

**PRIMJENA PAMETNIH TELEKOMUNIKACIONIH I SENZORSKIH
MREŽA U KOMBINACIJI SA ENERGETSKI EFIKASNIM
ELEKTRONIČKIM UREĐAJIMA I ODRŽIVIM BIOHEMIJSKIM
PROCESIMA ZA SMANJENJE ZAGAĐENJA I OČUVANJE OKOLIŠA /
APPLICATION OF SMART TELECOMMUNICATION AND SENSOR
NETWORKS IN COMBINATION WITH ENERGY EFFICIENT
ELECTRONIC DEVICES AND SUSTAINABLE BIOCHEMICAL
PROCESSES FOR POLLUTION REDUCTION AND
ENVIRONMENTAL PRESERVATION**

Amina Čelarević¹, Armin Čelarević², Medina Mehić²

¹Fakultet inženjerstva i prirodnih nauka Univerziteta u Zenici, Travnička cesta 1, Zenica, BiH

²Internacionalni univerzitet Travnik u Travniku, Aleja Konzula – Meljanac bb, Travnik, BiH
e – mail: aminacelarevic88@gmail.com, celarevicarmin@gmail.com,
medinamehic78@gmail.com

Pregledni članak

<https://www.doi.org/10.58952/zr20251402185>

UDK / UDC 004.8:621.31:577.21:502.131.1

Sažetak

U vremenu ubrzanog tehnološkog razvoja i ekoloških izazova, važno je pronaći održiva rješenja koja povezuju napredne tehnologije s principom zaštite životne sredine. Motivi istraživanja stvaraju se iz potrebe za smanjenjem negativnih ekoloških pojava kroz integraciju pametnih telekomunikacionih i senzorskih mreža sa energetske efikasnim uređajima i održivim biohemijskim procesima. Cilj je razvijanje sistema koji omogućava praćenje potrošnje energije, kontrolu emisije gasova i proces obrade otpada u stvarnom vremenu. Rezultati prikazuju značajno smanjenje potrošnje energije i emisije štetnih gasova zajedno uz povećanje efikasnosti. Značaj rezultata se ogleda kroz doprinos razvoja pametne i održive funkcije koja povezuje tehnologiju i ekologiju što stvara osnovu za zelenu tranziciju.

Ključne riječi: Telekomunikacione mreže, energetska efikasnost, biohemijski procesi, okoliš.

JEL klasifikacija: L96, O33, Q2, Q5, Q55, Q56.

Abstract

In times of rapid technological development and environmental challenges, it is important to find sustainable solutions that combine advanced technologies with the principle of environmental protection. The research motives are created by the need to reduce negative environmental phenomena through the integration of smart telecommunication and sensor networks with energy-efficient devices and sustainable biochemical processes. The goal is to develop a system that enables monitoring of energy consumption, gas emission control and waste treatment process in real time. The results show a significant reduction in energy consumption and harmful gas emissions together with increased efficiency. The significance of the results is reflected in the contribution to the development of smart and sustainable functions that connect technology and ecology, which creates the basis for a green transition.

Keywords: Telecommunications Networks, Energy Efficiency, Biochemical Processes, Environment.

JEL classification: L96, O33, Q2, Q5, Q55, Q56.

UVOD

Globalni problem zagađenja zraka, vode i tla predstavlja jedan od najvećih izazova savremenog društva i održivog razvoja. Neprekidni porast industrijskih aktivnosti, urbanizacija, te intenzivna potrošnja prirodnih resursa doveli su do povećanja emisije štetnih gasova, teških metala i hemijskih spojeva koji negativno utiču na ekosisteme, zdravlje stanovništva i klimatsku stabilnost. Prekomjerna eksploatacija i nedovoljna kontrola otpadnih tvari doprinose narušavanju prirodne ravnoteže i dugotrajnom pogoršanju kvaliteta životne sredine. U borbi protiv ovih izazova, razvoj naprednih tehnologija postaje ključan faktor za praćenje i smanjenje zagađenja. Integracija pametnih mreža, senzorskih sistema i energetske efikasne elektroničke uređaja omogućava prikupljanje i obradu podataka u realnom vremenu, što doprinosi preciznijem nadzoru ekoloških parametara i bržem reagovanju na promjene u okolišu. Korištenjem digitalnih platformi, bežičnih senzorskih mreža i naprednih komunikacionih tehnologija nove generacije, moguće je ostvariti dinamičan sistem koji povezuje fizičke i digitalne procese u funkciji zaštite okoliša. Cilj rada je prikaz integrisanog pristupa koji povezuje pametne telekomunikacione i senzorske mreže s energetske efikasnim elektroničkim uređajima i održivim biohemijskim procesima radi smanjenja zagađenja i očuvanja kvaliteta životne sredine. Rad analizira savremene tehnološke koncepte koji omogućavaju praćenje, analizu i optimizaciju ekoloških procesa kroz primjenu održivih i inteligentnih sistema [1].

