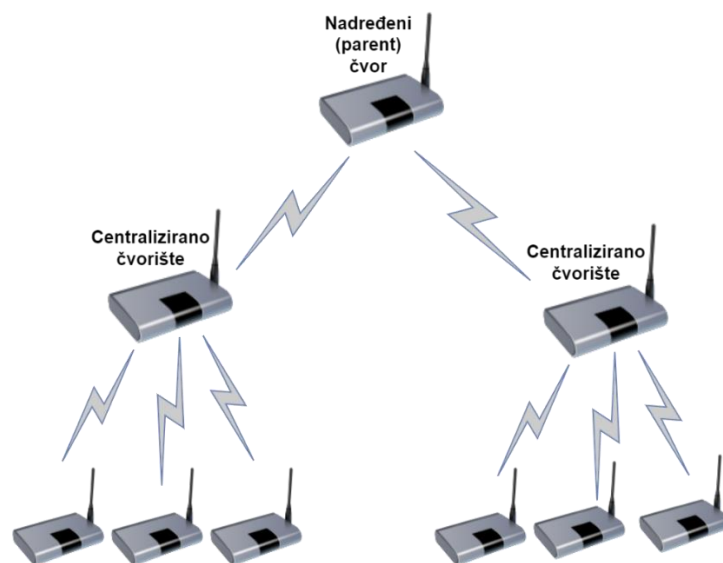
2. Zvezdasta (eng. *Star*) topologija - za razliku od topologije od točke do točke, centralizirano komunikacijsko čvorište potrebno je u zvezdastoj mreži prikazanoj na slici 5. U ovoj topologiji ne postoji izravna komunikacija između čvorova; svaka komunikacija se ostvaruje kroz centralizirano čvorište.



Slika 6. Zvezdasta topologija

Izvor: [7]

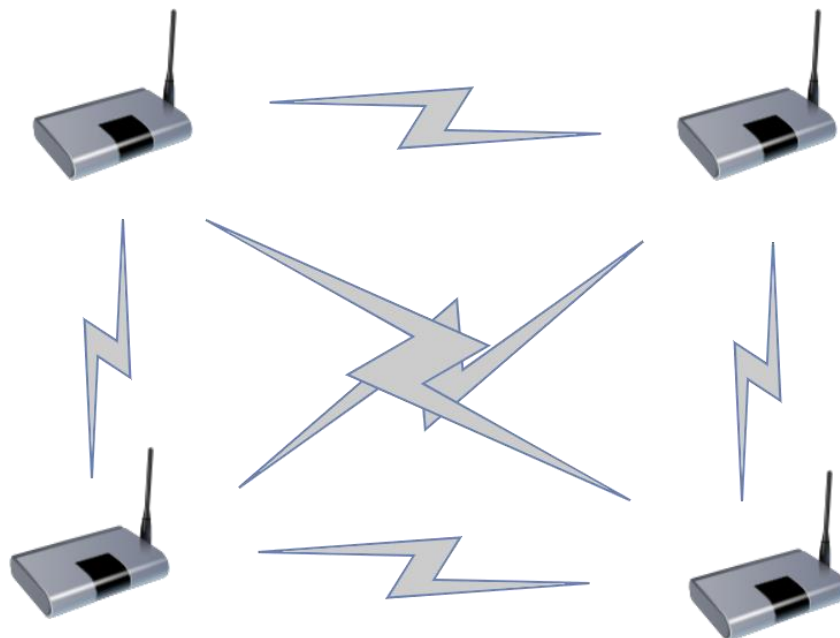
3. Stablasta (eng. *Tree*) topologija - ova topologija, prikazana na slici 6, je kombinacija Point-to-Point mreže i zvezdaste mreže. Središnje čvorište je poznato kao nadređeni (eng. *parent*) čvor. Podaci se prenose od rubnog senzornog čvora do nadređenog čvora. Glavna prednost ove topologije je potrošnja manje energije u usporedbi s drugim mrežnim topologijama.



Slika 7. Stablasta topologija

Izvor: [7]

4. Isprepletena (eng. *Mesh*) topologija: U mesh topologiji prikazanoj na slici 7 podaci se mogu prenositi s jednog čvora na drugi. Svi čvorovi mogu izravno komunicirati jedni s drugima bez korištenja središnjeg komunikacijskog čvorišta. Mesh topologija je najpouzdanija mrežna topologija, ali je složena i troši puno energije.



Slika 8. Mesh topologija

Izvor: [7]

Wi-Fi se obično koristi u zvjezdastim topologijama, gdje se više senzora ili uređaja bežično povezuje sa središnjom pristupnom točkom. To omogućuje prijenos podataka velikom brzinom i prikladno je za aplikacije poput kućne automatizacije i uredskih mreža gdje se središnja kontrolna točka koristi za upravljanje povezanim uređajima [8].

Zigbee se često koristi u mesh topologijama, posebno u scenarijima gdje je neophodna robusna komunikacija. Senzori koji koriste *Zigbee* tvore mesh mrežu koja se sama obnavlja, pružajući redundanciju i pouzdanost. To je korisno u aplikacijama kao što su pametne kuće ili industrijske situacije gdje čvorovi moraju međusobno komunicirati izravno [8].

LoRaWAN se obično nalazi u topologijama stabla ili točka-više točaka. U topologiji stabla, senzori na različitim lokacijama komuniciraju podatke kroz međučvorove, agregirajući podatke dok se kreću prema središnjem pristupniku. *LoRaWAN*-ova sposobnost dugog dometa čini je prikladnom za primjene kao što je praćenje poljoprivrede ili daljinsko očitavanje okoliša [8].

Topologija od točke do točke razlikuje se od gore navedenih mrežnih topologija. U topologiji od točke do točke, dva određena čvora ili uređaja komuniciraju izravno jedan s drugim, zaobilazeći potrebu za mrežom ili središnjim čvorištem. Ova je topologija idealna za situacije u kojima je potrebna razmjena podataka između dvije točke, kao što su dva daljinska senzora ili senzor i kontroler. Veze od točke do točke mogu koristiti tehnologije kao što su žičani Ethernet, optička vlakna ili čak RF komunikacija, ovisno o zahtjevima za udaljenost i brzinu prijenosa podataka [8].

Nadalje što se tiče bežičnih senzorskih mreža možemo ih podijeliti i na mobilne, podvodne, podzemne, multimedijske, te zemaljske bežične senzorske mreže.

3.1. Primjena isprepletene (Mesh) mreže

Tradicionalni WSN-ovi sastoje se od skupa senzorskih čvorova, gdje očitane podatke često prikuplja jedan ili više središnjih uređaja, dok su ti središnji uređaji povezani s vanjskim kontrolnim poslužiteljem i/ili bazom podataka koju ovlaštenu korisnici mogu koristiti za traženje interpretiranih ili neobrađenih podataka. Novi smjerovi WSN aplikacija kao što su inteligentni transportni sustavi, urbani nadzor ili bežična automatizacija zgrada pokreću neviđenu potražnju za velikim WSN-ovima s mnogo tisuća čvorova, nenamjerno povećavajući broj skokova do odredišta. Ovaj rastući problem može se riješiti dodavanjem dodatnih čvorova prijelnika ovoj mreži, što dosljedno daje povećanje skalabilnosti. Kada su prijelni centralni čvorovi spojeni, podaci se šalju poslužitelju za upravljanje [9].

