

PRIMJENA INTERNET STVARI (IOT) U PRAĆENJU I OČUVANJU OKOLIŠA / APPLICATION OF THE INTERNET OF THINGS (IOT) IN ENVIRONMENTAL MONITORING AND CONSERVATION

¹Dr. sc. Nehad Gaši, Dina Delić, BA¹

¹Internacionalni Univerzitet Travnik, Aleja Konzula – Meljanac bb, 72270 Travnik, BiH
e-mail: nehad.gasi@iu-travnik.com, dina.vrebac@iu-travnik.com

Pregledni članak

<https://www.doi.org/10.58952/zr20251402381>

UDK / UDC 004.8:502.131.1:628

Sažetak

Razvoj internet stvari (IoT) omogućio je primjenu pametnih tehnologija u praćenju i zaštiti okoliša. Umreženi senzori, uređaji i sistemi danas pružaju precizne i pravovremene podatke o stanju zraka, vode, tla i energetskih resursa. Ovi podaci omogućavaju donošenje informisanih odluka, ranu detekciju zagađenja i efikasnije upravljanje prirodnim resursima. Poseban značaj imaju IoT rješenja koja prate kvalitet zraka i vode, mjere potrošnju energije te optimiziraju procese reciklaže i upravljanja otpadom. Integracijom IoT tehnologija u ekološke politike i infrastrukturu, moguće je smanjiti negativne utjecaje ljudske aktivnosti, povećati efikasnost sistema i doprinijeti razvoju zelene ekonomije. Primjena IoT-a u zaštiti okoliša predstavlja važan korak ka digitalnoj transformaciji i održivom razvoju, posebno u zemljama Zapadnog Balkana gdje se suočavamo sa značajnim ekološkim izazovima.

Ključne riječi: internet stvari, IoT, zaštita okoliša, pametni senzori, zelena ekonomija, digitalna transformacija, održivi razvoj

JEL klasifikacija: Q55, Q57, O33

Abstract

The development of the Internet of Things (IoT) has enabled the application of smart technologies in environmental monitoring and protection. Networked sensors, devices and systems today provide precise and timely data on the state of air, water, soil and energy resources. This data enables informed decision-making, early detection of pollution and more efficient management of natural resources. Of particular importance are IoT solutions that monitor air and water quality, measure energy consumption and optimize recycling and waste management processes. By integrating IoT technologies into environmental policies and infrastructure, it is possible to reduce the negative impacts of human activity, increase system efficiency and contribute to the development of a green economy. The application of IoT in environmental protection represents an important step towards digital transformation and sustainable development, especially in the Western Balkan countries where we face significant environmental challenges.

Keywords: Internet of Things, IoT, environmental protection, smart sensors, green economy, digital transformation, sustainable development

JEL classification: Q55, Q57, O33

UVOD

U posljednjim decenijama, ljudska aktivnost je dovela do značajnih promjena u okolišu, uključujući zagađenje, smanjenje biodiverziteta i klimatske promjene koje ugrožavaju kvalitet života. Tradicionalni načini praćenja okoliša, zasnovani na povremenim mjerenjima i manuelnoj obradi podataka, postali su nedovoljni za efikasno upravljanje prirodnim resursima. U tom kontekstu, Internet stvari (IoT) predstavlja ključnu tehnologiju koja omogućava kontinuirano prikupljanje i analizu podataka u realnom vremenu. Primjenom IoT sistema moguće je nadzirati kvalitet zraka, vode i tla, pratiti klimatske promjene, unaprijed detektovati ekološke rizike te optimizovati korištenje resursa u poljoprivredi, industriji i urbanim sredinama. IoT omogućava proaktivan pristup zaštiti okoliša, zasnovan na pravovremenom otkrivanju problema i donošenju informisanih odluka. Osim praktične primjene, IoT ima značajnu ulogu u ostvarivanju ciljeva održivog razvoja i razvoju pametnih gradova. Ipak, njegova primjena nosi određene izazove, poput sigurnosti podataka, infrastrukturnih zahtjeva i pravnih pitanja. Cilj ovog rada je analizirati ulogu IoT sistema u praćenju i očuvanju okoliša, predstaviti osnovne primjene te razmotriti ključne tehničke i sigurnosne izazove.