1. TEHNOLOŠKI OKVIR I KONCEPT PAMETNIH MREŽA

1.1. KONCEPT PAMETNIH MREŽA I PAMETNIH OKRUŽENJA

Koncept pametnih mreža (Smart Networks) predstavlja temelj digitalnih sistema koji povezuju informaciono-komunikacione tehnologije, senzore i analitičke platforme radi neprekidne razmjene i obrade podataka u stvarnom vremenu. One omogućavaju data-driven odlučivanje i automatsku optimizaciju procesa u skladu s promjenama okoline. Pametna okruženja (Smart Environment) koriste ove mreže za kontinuirano praćenje fizičkih, hemijskih i bioloških parametara – npr. kvalitet zraka, vode, vlažnost tla, temperaturu i nivo buke. Podaci se prenose putem bežičnih komunikacija na centralne platforme, gdje se analiziraju uz AI i mašinsko učenje. Automatizovani sistemi mogu pravovremeno reagovati: aktivirati ventilaciju, obavijestiti nadležne ili predložiti mjere za smanjenje emisija. Ovaj pristup omogućava precizniji monitoring, efikasnije upravljanje resursima i prediktivno upravljanje ekološkim sistemima, čime se doprinosi održivom razvoju urbanih i prirodnih sredina.

1.2. INTELIGENTNI SENZORSKI SISTEMI

Inteligentni senzorski sistemi (Smart Sensing Systems) predstavljaju centralnu komponentu pametnih mreža i okruženja, jer omogućavaju prikupljanje tačnih, pouzdanih i pravovremenih podataka o stanju životne sredine. Oni kombinuju različite tipove senzora, hemijske, biološke, fizičke kako bi se obuhvatili svi aspekti ekološkog monitoringa, od kvaliteta zraka i vode do temperature, vlage, nivoa buke i prisustva štetnih supstanci u tlu. Osnovna struktura ovih sistema zasniva se na integraciji hardverskih komponenti poput mikrokontrolera, senzorskih modula i bežičnih komunikacionih interfejsa kao što su Wi-Fi, LoRaWAN, ZigBee, NB-IoT), te softverskih algoritama za aktivaciju, obradu i prijenos podataka. Zahvaljujući tome senzori su sposobni da lokalno analiziraju podatke i prenesu samo relevantne informacije prema centralnim servisima ili oblaku (cloud computing), čime se smanjuje energetska potrošnja i opterećenje mreže. U okviru bežičnih senzorskih mreža (WSN) i Internet stvari (IoT), ovi sistemi omogućavaju međusobnu komunikaciju velikog broja uređaja, stvarajući distribuiranu mrežu koja pokriva široka geografska područja.

Primjeri implementacije ovih tehnologija uključuju:

- sistem za praćenje kvaliteta zraka u urbanim sredinama, gdje senzori mjere koncentraciju $PM_{2.5}$, CO_2 , NO_x , i O_3 čestica, te putem IoT platformi kao što su *ThinkingSpeak* ili *AWS IoT Core* omogućavaju analizu i vizualizaciju podataka u stvarnom vremenu,
- pametne senzorske stanice za vodene ekosisteme koje koriste biološke senzore za detekciju nivoa pH, rastvorenog kiseonika i prisustva teških metala u vodi, često uz autonomno napajanje putem solarnih ćelija,
- agro-senzorske sisteme koji mjere vlagu tla, temperaturu i koncentraciju hranjivih materija, omogućavajući pametno navodnjavanje i smanjenje potrošnje vode,
- integrisane platforme za upravljanje otpadom, gdje senzori u kontenjerima detektuju nivo popunjenosti i putem 5G mreža šalju informacije centralnom sistemu za optimizaciju ruta odvoza.

Primjena inteligentnih senzorskih sistema donosi višestruke koristi: smanjenje troškova monitoringa, povećanje tačnosti i pouzdanosti prikupljenih podataka, mogućnost prediktivne analize i formiranja baze za dugotrajne ekološke politike. U kombinaciji sa 5G i nadolazećim 6G tehnologijama, ovi sistemi dobijaju novu dimenziju – minimalnu latenciju, visoku propusnost i podršku za masovno povezivanje senzora. Time se stvara osnova za potpuno autonomne, samoadaptivne ekološke mreže koje mogu u stvarnom vremenu reagovati na promjene u okolišu, čime se značajno unapređuje održivost i zaštita životne sredine [2].