Međutim postoji sumnja da takav tradicionalni mehanizam prikupljanja podataka, kao što je od senzora čvora do prijelnika i od prijelnika do okosnice, može dovesti do nedovoljno efikasnog usmjerenja. Zbog toga sa svojim karakteristikama automatskog postavljanja i snažnom poveziivošću u velikom opsegu, bežična isprepletana mreža (eng. Wireless Mesh Network – WMN) je prikladnija opcija za povezivanje čvorova prijelnika [10].

Drugim riječima, mesh mreže se mogu koristiti u situacijama kada struktura ili oblik mreže ne dopušta da svaki čvor bude unutar dometa svog konačnog odredišta. To jest, mesh mreža može se koristiti za povezivanje odvojenih senzorskih mreža, za povezivanje senzorskih čvorova s platformom za praćenje ili kao skalabilna okosnica/infrastruktura za komunikaciju senzor-senzor [10].

Kada gradimo veliku mrežu senzora, često smo ograničeni cijenom takvih senzora. Može se zamisliti jeftina mesh struktura na koju se može spojiti bilo koji broj različitih senzora. Senzorski čvorovi u mesh mreži povezani su s mikrokontrolerskim uređajima na točki postavljanja. Ovi uređaji djeluju kao mala računalna platforma koja uspostavlja algoritme usmjeravanja za komunikaciju između različitih paketa senzora u poduzeću [10].

Kombinacija mogućnosti WSN-a i WMN-a omogućuje učinkovito korištenje mogućnosti obiju mreža, a očekivani učinak kombiniranja omogućuje nam da govorimo o stvaranju temeljno nove arhitekture kombinirane mreže. Rješenje problema izgradnje kombinirane mreže također je jedno od najrelevantnijih u sadašnjoj fazi razvoja integriranih mobilnih mreža različitih standarda kao što su GSM, UMTS, LTE, 5G, 6G i drugi. Kombinirane komunikacijske mreže usmjerene su na formiranje jedinstvenog okruženja za pružanje usluga. Samoiscjeljujuća mreža pokazuje da se Internet stvari više temelji na cijeni, snazi i jednostavnosti upotrebe nego na brzinama i protoku koje je elektronička industrija koristila u prošlosti [10].

Za razliku od zvjezdaste mreže, u kojoj svaki čvor komunicira s centralnim čvorem izravno, čvorovi u mesh mreži prenose podatke među sobom, djelujući kao repertor za druge čvorove prema potrebi. Kada udaljeni senzorski čvor započne prijenos očitavanja, informacijski podaci šalju se svim međučvorovima dok podaci ne stignu do središnje točke prikupljanja. Jedini uvjet za ovaj čvor daljinskog očitavanja je da je unutar dosega jednog drugog čvora kako bi bio dio mreže. Ako jedan čvor na mreži padne, okolni čvorovi mogu automatski dostaviti poslane informacije oko tog oštećenog čvora bez ugrožavanja ostatka mreže. Ovaj inteligentni mehanizam za usmjeravanje bio bi neophodan za stvaranje pouzdane i otporne mreže bežičnih senzora [10].

3.2. Mobilne senzorske mreže

Mobilne senzorske mreže (eng. *Mobile Wireless Sensor Network* – MWSN) imaju mobilne senzorske čvorove, dok općenito korišteni WSN imaju statične senzorske čvorove. Mobilne senzorske mreže imaju veću prilagodljivost od statičkih WSN-ova jer se mobilni WSN-ovi mogu postaviti za bilo koju situaciju i mogu raditi s iznenadnim promjenama topologije.

Statička WSN može se suočiti sa sljedećim problemima[11]:

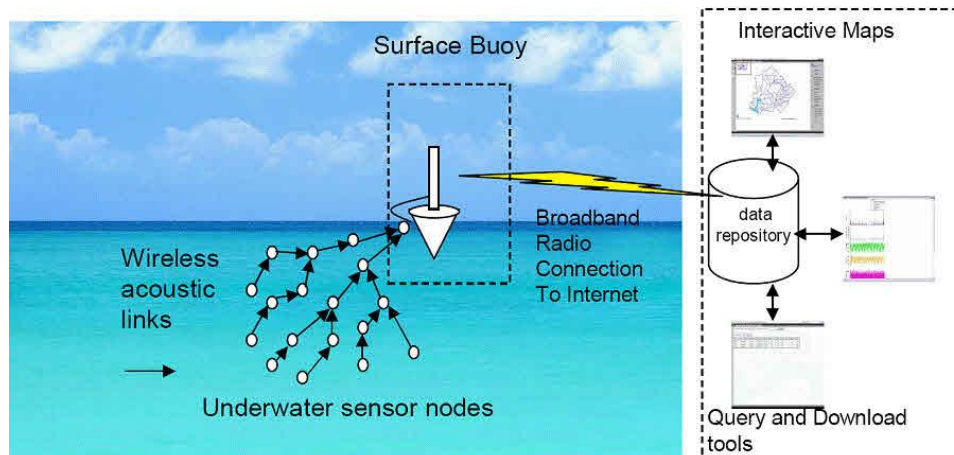
- Povezanost cijele mreže i potpuna pokrivenost senzorskog polja ne može biti izvediva u WSN-u kao kod zrakoplova ili robota.

- Za aplikacije za praćenje, mreža zahtijeva veće čvorove za pokrivanje cijelog područja čime se u osnovi povećava trošak mreže.
- Za nekoliko primjena postoji zahtjev za nekoliko sofisticiranih senzorskih čvorova za izvođenje nekih posebnih vojnih zadataka koji mogu zahtijevati kameru sa svakim čvorom za prikupljanje slika, a baš i nije praktično opremiti svaki čvor zasebnom kamerom.

Predstavljanjem MWSN-ova mogu se riješiti svi navedeni problemi i pokriti mnoga druga pitanja. Može se nadograditi prilagodljivost i sposobnost WSN-a korištenjem mobilnih senzorskih čvorova.

3.3. Podvodne senzorske mreže

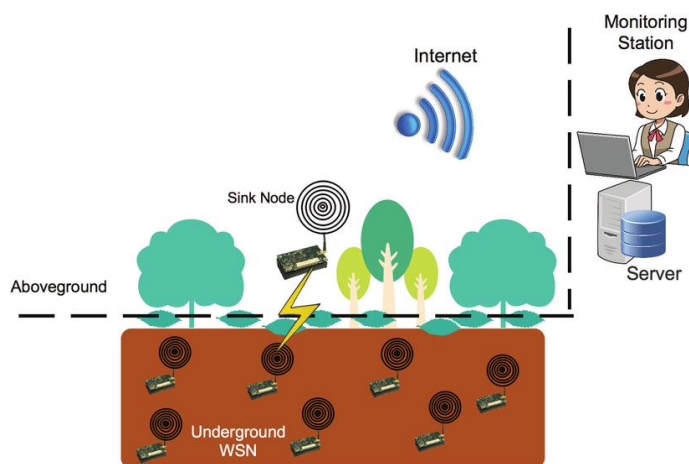
Podvodna bežična komunikacija jedan je od najvećih izazova u izgradnji podvodnog WSN-a (eng. *Underwater WSN* - UWSN)(Slika 8). Uočeno je da se radiofrekvencije i akustični valovi (male propusnosti) prigušuju i mijenjaju u vodi. Optička komunikacija je najbolje rješenje za komunikaciju na kratkim udaljenostima u vodi. Ako se koriste optičke komunikacije u zelenim/plavim valnim duljinama u usporedbi s akustičnom komunikacijom na kratkim udaljenostima, tada one pružaju veliku propusnost i brže širenje u vodi. Većina UWSN-a može se koristiti za seizmičke, nadzorne i sigurnosne namjene. Ove mreže sastoje se od nekoliko senzorskih čvorova i vozila raspoređenih pod vodom. Za prikupljanje podataka iz ovih senzorskih čvorova koriste se autonomna podvodna vozila. U UWSN-u još uvijek postoji toliko izazova poput sigurnosti, potrošnje energije, instalacije i komunikacije između UWSN-ova [11].