1. KONCEPT I ARHITEKTURA IOT ZA OKOLIŠ

Internet stvari (IoT) predstavlja koncept međusobno povezanih fizičkih uređaja koji putem senzora, aktuatora i mrežnih tehnologija prikupljaju, razmjenjuju i analiziraju podatke u stvarnom vremenu. Kada se primijeni u oblasti zaštite okoliša, IoT omogućava stvaranje inteligentnih sistema koji kontinuirano nadziru prirodne resurse, prepoznaju promjene u ekosistemu i omogućavaju brzu reakciju na ekološke prijetnje. Ova tehnologija mijenja tradicionalni pristup zaštiti okoliša, jer prelazi s povremenih, manuelnih mjerenja na stalni, automatizovani nadzor uz podršku analitike i umjetne inteligencije.¹⁹²

1.1. OSNOVNI KONCEPT IOT-A U KONTEKSTU OKOLIŠA

IoT sistem u oblasti zaštite okoliša zasniva se na tri ključna elementa: senzorskoj infrastrukturi, mrežnom povezivanju i obradnim (analitičkim) platformama. Senzori se postavljaju u prirodno okruženje – rijeke, jezera, zrak, tlo ili gradske sredine – i prikupljaju podatke o temperaturi, vlažnosti, nivou zagađenja, kvalitetu vode ili prisustvu štetnih gasova. Ti podaci se potom bežično prenose putem mreža kao što su LoRaWAN, NB-IoT, LTE-M ili klasičnih mreža (Wi-Fi, 4G/5G) do centralnih servera ili oblaka (cloud platformi). Na analitičkom nivou, prikupljeni podaci se obrađuju pomoću edge computing i AI algoritama radi identifikacije obrazaca i predviđanja mogućih rizika – poput pojave smoga, kontaminacije vode ili požara.¹⁹³

1.2. ARHITEKTURA IOT SISTEMA ZA PRAĆENJE OKOLIŠA

Arhitektura IoT sistema za praćenje i očuvanje okoliša obično se sastoji od četiri sloja:

¹⁹² Ashton, K. (2009). *That 'Internet of Things' Thing*. RFID Journal.

¹⁹³ Gubbi, J. et al. (2013). *Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions*. Future Generation Computer Systems.

a) Sloj percepcije (senzorski sloj)

Ovaj sloj uključuje senzore, kamere, dronove i druge uređaje koji opažaju fizičke promjene u okruženju. Na primjer, senzori za praćenje kvaliteta zraka mjere koncentracije čestica PM2.5 i PM10, dok senzori za vodu detektuju nivo pH, temperature i prisustvo teških metala. Savremeni senzori koriste mikroelektromehaničke sisteme (MEMS) koji su mali, energetski efikasni i pogodni za dugotrajnu upotrebu na terenu.

b) Sloj mrežnog povezivanja

Ovdje se ostvaruje prenos podataka između uređaja i centralnih čvorova. Koriste se različite tehnologije u zavisnosti od geografije i infrastrukture — u udaljenim područjima prednost imaju Low Power Wide Area Networks (LPWAN), dok se u urbanim zonama koristi 5G. Uloga mrežnog sloja je da obezbijedi pouzdanu i sigurnu komunikaciju uz minimalnu potrošnju energije.

c) Sloj obrade podataka (cloud/edge sloj)

Ovaj sloj je ključan za analizu i interpretaciju podataka. Platforme poput Google Cloud IoT, AWS IoT Core ili Azure IoT Hub omogućavaju skalabilno upravljanje velikim količinama podataka (tzv. *big data*). Analitički alati koriste mašinsko učenje i prediktivnu analitiku kako bi otkrili nepravilnosti, predvidjeli trendove zagađenja ili detektovali neobične promjene koje ukazuju na ekološke incidente.