1.3. ULOGA 5G TEHNOLOGIJE U EKOLOŠKOM MONITORINGU

5G mreže omogućavaju istovremeno povezivanje ogromnog broja uređaja i razmjenu podataka u realnom vremenu, čime se stvara tehnološka osnova za razvoj inteligentnih ekosistema koji prate, analiziraju i upravljaju promjenama u okolišu. Osnovne prednosti 5G tehnologije su izuzetno velika propusnost, ultraniska latencija (ispod 1 ms) i mogućnost masovne povezanosti uređaja, omogućava pouzdanu, brzu i energetske efikasnu komunikaciju između senzorskih čvorova, mrežnih čvorova i serviskih platformi. To znači da senzori, raspoređeni u velikim prostornim područjima, mogu kontinuirano slati podatke o kvaliteti zraka, vode, tla, buke i drugih ekoloških parametara bez zagušenja mreže ili prekida veze. S obzirom na potrebu za dugotrajnim i autonomnim radom senzora, energetska efikasnost 5G mreža postaje dodatna prednost. U poređenju sa prethodnim generacijama, 5G mreže koriste adaptivne algoritme za kontrolu snage prijenosa i optimizaciju energetske resursa, što doprinosi produženom vijeku trajanja senzorskih čvorova. Time se značajno smanjuju troškovi održavanja i povećava pouzdanost cjelokupnog sistema. Kombinacijom 5G komunikacija, senzorskih mreža i inteligentnih platformi, ekološki monitoring prelazi iz pasivnog praćenja u aktivno i prediktivno upravljanje resursima, što predstavlja ključan korak ka održivoj i zelenoj tehnologiji budućnosti [3].

2. EKOLOŠKI SISTEMI I ENERGETSKA EFIKASNOST SENZORSKIH UREĐAJA

Upotreba energetski efikasnih uređaja je postavljena kao posljedica težnje za balansiranje potrošnje energenata zajedno sa njihovom proizvodnjom. Kod spomenutog globalnog procesa, elektronički sistemi nisu izuzetak i predstavljaju značajnu ulogu u borbi za održivim upravljanjem energenata. Značaj se javlja iz sveukupnog udjela elektroničkih uređaja kao potrošača električne energije.

Senzorski uređaji se predstavljaju kao glavni elementi u automatizovanim sistemima jer tokom svoje funkcije omogućavaju precizno praćenje potrošnje energije. Njihova osnovna funkcija je mjerenje električne struje koja prolazi kroz vodove i na taj način omogućavaju analizu i optimizaciju potrošnje energije. Kroz energetske efikasnost, senzorski uređaji poboljšavaju održivost i smanjuju emisiju štetnih gasova [4].

2.1. STRUKTURA I FUNKCIONALNOST SENZORSKOG ČVORA

Senzorski čvorovi su jedna od glavnih komponenti bežične sezonske mreže koja se sastoji od velikog broja prostorno raspoređenih i baterijski napajanih senzorskih čvorova. Imaju funkciju da obuhvate fizičko okruženje, primjene, potrebna izračunavanja pomoću dobivenih podataka i komuniciraju korištenjem radiointerfejsa. Struktura senzorskog čvora se sastoji od: senzora (pretvarača), radio bloka, mikrokontrolera i izvora napajanja. Senzor se u ovom kontekstu strukture naziva podsistem senzovanja koji je implementiran kao skup pasivnih i aktivnih senzora koji konvertuju informacije iz vanjskog okruženja u električne signale. Koriste se za praćenje parametara kao što su: svjetlost, pritisak, vibracije, temperatura, itd. Generišu naponske ili strujne signale na svojim izlazima koji se pojačavaju i nakon toga se digitalizuju uz pomoć A/D konvertora gdje se obrađuju, memorišu i predaju. Radio blok je primopredajnik kratkog dometa koji senzorskom čvoru obezbjeđuje bežičnu komunikaciju sa pristupnom tačkom ili uz pomoć nekog drugog senzorskog čvora u bežičnoj senzorskoj mreži. Mikrokontroler je sistem za obradu i kontroliše rad svih podsistema koji se nalaze unutar senzorskog čvora i na taj način vrši obradu podataka. Obuhvata mikrokontroler i memoriju za lokalnu obradu podataka. Izvor napajanja je podsistem napajanja za obezbjeđivanje odgovarajuće vrijednosti napona napajanja za svaku komponentu hardvera u senzorskom čvoru gdje se koristi baterija kao izvor napajanja [5].