Slika 9. Prikaz podvodne senzorske mreže, [11]

3.4. Podzemne senzorske mreže

Podzemne bežične senzorske mreže skuplje su od zemaljskih WSN-ova u smislu postavljanja, održavanja i troškova opreme te pažljivog planiranja. Mreže WSN-a sastoje se od nekoliko senzorskih čvorova koji su skriveni u tlu za praćenje podzemnih uvjeta (Slika 9). Za prijenos informacija od senzorskih čvorova do bazne stanice, dodatni bazni čvorovi nalaze se iznad tla. Podzemne bežične senzorske mreže postavljene u zemlju teško je napuniti. Baterijske čvorove senzora s ograničenom snagom baterije teško je ponovno napuniti. Osim toga, podzemno okruženje čini bežičnu komunikaciju izazovnom zbog visoke razine prigušenja i gubitka signala [11].



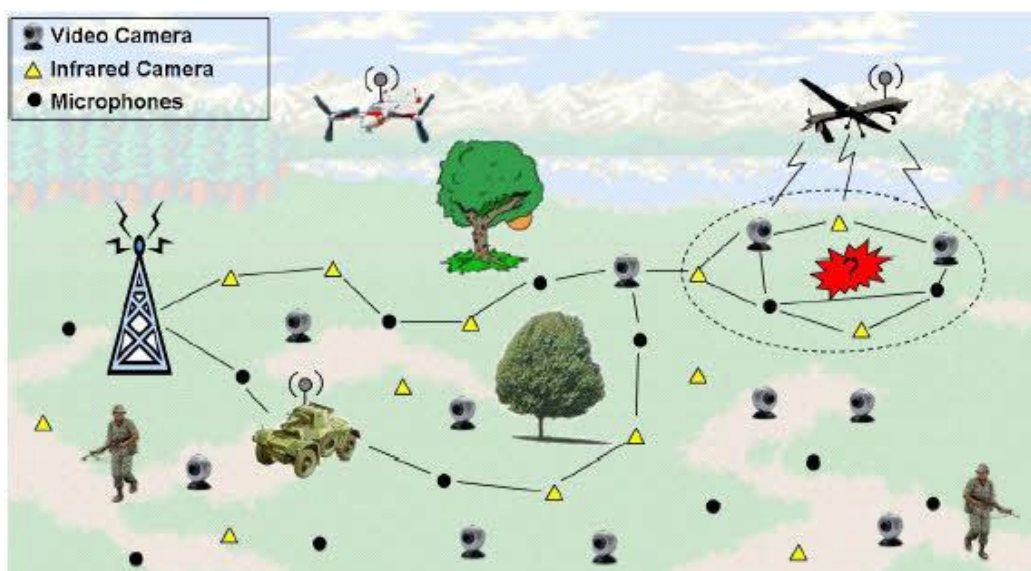
Slika 10. Izgled podzemne senzorske mreže, [11]

Ukratko, podzemne senzorske mreže se koriste za praćenje nekoliko podzemnih uvjeta kao što su sastav tla i vlažnost tla, stoga je cijela mreža pod zemljom, ali prenosi informacije baznoj stanici koja je iznad zemlje.

3.5. Multimedijske senzorske mreže

Multimedijske bežične senzorske mreže imaju namjenu praćenja i nadzora događaja u obliku multimedije, kao što su slike, video i audio. Ove mreže sastoje se od jeftinih senzorskih čvorova opremljenih mikrofonom i kamerama (Slika 10). Ovi su čvorovi međusobno povezani bežičnom vezom za kompresiju podataka, pronalaženje podataka i korelaciju [11].

Izazovi s multimedijским WSN-om uključuju veliku potrošnju energije, visoke zahtjeve za propusnost, obradu podataka i tehnike kompresije. Osim toga, multimedijски sadržaji zahtijevaju veliku propusnost kako bi se sadržaj isporučio ispravno i jednostavno.



Slika 11. Izgled multimedijske senzorske mreže, [11]

3.6. Zemaljske senzorske mreže

Zemaljski WSN-ovi sadrže stotine čvorova koji su smješteni u zemljopisnom području. Čvorovi su iznad zemlje u mrežama zemaljskih senzora. Stoga se solarne ćelije mogu koristiti u zemaljskoj senzorskoj mreži. Energija se može uštedjeti smanjenjem kašnjenja, radnim ciklusima s malim opterećenjem itd. Prijenos optičkog signala bežičnim putem (eng. *Free Space Optics* - FSO) koristi se kao osnovni komunikacijski medij u FSO/RF sustavima, dok se radio frekvencijske

(RF) veze koriste kao rezervne tamo gdje komunikacija vidnog polje (eng. *Line Of Sight* - LOS) nije prisutna za optičku komunikaciju. FSO veze daju nisku komunikacijsku energiju u bežičnoj senzorskoj mreži [11].

Glavni atributi WSN-ova su samo ispravljanje, skalabilnost, samoorganizacija, energetska učinkovitost, odgovarajući stupanj povezanosti među čvorovima, niska cijena, niska složenost.

3.7. Klasifikacija senzora

U prvoj klasifikaciji senzori se dijele na aktivne i pasivne. Aktivni senzori su oni koji zahtijevaju vanjski signal aktivacije (buđenja) ili signal u obliku napajanja. Pasivni senzori, s druge strane, ne zahtijevaju nikakav vanjski signal napajanja i izravno generiraju izlazni odziv.

Druga vrsta klasifikacije temelji se na načinu detekcije koja se koristi u senzoru. Neki od načina detekcije su električni, biološki, kemijski, radioaktivni itd.

Sljedeća klasifikacija temelji se na fenomenu konverzije, tj. ulazu i izlazu. Neki od uobičajenih fenomena pretvorbe su fotoelektrični, termoelektrični, elektrokemijski, elektromagnetski, termooptički, itd.

Konačna klasifikacija senzora su analogni i digitalni senzori. Analogni senzori proizvode analogni izlaz, tj. kontinuirani izlazni signal (obično napon, ali ponekad i druge veličine poput otpora itd.) u odnosu na veličinu koja se mjeri. Digitalni senzori, za razliku od analognih senzora, rade s digitalnim podacima. Podaci u digitalnim sensorima, koji se koriste za pretvorbu i prijenos, digitalne su prirode.

Postoje također različiti senzori s obzirom na njihovu primjenu. Prikazani su neki senzori koji se koriste za mjerenje fizičkih obilježja poput [12]:

- temperature (slika 11) - senzori temperature mogu biti analogni i digitalni. U analognom senzoru temperature, promjene temperature odgovaraju promjeni njegovih fizičkih svojstava poput otpora ili napona. Što se tiče digitalnog senzora temperature, izlaz je diskretna digitalna vrijednost.