Slika 1.: Troslojna arhitektura

Izvor: Autorski prikaz

d) Sloj aplikacija (servisni sloj)

Na najvišem sloju nalaze se korisničke aplikacije koje pružaju informacije nadležnim institucijama, istraživačima ili građanima. Na primjer, aplikacije mogu prikazivati stanje kvaliteta zraka u realnom vremenu, izdavati upozorenja o požarima ili omogućavati građanima da prijave

onečišćenja putem mobilnih uređaja. Ovaj sloj povezuje tehnologiju s praktičnim djelovanjem — pružajući transparentne podatke i omogućavajući donošenje ekološki odgovornih odluka.¹⁹⁴

1.3. INTEGRACIJA S VJEŠTAČKOM INTELIGENCIJOM I GEOPROSTORNIM SISTEMIMA

Ključni napredak u modernim IoT rješenjima za okoliš je povezivanje s AI tehnologijama i GIS (geografski informacijski sistemi). Kombinovanjem geoprostornih podataka sa senzorima i satelitskim snimcima, moguće je precizno locirati izvore zagađenja i analizirati kako se oni šire u vremenu i prostoru. AI algoritmi dalje omogućavaju klasifikaciju uzroka zagađenja i predlaganje optimalnih mjera za njegovo smanjenje. Ova integracija omogućava *proaktivno* djelovanje — ne samo reagovanje na postojeće probleme, već i njihovo predviđanje i prevenciju.¹⁹⁵

1.4. SIGURNOST, INTEROPERABILNOST I ODRŽIVOST IOT SISTEMA

Kao i u drugim domenima, IoT sistemi za okoliš suočavaju se s izazovima sigurnosti podataka, interoperabilnosti različitih uređaja i energetske efikasnosti. Zbog osjetljivosti ekoloških podataka, neophodno je implementirati end-to-end enkripciju, autentifikaciju uređaja i politike zaštite privatnosti. Također, standardizacija protokola (npr. MQTT, CoAP, HTTP) osigurava da različiti sistemi i proizvođači mogu međusobno komunicirati bez tehničkih barijera. U pogledu održivosti, koristi se koncept zelene IoT infrastrukture — uređaji napajani solarnom energijom i sistemi optimizovani za nisku potrošnju resursa.¹⁹⁶

2. PRIMJENE IOT-TEHNOLOGIJE U PRAĆENJU OKOLIŠA

Primjena Interneta stvari (IoT) u zaštiti okoliša postaje jedno od najvažnijih područja digitalne transformacije održivog razvoja. Zahvaljujući napretku u senzorima, bežičnim mrežama i obradi podataka u oblaku, danas je moguće pratiti kvalitet zraka, vode i tla u realnom vremenu, analizirati uticaj ljudskih aktivnosti na ekosisteme i preduzimati mjere prije nego što nastupe ozbiljne ekološke posljedice. IoT time omogućava prelazak s reaktivnog na prediktivni model zaštite okoliša, gdje se odluke zasnivaju na preciznim i ažurnim podacima.¹⁹⁷

2.1. PRAĆENJE KVALITETA ZRAKA

Zagađenje zraka jedan je od najznačajnijih ekoloških problema urbanih sredina. Tradicionalne metode mjerenja, koje se oslanjaju na stacionarne stanice, često su ograničene prostorno i vremenski. IoT mreže omogućavaju gustu mrežu senzora raspoređenih po gradovima, industrijskim zonama i saobraćajnicama, koji u stvarnom vremenu mjere koncentracije gasova kao što su CO₂, NO₂, SO₂, O₃ te mikročestice PM_{2.5} i PM₁₀.¹⁹⁸ Ovi senzori, povezani putem LPWAN ili 5G mreža, šalju podatke u centralizovane sisteme za analizu.

¹⁹⁴ European Environment Agency (2023). *Digitalisation and the Environment in Europe*.

¹⁹⁵ IBM Research (2022). *AI-Powered Environmental Monitoring Systems*.

¹⁹⁶ ITU-T Recommendation Y.4900 (2020). *Green IoT for Sustainable Development*.

¹⁹⁷ United Nations Environment Programme (2022). *IoT and AI for Environmental Monitoring*.

¹⁹⁸ Kumar, P. et al. (2020). *Real-Time Air Quality Monitoring Using IoT*. Environmental Monitoring Journal.