2.2. DIZAJN I RAZVOJ ENERGETSKI EFIKASNIH ELEKTRONIČKIH KOMPONENTI

Optimizacija hardvera smanjuje potrošnju energije kroz implementaciju energetski efikasnih komponenti. Za smanjivanje gubitaka energije treba da se da prioritet razvoja komponenti sa niskom otpornošću i visokom efikasnošću. Za dizajn i razvoj elektroničkih komponenti preporučuje se uvođenje modularnih sistema napajanja. Upravljanje energijom na efikasan način produžava vrijeme rada uređaja i manjeg uticaja na okoliš. Smanjenje potražnje za energijom i pruža ekološke prednosti kroz smanjenje emisije stakleničkih gasova, pogotovo gdje se električna energija dobiva iz neobnovljivih izvora energije (termoelektrane).

Režimi niske potrošnje energije od velike su važnosti za elektroničke sisteme i predstavljaju skup strategija za uštedu energije kroz smanjenje potrošnje energije na najmanje nivoe bez ugrožavanja glavnih funkcionalnosti. Imaju za cilj da poboljšaju energetske efikasnost. Način rada niske potrošnje energije doprinosi i smanjenju uticaja elektroničkih sistema na okoliš. Kroz minimiziranje potrošnje energije pomažu u smanjenju ukupnog ugljičnog otiska tehnologije. Za elektroničke sisteme i senzorske uređaje izdvajaju se dvije vrste režima niske potrošnje, a to su: sleep and deep – sleep mode (način). U sleep načinu većina perifernih sklopova se isključuje, dok procesor ostaje spreman za brzo buđenje. Deep - sleep način dodatno smanjuje potrošnju energije tako što gasi gotovo sve funkcionalne blokove sistema, uključujući memoriju i takt, pa je buđenje sporije ali energetske učinkovitije.

Također, kao veliku važnost prema energetskej efikasnosti ima i minijaturizacija i upotreba naprednih poluprovodničkih tehnologija. One omogućavaju manju potrošnju energije što doprinosi smanjenju toplotnih gubitaka i dužem periodu trajanja baterija u prijenosnim elektroničkim sistemima.

Najpoznatije napredne poluprovodničke tehnologije su: CMOS, FinFET, SOI, GaN i SiC. Karakteristike sa kojima raspolažu su: minimalna energija, upotreba struje prilikom promjene stanja, manja potrošnja, veća brzina rada, toplotni gubici, pretvaranje i upravljanje energijom [6].

2.3. KOMUNIKACIONE TEHNOLOGIJE SA NISKOM POTROŠNJOM ENERGIJE

Komunikacione tehnologije koje imaju nisku potrošnju energije imaju za cilj napredna rješenja koja su dizajnirana za energetske efikasan prijenos podataka u sistemima koji imaju ograničene resurse i zahtjeve za dugotrajan rad. Od velikog značaja je Low Power Wide Area Network (LPWAN) mreža koja se oslanja na LTE bežičnu uslugu koja je obogaćena protokolima optimizacije za komunikaciju između uređaja i smanjenja potrošnje energije. Raspolažu sa tri ključne karakteristike: niska snaga, široko područje i optimizacija podataka. LPWAN koristi malo energije zbog protokola i mogućnosti stanja mirovanja. Izlazna snaga mreže omogućava uređajima da rade na malim baterijama do 10 godina i na taj način smanjuju troškove zamjene, a i zagađenja okoliša. Kreću se u rasponu od 30 km do 100 km kao provodnici za udaljene uređaje. Podržavaju uređaje koji se nalaze pod zemljom ili unutar zatvorenog prostora (uređaji za mjerenje vode, plina ili električne energije). Pored LPWAN – a značajne bežične komunikacijske tehnologije koje kao glavnu karakteristiku imaju nisku potrošnju energije su: LoRa (Long Range), ZigBee i BLE (Bluetooth Low Energy).