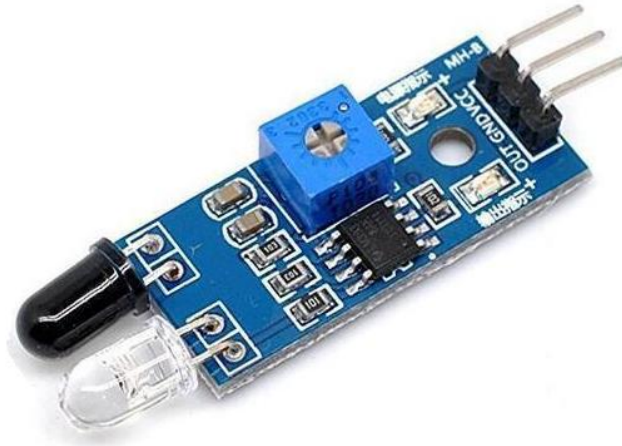
Slika 12. Senzor temperature, [12]

- blizine (slika 12) - senzor blizine je beskontaktni senzor koji detektira prisutnost objekta. Senzori blizine mogu se implementirati pomoću različitih tehnika kao što su optička (infracrveni ili laserski), zvučna (ultrazvučni), magnetska (Hall efekt), kapacitivna itd. Neke od primjena senzora blizine su mobilni telefoni, automobili (parkirni senzori), industrije (poravnanje objekata), blizina tla u zrakoplovima itd.



Slika 13. Senzor blizine[12]

- infracrveni senzori (slika 13) - senzori temeljeni na svjetlu koji se koriste u raznim aplikacijama kao što su blizina i detekcija objekata.



Slika 14. Infracrveni senzor, [12]

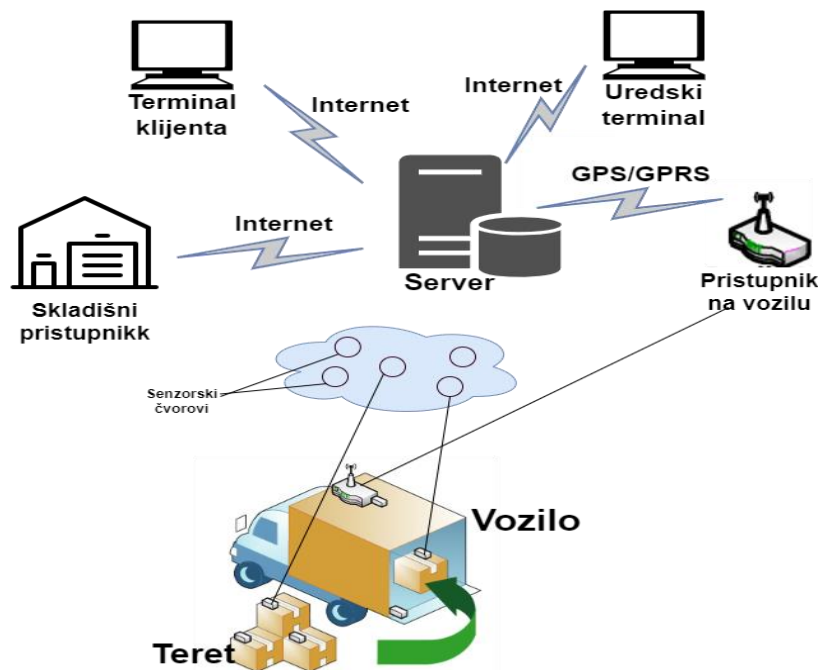
Postoje dvije vrste infracrvenih senzora: transmisivni i reflektirajući. U transmisivnom tipu IC senzora, IC odašiljač i IC detektor postavljeni su jedan nasuprot drugome tako da kada objekt prođe između njih, senzor detektira objekt. Druga vrsta IC senzora je IC senzor reflektirajućeg tipa. U ovom slučaju, odašiljač i detektor postavljeni su jedan pored drugog, okrenuti prema objektu. Kada objekt dođe ispred senzora, infracrveno svjetlo iz IC odašiljača se reflektira od objekta i detektira ga IR prijemnik te tako senzor detektira objekt. Različite aplikacije u kojima se implementira IR senzor su mobilni telefoni, roboti, industrijska montaža, automobili itd.

4. MOGUĆNOSTI PRIMJENE SENZORA U ZATVORENIM PROSTORIMA NA PRIMJERU LOGISTIČKOG PROCESA

U današnjem svijetu koji se brzo razvija, gdje su učinkovitost i preciznost ključni, logistika temeljena na sensorima pojavila se kao promjena u upravljanju opskrbnim lancem. Integracija senzora i naprednih tehnologija u logističke operacije revolucionirala je način na koji tvrtke prate, nadziru i upravljaju svojom robom u cijelom opskrbnom lancu. Od skladišta do transporta, logistika temeljena na sensorima ima potencijal optimizirati procese, poboljšati vidljivost i pojednostaviti operacije, što u konačnici rezultira poboljšanim zadovoljstvom kupaca i povećanom profitabilnošću.

Logistika temeljena na sensorima uključuje korištenje različitih senzora, kao što su *RFID* (eng. *Radio Frequency Identification*), *GPS* (eng. *Global Positioning System*), temperaturni senzori, senzori vlage i senzori kretanja, za prikupljanje podataka u stvarnom vremenu i praćenje kretanja, stanja, i mjesta robe tijekom cijelog logističkog procesa. Ti su senzori integrirani u proizvode, pakiranja, spremnike, vozila i skladišne prostore za hvatanje i prijenos vrijednih informacija, pružajući sudionicima točan uvid u njihove aktivnosti opskrbnog lanca [13].

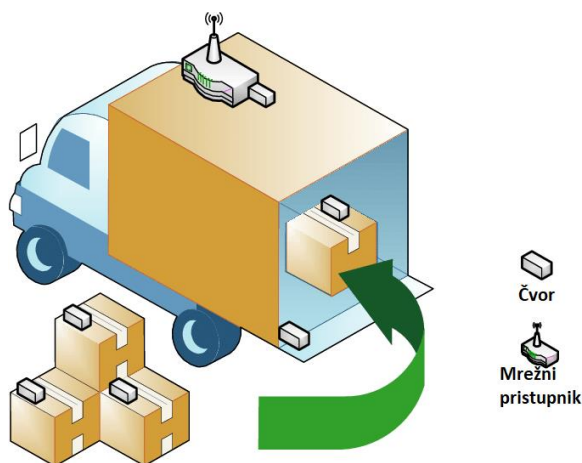
Primjena senzora u logističkom sustavu prikazana je na slici 15. Sustav se sastoji od skladišnog pristupnika, pristupnika na vozilu, senzorskih čvoreva, uredskog terminala, te terminala na strani korisnika. Server pruža korisniku informacije o teretu u stvarnom vremenu i komunicira sa pristupnikom na vozilu. Terminal klijenta može prikupljati logističke podatke povezivanjem na server, također u stvarnom vremenu. Uloga uredskog terminala je osigurati operacijsko sučelje za uredsko osoblje, a skladišni pristupnik svojim dizajnom je namjenjen za upravljanje i održavanje svih senzorskih čvorova u skladištu. Pristupnik na vozilu upravlja senzorskom mrežom [14].



Slika 15. Arhitektura logističkog sustava temeljenog na sensorima

Izvor: [14]

Primjer integracije logističkih senzora je prikazan na slici 16, gdje su senzorski čvorovi povezani za robu (uglavnom hranu zbog njihove kvarljive prirode). Roba se utovaruje iz skladišta u teretno vozilo, u kojem se njihovi čvorovi trebaju samoorganizirati i formirati mrežu čvorova, koja može isporučiti informacije o stanju robe vanjskom svijetu koristeći mrežni pristupnik [14].