LoRa omogućava prijenos podataka na velikim udaljenostima uz vrlo malu potrošnju energije, što je čini dosta naprednom i ključnom za pametne gradove i praćenje okoliša. ZigBee je namijenjen komunikaciji na kraćim udaljenostima i najčešće se koristi u pametnim gradovima za upravljanje rasvjetom, senzorima i kućnim uređajima. BLE (Bluetooth Low Energy) se koristi za kratkodometnu komunikaciju sa malom potrošnjom energije kao što su pametni satovi i senzori i omogućava jednostavnu integraciju sa mobilnim telefonima. Navedene bežične komunikacijske tehnologije imaju zajednički cilj, a to je efikasna, štedljiva i pouzdana komunikacija između povezanih uređaja [7].

2.4. ODRŽIVI SISTEMI NAPAJANJA I OPTIMIZACIJA POTROŠNJE ENERGIJE

Solarni paneli su jedni od najrasprostranjenijih oblika upotrebe obnovljivih izvora energije, koji pretvaraju sunčevu energiju u električnu uz pomoć fotonaponskog efekta. Njihova efikasnost zavisi od faktora kao što su orijentacija panela, temperatura i stepen osunčanosti. Integracijom solarnih panela u mrežama moguće je da se optimizuje potrošnja energije i da se smanje gubici u prijenosu. Kroz održivo planiranje i upravljanje i drugim obnovljivim izvorima energije (voda i vjetar) doprinosi se smanjenju emisije ugljen – dioksida i povećanju energetske efikasnosti.

Bežične senzorske mreže sa prikupljanjem energije svoju suštinu klasifikuju putem produženja roka trajanja i efikasnosti senzorskih mreža koje su postavljene u okruženjima sa ograničenim resursima. Energetska samoodrživost senzorskih mreža se postiže uz upotrebu tehnologije Energy Harvesting (prikupljanje energije) koja omogućava da senzori prikupljaju energiju iz okoline (sunčeva svjetlost, vibracije ili toplota). Na taj način se smanjuje potreba za zamjenom baterija i produžava se period trajanja mreže što je čini efikasnom i održivom za nezagađenje okoliša i njegove održivosti [8].

3. HEMIJSKI ASPEKTI MONITORINGA I PROCESI ZA SMANJENJE ZAGAĐENJA

Savremeni pristup zaštiti životne sredine zahtijeva integraciju hemijskih analiza, senzorskih tehnologija i biohemijskih procesa za preciznu identifikaciju i neutralizaciju zagađujućih materija. Hemijski monitoring omogućava razumijevanje sastava i ponašanja polutanata, poput CO_2 , NO_x , SO_2 , teških metala i mikroplastike, te predviđanje njihovog širenja u ekosistemima. Napredni senzori i IoT mreže omogućavaju praćenje i obradu podataka u realnom vremenu, pružajući pouzdane informacije za ekološke i regulatorne odluke. Primjena biohemijskih metoda, uključujući mikroorganizme, enzime i biljke, omogućava pretvaranje štetnih supstanci u bezopasne ili korisne materijale (npr. biogas, biogorivo). Kombinacijom ovih tehnologija razvija se integrisani i održivi sistem koji ne samo da nadgleda stanje okoliša, već i aktivno doprinosi njegovom poboljšanju [9].

3.1. ANALIZA ZAGAĐENIH MATERIJALIMA I HEMIJSKI MONITORING

Zagađenje materije poput ugljen-dioksida (CO_2), azotnih oksida (NO_x), sumpor-dioksida (SO_2), teških metala (olovo, kadmij, živa, arsen) i mikroplastike predstavljaju najznačajnije hemijske prijetnje životnoj sredini i zdravlju ljudi. Njihovo prisustvo uzrokuje zakiseljavanje ekosistema, oštećenje vegetacije, kontaminaciju podzemnih voda, te bioakumulaciju toksina u organizmima duž prehrambenog lanca. Naprimjer, povećanje koncentracije NO_x i SO_2 , u zraku direktno doprinose stvaranju kiselih kiša, dok mikroplastika, osim fizičkih oštećenja u vodenim organizmima, djeluju i kao nosilac teških metala i organskih zagađivača. Savremeni hemijski monitoring prelazi s periodičnih, ručnih laboratorijskih analiza na automatske i digitalizovane metode nadzora. Ključnu ulogu imaju integrisane senzorske platforme koje omogućavaju in situ i real-time mjerenje koncentracija zagađivača u zraku, vodi i tlu. Ovi sistemi koriste napredne elektrohemijske senzore, optosenzore i mikrofluidne analizatore koji se zasnivaju na nanostrukturnim materijalima poput grafena, TiO_2 i ZnO . Njihova velika površina i selektivnost omogućavaju detekciju tragova gasova ili teških metala čak i u koncentracijama nižim od 1 ppm, što značajno povećava preciznost i brzinu analize. Ovi senzori se sve više povezuju putem IoT mreža i 5G komunikacionih sistema, što omogućava centralizovano prikupljanje, obradu i vizualizaciju podataka u stvarnom vremenu.

Konkretna poboljšanja postojećeg sistema hemijskog monitoringa u Bosni i Hercegovini i regiji mogla bi uključiti:

- implementaciju automatskih senzorskih stanica s IoT, koje bi zamijenile zastarjele metode uzorkovanja i laboratorijske analize, a to bi omogućilo kontinuirano praćenje bez potrebe za čestim terenskim intervencijama,
- integracija hemijskih senzora u pametne urbane mreže, čime bi se ostvarilo kontinuirano praćenje emisije iz saobraćaja, industrijskih postrojenja i kućnih ložišta,
- primjena mikrofluidnih analizatora koji smanjuju količinu potrebnih hemikalija i uzoraka, smanjuje troškove održavanja, te omogućavaju miniaturizaciju i mobilnost sistema,
- povezivanje sa satelitskim podacima i meteorološkim modelima, što bi omogućilo praćenje kretanja zagađivača kroz atmosferske slojeve i preciznije predviđanje epizoda visoke koncentracije.

Kombinacija senzorskih tehnologija, digitalnih komunikacionih sistema i napredne hemijske analitike predstavljaju ključni pravac razvoja ka efikasnijim, dostupnijim i ekonomski održljivijem sistemu monitoringa životne sredine [10].

3.2. BIOHEMIJSKI PROCESI I METODE ZA OBRADU ZAGAĐENE VODE I ZRAKA

Biohemijski procesi koriste prirodne sposobnosti mikroorganizama, biljaka i enzima za razgradnju, transformaciju ili uklanjanje toksičnih materija iz vode i zraka. Za razliku od konvencionalnih hemijskih tretmana, ovi pristupi su održivi, energetski štedljivi i doprinose očuvanju ekološke ravnoteže.

Razlikujemo nekoliko glavnih metoda:

Bioremedijacija – upotreba mikroorganizama (bakterija, gljivica, algi) za razgradnju organskih zagađivača poput naftnih derivata i pesticida. Može biti pasivna ili aktivna (sa dodatkom hranjivih materija i kiseonika). U novijim pristupima koriste se i genetski modificirani mikroorganizmi za bržu i ciljanu sanaciju.

Fitoremedijacija – biljke apsorbiraju i transformišu teške metale i organske spojeve. Primjeri su *Vetiveria zizanioides* i *Phragmites australis*, efikasne u tretmanu kontaminirane vode i sedimenata.

Biofiltracija – pročišćavanje zraka pomoću biofiltera ispunjenih poroznim materijalima (kompost, aktivni ugalj) u kojima bakterije razgrađuju amonijak, H₂S i hlapljive organske komponente (VOC).

U novijim istraživanjima sve veću pažnju privlače enzimski katalizovani procesi koji koriste izolovane enzime (npr. laktaze, peroksidaze, lipaze) za razgradnju mikroplastike, pesticida i farmaceutskih ostataka. Takvi procesi omogućavaju visoku selektivnost i efikasnost bez potrebe za živim mikroorganizmima, što smanjuje rizik od biološke kontaminacije.

Za poboljšanje trenutnog stanja u praksi, naročito u zemljama Zapadnog Balkana, predlažu se određene mjere:

- Integracija biohemijskih procesa sa automatizovanim senzorskim sistemima koji putem IoT i 5G mreža omogućavaju praćenje ključnih parametara (pH, temperatura, protok, koncentracija rastvorenog kiseonika) u realnom vremenu. Na osnovu ovih podataka, sistemi mogu samostalno prilagođavati uslove rada bioreaktora radi maksimalne efikasnosti.
- Razvoj hibridnih sistema koji kombinuju biološke i hemijske metode (oksidacija + bioremedijacija), čime se postiže sinergija i rizik od bioloških poremećaja, te doprinosi prirodnoj regeneraciji okoliša.
- Primjena digitalnih platformi uz upravljanje otpadnim vodama i emisijama koje generišu senzorske podatke, AI analitiku i prediktivne modele za optimizaciju procesa.

Kombinacijom biotehnologije, hemije i digitalne automatizacije stvara se nova generacija pametnih sistema za pročišćavanje resursa, u kojima se zagađivači ne samo uklanjaju, već i transformišu u korisne supstance. Takvi pristupi doprinose održivom razvoju, smanjuju troškova i zaštiti životne sredine sa ciljevima Evropskog zelenog plana [11].