Slika 16. Način primjene senzora pri prijevozu robe

Izvor: [14]

U području logistike temeljene na sensorima, pametni senzori su na čelu inovacija. Ovi inteligentni uređaji značajno su pridonijeli transformaciji opskrbnih lanaca pružajući podatke u stvarnom vremenu, napredne funkcionalnosti i poboljšane mogućnosti. Sa svojom sposobnošću autonomnog prikupljanja, obrade i prijenosa podataka, pametni senzori su revolucionirali način na koji tvrtke nadziru i upravljaju svojom robom u cijelom opskrbnom lancu [13].

RFID senzori koriste radiovalove za automatsku identifikaciju i praćenje objekata opremljenih RFID oznakama ili naljepnicama. Ove oznake sadrže elektronički pohranjene podatke koje RFID senzori mogu bežično očitati. Omogućuju automatsku identifikaciju, praćenje inventara i autentifikaciju proizvoda i imovine u cijelom opskrbnom lancu. RFID senzori se intenzivno koriste u skladištima i distribucijskim centrima za upravljanje zalihama, ispunjavanje narudžbi i praćenje imovine [13].

GPS senzori koriste satelitske navigacijske sustave za određivanje precizne geografske lokacije objekata ili vozila opremljenih ovim sensorima. GPS tehnologija napravila je revoluciju u transportu i logistici omogućivši praćenje i praćenje vozila, pošiljaka i osoblja u stvarnom vremenu. GPS senzori daju točne podatke o položaju, omogućujući upraviteljima logistike da optimiziraju rute, osiguravaju isporuke na vrijeme i poboljšaju cjelokupnu vidljivost opskrbnog lanca [13].

Prethodno navedeni senzori temperature mjere i nadziru razine temperature u stvarnom vremenu. Ovi senzori su ključni za industrije koje se bave kvarljivom robom, lijekovima ili osjetljivim proizvodima koji zahtijevaju specifične temperaturne uvjete. Senzori temperature osiguravaju da se roba skladišti i transportira unutar propisanog temperaturnog raspona, čime se sprječava kvarenje, održava kvaliteta i ispunjavaju regulatorni zahtjevi [13].

Senzori vlage mjere i prate razinu vlage ili relativnu vlažnost zraka ili okoliša. Ovi senzori su ključni za industrije kao što su hrana i piće, farmaceutski proizvodi i elektronika, gdje visoka razina vlažnosti može oštetiti proizvode. Senzori vlažnosti osiguravaju skladištenje robe u optimalnim uvjetima, sprječavajući probleme povezane s vlagom kao što su plijesan, degradacija ili električni kvarovi [13].

Senzori pokreta otkrivaju kretanje ili promjene položaja i ubrzanja. Obično se koriste u logistici za nadzor rukovanja, utovara ili istovara robe tijekom transporta i procesa skladištenja. Senzori pokreta pružaju uvide u način rukovanja proizvodima i mogu pomoći u prepoznavanju

potencijalnih rizika ili oštećenja uzrokovanih pretjeranim vibracijama, udarcima ili pogrešnim rukovanjem [13].

Senzori tlaka mjere i nadziru razine tlaka u raznim primjenama, kao što su pakiranje, pneumatski sustavi ili hidraulički sustavi. U logistici se senzori tlaka koriste kako bi se osiguralo pravilno zatvaranje i cjelovitost pakiranja. Na primjer, u prijevozu pokvarljive robe, senzori tlaka mogu detektirati sve promjene tlaka koje mogu ukazivati na curenje ili oštećenje pakiranja, omogućujući trenutne korektivne radnje [13].

Svjetlosni senzori mjere i otkrivaju razine svjetlosti u okolini. U logistici se svjetlosni senzori koriste za sigurnost tereta i sprječavanje krađe. Na primjer, u skladištima ili skladišnim prostorima, svjetlosni senzori mogu detektirati bilo kakav neovlašteni pristup ili diranje praćenjem promjena u razinama osvjetljenja što dovodi do aktiviranja upozorenja i povećanja sigurnosnih mjera [13].

4.1. Prednosti primjene senzora u logistici

Logistika temeljena na sensorima donosi mnoštvo prednosti upravljanju opskrbnim lancem, revolucionirajući način na koji tvrtke prate, nadziru i upravljaju svojom robom. Evo nekoliko ključnih prednosti usvajanja logistike temeljene na sensorima [13]:

1. Poboljšana vidljivost: logistika temeljena na sensorima pruža uvid u kretanje, stanje i lokaciju robe u stvarnom vremenu u cijelom opskrbnom lancu. Ova vidljivost omogućuje zainteresiranim stranama donošenje proaktivnih odluka, prepoznavanje uskih grla ili problema i poduzimanje trenutnih radnji, što dovodi do poboljšane operativne agilnosti i odziva.
2. Poboljšana operativna učinkovitost: Korištenjem podataka senzora, tvrtke mogu optimizirati svoje operacije i poboljšati ukupnu učinkovitost. Senzori automatiziraju razne zadatke poput upravljanja zalihama, praćenja imovine i ispunjavanja narudžbi,

smanjujući ručni rad, eliminirajući pogreške i pojednostavljujući procese. To dovodi do brže obrade narudžbi, smanjenog vremena isporuke i povećane produktivnosti.

3. Precizno upravljanje zalihama: RFID senzori i druge tehnologije praćenja omogućuju točno upravljanje zalihama u stvarnom vremenu. Tvrtke mogu pratiti kretanje i status pojedinačnih artikala, paleta ili kontejnera, osiguravajući točne razine zaliha, minimizirajući zalihe i poboljšavajući predviđanje potražnje. To rezultira učinkovitim planiranjem zaliha, smanjenim troškovima držanja i poboljšanim zadovoljstvom kupaca.
4. Optimiziranje skladišnih operacija: Skladišta igraju ključnu ulogu u opskrbnom lancu, djelujući kao čvorišta u kojima se roba skladišti, sortira i distribuira. Korištenjem tehnologija temeljenih na sensorima, skladišta mogu značajno poboljšati svoju operativnu učinkovitost. RFID senzori, na primjer, mogu se koristiti za automatiziranje upravljanja zalihama pružanjem vidljivosti razina zaliha u stvarnom vremenu. To omogućuje bolje predviđanje potražnje, učinkovito ispunjavanje narudžbi i smanjenje troškova držanja zaliha. Štoviše, senzori mogu nadzirati uvjete okoline unutar skladišta, poput temperature i vlažnosti, osiguravajući da se osjetljiva roba, poput lijekova ili kvarljivih predmeta, skladišti u optimalnim uvjetima. Sva odstupanja od propisanih pragova pokreću trenutna upozorenja, omogućujući proaktivne mjere za održavanje cjelovitosti proizvoda i sprječavanje kvarenja.
5. Kontrola kvalitete i sukladnost: logistika temeljena na sensorima omogućuje praćenje uvjeta okoline u stvarnom vremenu, kao što su temperatura, vlažnost i tlak. Ovo je osobito ključno za industrije koje se bave kvarljivom ili osjetljivom robom. Osiguravanjem optimalnih uvjeta u cijelom opskrbnom lancu, poduzeća mogu održati cjelovitost proizvoda, spriječiti kvarenje ili oštećenje i biti u skladu s regulatornim standardima.
6. Ublažavanje rizika: Senzori mogu otkriti i upozoriti dionike o odstupanjima ili anomalijama u opskrbnom lancu. Na primjer, senzori pokreta mogu prepoznati pogrešno rukovanje ili udarce tijekom transporta, omogućujući brze radnje za sprječavanje oštećenja. Rano otkrivanje rizika minimizira gubitke, smanjuje šanse za povlačenje proizvoda i povećava ukupnu sigurnost opskrbnog lanca.