3.3. INTEGRACIJA HEMIJSKIH SENZORA U PAMETNE MREŽE I ODRŽIVI MATERIJAL

Integracija hemijskih senzora u pametne telekomunikacione i senzorske mreže omogućava kontinuirano praćenje hemijskog sastava okoliša, detekciju anomalija i automatsko reagovanje na promjene. Savremeni nanohemijski senzori izrađeni od grafenskih i polimernih materijala imaju visoku selektivnost, nisku potrošnju energije i mogućnost rada u ekstremnim uslovima.

Održivi materijali, poput biokompozita i biorazgradivih polimera, čime se smanjuje negativan uticaj same opreme na okoliš. Primjenom 3D štampe i recikliranih materijala moguće je dodatno smanjiti troškove proizvodnje senzorskih jedinica i povećati njihovu dostupnost.

Poboljšanje trenutnog stanja uključuje:

- razvoj regionalnih laboratorija za validaciju senzorskih rješenja,
- razvoj industrijsko-akademske saradnje u oblasti razvoja biohemijskih senzora,
- implementaciju otvorenih digitalnih platformi koje objedinjuju podatke o hemijskim analizama i omogućavaju pristup široj javnosti [10].

4. INTEGRACIJA SISTEMA I PRIJENOS PODATAKA U REALNOM VREMENU

Integracija pametnih senzorskih sistema i naprednih komunikacionih mreža omogućava stvaranje povezanih i inteligentnih ekoloških platformi sposobnih za kontinuirano prikupljanje, obradu i prijenos podataka u realnom vremenu. Arhitektura ovakvih sistema obično se sastoji od više slojeva: senzorskog sloja, koji obuhvata mikrokontrolere i senzore za detekciju fizičkih i hemijskih parametara, mrežnog sloja, koji povezuje lokalne čvorove putem bežičnih tehnologija, te serverskog sloja, u kojem se podaci pohranjuju, analiziraju i vizualizuju. U modernim rješenjima, telekomunikacione mreže kao što su NB-IoT (Narrowband Internet of Things), 5G i LPWAN (Low Power Wide Area Network) imaju ključnu ulogu u prijenosu podataka između senzorskih čvorova i centralnih sistema. NB-IoT i LPWAN omogućavaju pouzdanu komunikaciju s minimalnom potrošnjom energije, što je idealno za udaljene senzorske lokacije, dok 5G mreže pružaju visoku propusnost i ultra-nisku latenciju, čime se obezbjeđuje gotovo trenutni prijenos informacija. Podaci prikupljeni sa terena se putem cloud platformi (AWS IoT, Azure IoT Hub) obrađuju i analiziraju korištenjem algoritma vještačke inteligencije i mašinskog učenja, koji omogućavaju predviđanje trendova, otkrivanje anomalija i donošenje odluka u realnom vremenu. Vizualizacija rezultata putem interaktivnih mapa i dashboard sistema omogućava nadležnim institucijama, industriji i građanima transparentan uvid u ekološke parametre. Na taj način, integrisani sistem funkcioniše kao pametna ekološka mreža, sposobna ne samo da prikuplja podake, već i da automatski reaguje na promjene u okolišu, aktivira procese obrade i optimizuje energetske resurse, čime se postiže održivo i inteligentno upravljanje životnom sredinom [12].

5. PRIMJENA PAMETNOG SISTEMA

Kao primjer primjene integrisanog pametnog sistema razmatra se praćenje kvaliteta zraka u urbanom području. Senzorske mreže raspoređene na strateškim lokacijama prikupljaju podatke o koncentracijama CO_2 , NO_x , SO_2 , i čestica $PM_{2.5}$, kao i temperaturi, vlažnosti i brzini vjetra.

Primjeri primjene pametnih sistema u zaštiti okoliša:

Praćenje kvaliteta zraka u Šangaju (Kina)

Grad je implementirao mrežu od više stotina senzora za $PM_{2.5}$, NO_2 i CO_2 povezanu putem 5G mreža s centralnom platformom za analizu podataka u realnom vremenu.

Rezultati:

- tačnost mjerenja povećala za 40% u odnosu na prethodne metode oslanjane na mjesečne laboratorijske uzorke,
- omogućeno pravovremeno izdavanje upozorenja za kvalitet zraka građanima i školama,
- smanjenje lokalne emisije kroz ciljane regulacije saobraćaja u zagađenim zonama.