7. Odlučivanje temeljeno na podacima: Podaci generirani sensorima pružaju vrijedne uvide za donošenje odluka temeljenih na podacima. Analizirajući podatke senzora, tvrtke mogu identificirati obrasce, optimizirati rute, otkriti neučinkovitosti procesa i donijeti informirane odluke za optimizaciju svojih operacija opskrbnog lanca. To dovodi do uštede troškova, poboljšanog korištenja resursa i povećane profitabilnosti.
8. Suradnja u lancu opskrbe: Logistika temeljena na sensorima olakšava besprijekornu suradnju među dionicima u lancu opskrbe. Dijeljenje podataka u stvarnom vremenu i vidljivost omogućuju bolju koordinaciju i sinkronizaciju između dobavljača, proizvođača, pružatelja logističkih usluga i trgovaca. To dovodi do poboljšane komunikacije, sinkroniziranih razina zaliha i smanjenog vremena isporuke.

4.2. Prikaz logističkog procesa temeljenog na sensorima

Logistički proces temeljen na sensorima uključuje nekoliko ključnih koraka koji iskorištavaju tehnologiju senzora za praćenje, nadzor i upravljanje robom u cijelom opskrbnom lancu. Izgled tipičnog logističkog procesa temeljenog na sensorima prikazan je po koracima na slici 15 te nadalje objašnjen u tekstu [13]:



Slika 17. Prikaz logističkog procesa temeljenog na sensorima

Izvor: [13]

- Integracija senzora: Proces počinje integracijom senzora u različite komponente opskrbnog lanca, kao što su proizvodi, ambalaža, spremnici, vozila i skladišni prostori. Različite vrste senzora postavljaju se na temelju specifičnih zahtjeva robe koja se prevozi ili skladišti.
- Prikupljanje podataka: Nakon što su senzori postavljeni, oni počinju prikupljati podatke u stvarnom vremenu koji se odnose na robu i okoliš. To uključuje podatke kao što su lokacija, temperatura, vlažnost, kretanje, tlak i drugi relevantni parametri. Senzori kontinuirano hvataju i prenose te podatke u centralizirani sustav ili platformu temeljenu na oblaku.
- Prijenos podataka i povezivanje: prikupljeni podaci prenose se bežičnim ili žičanim vezama kako bi se osigurala besprijekorna povezanost u opskrbnom lancu. Napredne komunikacijske tehnologije kao što su RFID, mobilne mreže ili Internet stvari (eng. *Internet of Things* – IoT) olakšavaju prijenos podataka od senzora do središnjeg sustava.
- Obrada i analiza podataka: Prikupljeni podaci se obrađuju i analiziraju pomoću naprednih analitičkih tehnika. To uključuje izvlačenje vrijednih uvida, prepoznavanje obrazaca i otkrivanje anomalija ili odstupanja od unaprijed definiranih pragova. Algoritmi za obradu podataka mogu iskoristiti umjetnu inteligenciju i strojno učenje za predviđanje ili optimiziranje operacija na temelju povijesnih podataka i podataka u stvarnom vremenu.
- Praćenje i vidljivost u stvarnom vremenu: Obrađeni podaci koriste se za pružanje nadzora i vidljivosti robe u stvarnom vremenu u cijelom opskrbnom lancu. Zainteresirane strane, uključujući proizvođače, pružatelje logističkih usluga i trgovce na malo, mogu pristupiti centraliziranoj nadzornoj ploči ili sučelju za praćenje kretanja, stanja i statusa robe u bilo kojem trenutku.
- Upozorenja i obavijesti: Logistički sustavi temeljeni na sensorima mogu generirati upozorenja i obavijesti na temelju unaprijed definiranih pravila ili događaja. Na primjer, ako temperatura pokvarljivog artikla prijeđe prihvatljivi raspon, aktivira se upozorenje koje potiče hitnu akciju za ublažavanje rizika od kvarenja. Ta se upozorenja mogu poslati relevantnim dionicima putem e-pošte, SMS-a ili drugih komunikacijskih kanala.
- Donošenje odluka i djelovanje: Podaci i uvidi u stvarnom vremenu koje pruža logistički sustav temeljen na sensorima omogućuju dionicima da donose informirane odluke i poduzimaju odgovarajuće radnje odmah. Na primjer, ako isporuka kasni zbog kvara vozila, upravitelji logistike mogu proaktivno preusmjeriti drugo vozilo kako bi osigurali pravovremenu isporuku.

- Kontinuirana optimizacija: Logistički proces temeljen na sensorima je kontinuirani ciklus poboljšanja. Prikupljeni podaci, zajedno s metrikom učinka i povratnim informacijama, mogu se koristiti za optimizaciju različitih aspekata opskrbnog lanca, poput planiranja rute, upravljanja zalihama i raspodjele resursa. Analizirajući povijesne podatke i identificirajući trendove, tvrtke mogu donositi odluke temeljene na podacima kako bi poboljšale učinkovitost i riješile potencijalna uska grla.
- Suradnja i integracija: Logistika temeljena na sensorima promiče suradnju i integraciju među dionicima opskrbnog lanca. Dijeljenjem podataka i uvida u stvarnom vremenu, proizvođači, dobavljači i pružatelji logističkih usluga mogu sinkronizirati svoje aktivnosti, pojednostaviti operacije i poboljšati ukupnu izvedbu opskrbnog lanca.

Slijedeći ovaj logistički proces temeljen na sensorima, tvrtke mogu iskoristiti snagu podataka u stvarnom vremenu, optimizirati operacije, poboljšati vidljivost i donositi proaktivne odluke za postizanje veće učinkovitosti, uštede troškova i zadovoljstva kupaca u upravljanju lancem opskrbe.

5. PERSPEKTIVE RAZVOJA SENZORSKIH KOMUNIKACIJSKIH MREŽA I SENZORA

Trendovi razvoja senzorske tehnologije proizlaze iz tržišno-ekonomskih aspekata, općih zahtjeva kupaca i specifičnih zahtjeva ciljnih aplikacija.

Smanjenje troškova i više poboljšanja u točnosti i brzini će se postići u budućnosti korištenjem mjernih metoda s višim performansama, novim proizvodnim tehnologijama i sofisticiranim metodama obrade signala. Sve veći zahtjevi za zaštitom okoliša zahtijevaju razvoj vrlo pouzdanih senzora. Sensori bez održavanja s dugim životnim vijekom i malom potrošnjom električne energije bit će stoga u fokusu interesa. Glavni razvojni trendovi u tehnologiji senzora općenito naginju prema minijaturizaciji i sve većoj upotrebi multisenzorskih i bežičnih sustava.

5.1. Minijaturizacija i multisenzorski sustavi

Minijaturizacija je primjer dobre strategije uspjeha u modernim tehnologijama. Smanjenje karakterističnih dimenzija obično rezultira kraćim vremenima odgovora tako da je moguća odgovarajuća veća brzina u generiranju i obradi signala. U mnogim slučajevima smanjuje troškove zbog veće stope integracije, manje potrošnje energije i veće pouzdanosti. Minijaturizacija općenito dobiva na važnosti u svim područjima primjene, gdje manje strukture i veća preciznost postaju odlučujući za tržišno prihvaćanje pojedinačnih proizvoda. Trend razvoja minijaturizacije nastavlja se unutar nanotehnologija, koje će otvoriti pristup još manjim dimenzijama [15].

Korištenje multisenzorskih sustava postaje sve važnije u širokim primjenama. Njihove primjene sežu od nadzora i automatizacije proizvodnih procesa do robotike, automobilskih aplikacija, pametne kuće, kontrole procesa, ekološkog inženjerstva, biotehnologije i znanosti o životu.

Multisenzorski sustavi pružaju prednost da se ekonomični senzori mogu koristiti čak i za postizanje visoke razine preciznosti i pouzdanosti. Pritom se velikom količinom dostupnih informacija upravlja pomoću sofisticiranih tehnika obrade signala kako bi sustav postigao bolje performanse.

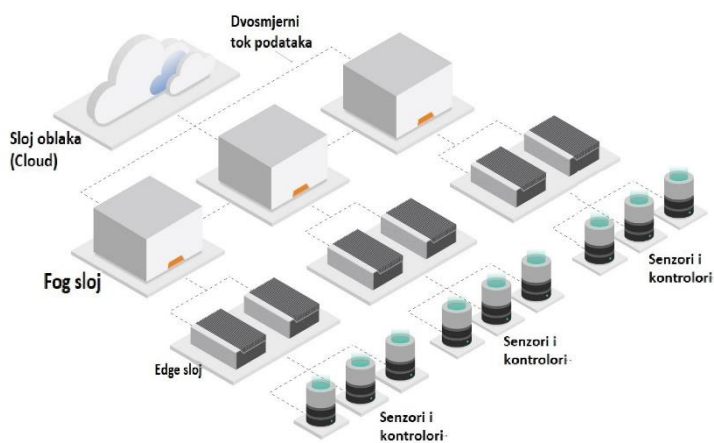
Fuziju multisenzorskih podataka zapravo provode životinje i ljudi kako bi se postigla točnija procjena okolnog okoliša. Izravno povezan primjer je elektronički nos, koji se sastoji od

niza različitih senzora za koje se pokazalo da reagiraju na određene organske i anorganske spojeve s niskim koncentracijama. Kako bi se postigla visoka razlučivost pri niskim koncentracijama, koristi se odziv niza senzora kao u pravom ljudskom nosu. Primjene elektroničkog nosa raširene su u kemijskim analizama, nadzoru okoliša, inspekciji hrane i vina, kontroli emisija i detekciji narkotika. Trendovi razvoja multisenzorskih sustava su u razvoju modularnih sustava, koji se lako proširuju novim jedinicama bez remete već dostupne funkcije [16,17].

5.2. Integracija IoT-a, Edge i Fog računalstvo

Integracija senzora u ekosustav IoT-a bio je transformativan razvoj. Senzorske mreže vođene internetom stvari povezuju uređaje i senzore, omogućujući razmjenu podataka u stvarnom vremenu, daljinski nadzor i kontrolu. Ova integracija predstavlja nove izazove u smislu interoperabilnosti, sigurnosti i skalabilnosti.

Kako bi se riješila ograničenja latencije i propusnosti u IoT aplikacijama, pojavio se koncept *edge* i *fog* računalstva. Ove tehnologije uključuju obradu podataka bliže izvoru podataka, smanjujući potrebu za opsežnim prijenosom podataka centraliziranim poslužiteljima u oblaku (*cloud*). Ovaj trend poboljšava vrijeme odziva i smanjuje zagušenje mreže. Primjer povezivanja računalne infrastrukture senzora, edge sloja, fog sloja i oblaka se može vidjeti na slici 16 [18].



Slika 18. Povezana infrastruktura senzora, *edge*, *fog* sloja i oblaka

Izvor:[19]

Edge računalstvo, kao što naziv implicira, približava izračunavanje podataka rubu mreže gdje podaci nastaju. To može pomoći smanjiti ili čak eliminirati potrebu za udaljenim podatkovnim

centrom jer se svi podaci obrađuju na licu mjesta. Latencija je također smanjena, što omogućuje donošenje odluka u stvarnom vremenu budući da nema potrebe čekati da se podaci obrade na drugom mjestu [19].

Fog računalstvo je računalni sloj između oblaka i ruba. Dok *edge* računalstvo može slati ogromne tokove podataka izravno u oblak, *fog* računalstvo može primiti podatke s *edge* sloja prije nego što dopiju u oblak i zatim odlučiti što je relevantno, a što nije. Relevantni podaci pohranjuju se u oblaku, dok se nebitni podaci mogu izbrisati ili analizirati u *fog* sloju za daljinski pristup ili za informiranje o lokaliziranim modelima učenja[19].

Primjer *fog* računalstva iz stvarnog života bila bi ugrađena aplikacija na proizvodnoj liniji, gdje bi senzor temperature povezan s rubnim poslužiteljem mjerio temperaturu svake sekunde. Ti bi se podaci zatim prosljedili aplikaciji u oblaku za praćenje temperaturnih promjena. Na primjer, da se sva mjerenja temperature, svake sekunde ciklusa mjerenja 24/7 šalju u oblak. Sa *fog* slojem, rubni poslužitelj bi prvo poslao podatke *fog* sloju preko lokalizirane mreže. *Fog* server bi primio te podatke i prema određenim parametrima odlučio da li se isplati slati dalje u oblak. Krajnji rezultat je smanjen promet. Za jednostavna očitavanja temperature ove uštede podataka mogu se činiti zanemarivim. Ali ukoliko se neprestano prenose složene informacije ili velike datoteke poput slika ili videa utjecaj na propusnost i latenciju može biti ogroman [19].

Implementiranjem *fog* računalstva, podaci koje oblak prima za određenu ugrađenu aplikaciju puno su manje pretrpani. Tamo gdje bi oblak prvo morao pročistiti hrpu nepotrebnih podataka prije poduzimanja bilo kakve akcije ili vraćanja rezultata, sada može djelovati izravno na podatke koje prima iz *fog* sloja [19].

5.3. Izazovi u razvoju senzorske mreže

Senzori su često ograničeni ograničenim izvorima energije, što zahtijeva energetske učinkovite strategije dizajna. Tehnike prikupljanja energije, elektronika male snage i optimizirani komunikacijski protokoli ključni su za produljenje vijeka trajanja mreže senzora.

Kako će s daljnjim razvojem biti instaliran ogroman broj senzora, prikupljanje podataka bi se uglavnom bavilo idejom kako to učinkovito implementirati, pri čemu bi se razmatralo relativno sažimanje podataka. Kako bi se osigurala sigurnost prikupljanja podataka, osjetljive podatke treba zaštititi šifriranjem i korištenjem distribuiranog sustava. Također će se razmotriti optimalan

prijenos energije i izbor puta kako bi se smanjila potrošnja energije. Pohrana podataka, kao sljedeći korak, suočava se s istim problemima za rezervaciju energije i sažimanje podataka, gdje su neka rješenja dana kroz poboljšanje usmjeravanja podataka i popularne *blockchain* tehnologije za sigurnu pohranu podataka. Budući da obrada podataka može uzeti u obzir svaki kut cijele mreže IoT senzora, problemi uključuju, ali nisu ograničeni na, obradu unutar mreže, agregaciju podataka i računalstvo gdje se za rješavanje problema primjenjuju relativne tehnologije obrade signala [20].

Kombinacija jeftinih, energetski učinkovitih uređaja omogućila je virtualno praćenje bilo čega s bilo kojeg mjesta. Dosljednost senzora stvara složene okolnosti u kojima količina prikupljenih podataka može otežati analizu, dok rastući zahtjevi mogu brzo pretvoriti mreže senzora u beskorisne. Pažljivo planiranje i integracija bežičnih senzorskih uređaja s mikrokontrolerima može pomoći da se ti problemi ne dogode pružajući platformu za nove senzore i ažuriranja, kao i za ispravke grešaka potrebnih za održavanje mreže senzora ažurnom. Međutim, različitosti u tehnologijama prijenosa, protokolima usmjeravanja, identifikaciji susjednih čvorova i zahtjevima za napajanjem čine zadatak integriranja tehnologija kao što su senzorski i mrežni kanali dosta izazovnim [10].