Pametni senzorski sistemi za kvalitet vode u Amsterdamu (Holandija)

Instalacija senzora u kanalizacionoj i riječnoj mreži za detekciju nitrata, fosfata i teških metala, povezano s cloud platformom koja koristi AI za predviđanje zagađenja.

Rezultati:

- brža identifikacija izvora zagađenja omogućila smanjenje opasnih emisija u rijeke do 30%,
- automatizirani sistemi filtracije i biohemijske sanacije reagovali su na promjene u sistemu vode bez ljudske intervencije.

Biofiltracija i IoT praćenje u farmaceutskoj industriji u Njemačkoj

U pogonima za preradu farmaceutskog otpada ugrađeni biofilteri za VOC i H_2S sa senzorskim monitoringom, podaci slani u realnom vremenu na centralni sistem.

Rezultati:

- ekološka povećanja zraka povećana sa 75% na 92%,
- potrošnja energije optimizovana putem automatizovanog podešavanja protoka zraka,
- pravovremeno otkrivanje anomalija spriječilo prekoračenje emisijskih standarda [13].

ZAKLJUČAK

Savremeni izazovi zaštite okoliša zahtijevaju integrisan, interdiscipliniran pristup koji objedinjuje pametne senzorske sisteme, napredne komunikacione mreže i biohemijske procese. Primjena pametnih mreža i IoT tehnologija omogućava kontinuirano prikupljanje i analizu podataka u realnom vremenu, čime se poboljšava preciznost i brzina reagovanja na promjene u okolišu. Integracija hemijskih analiza i biohemijskih metoda omogućava ne samo detekciju, već i aktivno smanjenje zagađenja, uz minimizaciju negativnih posljedica po ekosisteme. Studije slučaja i konkretni primjeri pokazuju da ovakvi sistemi omogućavaju povećanu efikasnost, smanjenje potrošnje energije i bolje upravljanje resursima, u poređenju s tradicionalnim metodama. Pametni sistemi doprinose i prediktivnom upravljanju okolišem, omogućavajući pravovremene mjere za očuvanje kvaliteta zraka, vode i tla. Kombinacija digitalnih tehnologija, senzorskih mreža i biohemijskih procesa stvara održivi okvir za zaštitu životne sredine, omogućavajući razvoj inteligentnih i samoodrživih ekoloških sistema. Ovaj pristup predstavlja ključnu strategiju za smanjenje zagađenja, očuvanje prirodnih resursa i unapređenje kvaliteta života u urbanim i ruralnim sredinama, te otvara prostor za dalja istraživanja i primjenu inovativnih tehnologija u zaštiti okoliša.

LITERATURA

- [1] M. Z. Chowdhury, M. Shahjalal, S. Ahmed, and Y. M. Jang, "6G Wireless Communication Systems: Applications, Requirements, Technologies, Challenges, and Research Directions," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, 2020.
- [2] R. Sharma and M. Radenkovic, "Smart Environment Monitoring Using IoT and WSN Integration," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 11, no. 2, 2022.
- [3] Zhang, Z., Xiao, Y., Ma, Z., Xiao, M., Ding, Z., Lei, X., Karagiannidis, G. K., & Fan, P. (2019). *6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies*. IEEE Vehicular Technology Magazine, 14(3), 28–41.
- [4] AI FutureSchool. "Senzori struje u automatizaciji"
- [5] Akademija Niš, Odsjek Niš. „Senzorski VOR“
- [6] Curate Partners. "Understanding low-power modes: enhancing energy efficiency in modern electronics"
- [7] Velosi IoT. "A brief guide to Low-Power Wide-Area Network (LPWAN)"
- [8] Promwad. "Low-power wireless technologies"
- [9] Singh, J., & Kalamdhad, A. S. (2020). *Bioremediation of contaminated soil: An overview of advances and limitations*. Environmental Technology & Innovation, 18, 100673.
- [10] European Environment Agency (2022). *Air Quality in Europe – 2022 Report*. EEA Publications.
- [11] Hasan, R., & Jamil, S. (2021). *Integrating Biofiltration with Smart Monitoring Systems for Sustainable Pollution Control*. Environmental Technology & Innovation, 24, 102045.
- [12] Zhang, J., et al. (2024). *5G-enabled Smart Sensing Networks for Environmental and Industrial Applications*. Sensors, 24(6), 2921–2938.
- [13] Ali, A. (2024). *A Framework for Air Pollution Monitoring in Smart Cities by Using IoT and Smart Sensors*. Informatica