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu istražena je arhitektura senzorske komunikacijske mreže, primjene i potencijalni razvoj unutar zatvorenih prostora. Slojevita arhitektura senzorskih komunikacijskih mreža podržava širok raspon prilagodljivih aplikacija u različitim kontekstima, uz podršku fleksibilnosti koju pružaju različite topologije. Zbog svoje sposobnosti transformacije, te su mreže postale važni resursi koji utječu na gotovo svaki aspekt naših života.

Analiza senzorskih komunikacijskih mreža predstavljena u ovom radu dovodi do zaključka da te mreže imaju izniman kapacitet transformacije uobičajeno korištenih koncepata. Primjer logističkog procesa pokazuje kako integracija senzorskih mreža unutar zatvorenih prostora nadilazi jednostavnu optimizaciju. Signalizira početak nove ere operativne učinkovitosti, točnosti upravljanja zalihama i vještine upravljanja resursima. Prednosti ovih mreža za logističke operacije dokaz su njihove moći transformacije sektora zahvaljujući njihovoj inovativnoj uporabi i značajnim doprinosima.

Razvoj senzorskih komunikacijskih mreža i dalje je neizbježan kako tehnologija napreduje. Entuzijazam oko njihove buduće putanje povećan je očekivanjem manjih senzora, integracijom s novim tehnologijama i spajanjem tehnologija Interneta stvari, Edge i Fog. Integracija senzora u naš svakodnevni život širi se sa svakim tehnološkim korakom, nudeći povećanu međusobnu povezanost i inteligenciju.

Na kraju ovog rada, s pouzdanjem možemo ustvrditi da su senzorske komunikacijske mreže prepoznate kao temeljni elementi suvremenog napretka. Ove mreže nadilaze granice mašte svojom prilagodljivošću, svestranošću i potencijalom, te stvaraju budućnost punu mogućnosti. Senzorske komunikacijske mreže u zatvorenim okruženjima nastavljaju svoj razvoj, potičući nove ideje i transformirajući industrije, a istovremeno utječu na same temelje međusobno povezanog svijeta.

LITERATURA

1. Dhiman R, Thakur J. *Evolution of WSN into WSN-IoT: A Study on its Architecture and Integration Challenges*. 2022. str. 185–207.
2. Kumar Gupta D. *Network and Complex Systems A Review on Wireless Sensor Networks*. 2013.;3.
3. Dargie W, Poellabauer C. *Fundamentals of Wireless Sensor Networks*. Wiley; 2010.
4. Behrens C, Becker M, Gehrke J, Peters-Drolshagen D, Laur R. *Wireless Sensor Networks as an Enabler for Cooperating Logistic Processes*. 2006.;85–6.
5. Alkhatib A. *Wireless Sensor Network Architecture*. 2011.
6. Zheng J, Jamalipour A. *Wireless Sensor Networks: A Networking Perspective*. New Jersey: Wiley; 2009.
7. Singh MK, Amin SI, Imam SA, Sachan VK, Choudhary A. *A Survey of Wireless Sensor Network and its types*. 2018 International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN). IEEE; 2018. str. 326–30.
8. Nourildean SW, Hassib MD, Mohammed YA. *Internet of things based wireless sensor network: a review*. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 2022.;27:246.
9. Yestemirova G, Saginbekov S. *Efficient Data Aggregation in Wireless Sensor Networks with Multiple Sinks*. 2018 IEEE 32nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA). IEEE; 2018. str. 115–9.
10. Nurlan Z, Zhukabayeva T, Othman M, Adamova A, Zhakiyev N. *Wireless Sensor Network as a Mesh: Vision and Challenges*. IEEE Access. 2022.;10:46–67.
11. ElProCus. *Wireless Sensor Networks : Types & Their Application*. [citirano 20. kolovoz 2023.]. Preuzeto s: <https://www.elprocus.com/introduction-to-wireless-sensor-networks-types-and-applications/> [Pristupljeno 20. kolovoza 2023.]

12. Electronics Hub. *What is a Sensor? Different Types of Sensors and their Applications*. Preuzeto s: <https://www.electronicshub.org/different-types-sensors/> [Pristupljeno: 22. kolovoza 2023.]
13. Vela RA. *Sensing Success: The Game-Changing Role of Sensor-Based Logistics in Supply Chains*. Preuzeto s: <https://www.linkedin.com/pulse/sensing-success-game-changing-role-sensor-based-logistics-vela> [Pristupljeno: 25. kolovoza 2023]
14. Becker M, Wenning B-L, Görg C, Jedermann R, Timm-Giel A. *Logistic applications with wireless sensor networks*. 2010.;
15. Dahlin AB. *Size Matters: Problems and Advantages Associated with Highly Miniaturized Sensors*. *Sensors*. 2012.;12:3018–36.
16. Kanoun O, Trankler H-R. *Sensor Technology Advances and Future Trends. Instrumentation and Measurement*, IEEE Transactions on. 2005.;53:1497–501.
17. Xu J, Xu L. *Information Fusion. Integrated System Health Management*. Elsevier; 2017. str. 101–56.
18. Mihai V, Dragana C, Stamatescu G, Popescu D, Ichim L. *Wireless Sensor Network Architecture based on Fog Computing*. 2018 5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). IEEE; 2018. str. 743–7.
19. OnLogic. *Understanding Fog Computing vs Edge Computing*. Preuzeto s: <https://www.onlogic.com/company/io-hub/fog-computing-vs-edge-computing/#> [Pristupljeno: 8. rujna 2023.]
20. Imran MA, Zoha A, Zhang L, Abbasi QH. *Grand Challenges in IoT and Sensor Networks. Frontiers in Communications and Networks*. 2020.;1.

POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz općenite arhitekture senzorske mreže.....	3
Slika 2. Arhitektura senzornog čvora	4
Slika 3. Sistemska arhitektura pametnog kontejnera	6
Slika 4. Slojeviti prikaz arhitekture senzorske mreže.....	8
Slika 5. Točka-do-točke topologija.....	12
Slika 6. Zvezdasta topologija.....	13
Slika 7. Stablasta topologija.....	13
Slika 8. Mesh topologija	14
Slika 9. Prikaz podvodne senzorske mreže.....	18
Slika 10. Izgled podzemne senzorske mreže	18
Slika 11. Izgled multimedijske senzorske mreže	19
Slika 12. Senzor temperature	21
Slika 13. Senzor blizine	21
Slika 14. Infracrveni senzor	22
Slika 15. Arhitektura logističkog sustava temeljenog na sensorima	24
Slika 16. Način primjene senzora pri prijevozu robe.....	24
Slika 17. Prikaz logističkog procesa temeljenog na sensorima	28
Slika 18. Povezana infrastruktura senzora, <i>edge</i> , <i>fog</i> sloja i oblaka.....	32

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad isključivo rezultat mogega vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju upotrijebljene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedopušten način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da 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 završnog/diplomskog rada pod naslovom Arhitektura senzorske komunikacijske mreže u zatvorenim prostorima, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

U Zagrebu, 12. rujna 2023.

Nikola Mitar, N.Mitar
(ime i prezime, potpis)