Na osnovu prikupljenih informacija moguće je kreirati dinamičke karte zagađenja zraka koje prikazuju promjene iz sata u sat, identifikovati izvore emisije i obavijestiti stanovništvo o rizicima. Primjeri implementacije uključuju Air Quality Egg u Evropi i Smart Citizen Kit u Barceloni, koji građanima omogućavaju aktivno učešće u nadzoru kvaliteta zraka.¹⁹⁹ Napredniji sistemi koriste AI modele za predviđanje pogoršanja kvaliteta zraka, povezujući podatke o saobraćaju, vremenskim uslovima i emisijama industrije. Na taj način gradovi mogu pravovremeno donijeti odluke, poput privremenog ograničenja saobraćaja ili aktiviranja upozorenja o kvalitetu zraka.



Slika 2.: Senzor za praćenje kvalitet zraka

Izvor: https://images.svijet-medija.hr/img/115337-154/mysensees_senzor_kvalitete_zraka.jpg

2.2. PRAĆENJE KVALITETA VODE

IoT je izuzetno koristan u nadzoru i očuvanju vodnih resursa. Senzori se postavljaju u rijekama, jezerima, rezervoarima i sistemima za vodosnabdijevanje kako bi mjerili pH vrijednost, temperaturu, vodljivost, nivo kiseonika, kao i prisustvo teških metala, nitrata i bakterija.²⁰⁰ Podaci s tih senzora omogućavaju detekciju kontaminacije gotovo trenutno, što je od vitalnog značaja za sprečavanje trovanja i zaštitu ekosistema. Na primjer, sistem Smart Water Grid u Južnoj Koreji koristi IoT senzore i pametne ventile za automatsku kontrolu kvaliteta vode u urbanim mrežama.

Također, kombinacija IoT i satelitskog nadzora omogućava praćenje promjena u vodostaju i eroziji riječnih korita, što je posebno važno za predviđanje poplava. U ruralnim područjima, solarno napajani IoT uređaji prate nivo podzemnih voda i pomažu u racionalnom korištenju resursa za navodnjavanje. Takvi sistemi doprinose digitalizaciji poljoprivrede, smanjuju gubitke i podižu efikasnost vodnih sistema.²⁰¹

¹⁹⁹ European Commission (2023). *Smart Citizen and Air Quality Projects in EU Cities*.

²⁰⁰ Wang, S. et al. (2021). *IoT-Based Smart Water Quality Monitoring Systems: Review and Future Directions*. *Sensors Journal*.

²⁰¹ FAO (2022). *Digital Agriculture and Smart Water Management*.



Slika 3.: Senzor za praćenje kvalitete vode

Izvor: <https://d4n0y8dshd77z.cloudfront.net/listings/48308243/lg/FGWh0M0JjZXspfIphXuk.jpg>

2.3. PRAĆENJE STANJA TLA

Tlo je osnovni prirodni resurs čije degradiranje ima dugoročne posljedice na poljoprivredu i biodiverzitet. IoT tehnologija omogućava praćenje ključnih parametara tla kao što su vlažnost, temperatura, sadržaj hranjivih materija (azot, fosfor, kalijum) i nivo zbijenosti.²⁰² Pametni senzori u zemljištu prikupljaju podatke i šalju ih u centralne sisteme koji analiziraju kvalitet i produktivnost tla. Ovi podaci pomažu poljoprivrednicima da prilagode navodnjavanje, smanje upotrebu pesticida i spriječe eroziju. Primjeri dobre prakse su sistemi poput SmartFarmNet u Njemačkoj i Climate FieldView koji omogućavaju mapiranje tla na mikrolokacijama i predviđanje prinosa. Pored poljoprivrede, IoT se koristi i za praćenje zagađenja zemljišta u blizini industrijskih zona, rudnika i odlagališta otpada. Senzori detektuju hemikalije i teške metale koji mogu ugroziti zdravlje ljudi i ekosistema, što omogućava pravovremenu sanaciju kontaminiranih područja.



Slika 4.: Arduino senzor za praćenje stanja tla

Izvor: <https://starmotech.com/wp-content/uploads/2023/03/8-Ground-FC-28.png>

²⁰² Zhang, Y. et al. (2020). *Soil Monitoring Using Wireless Sensor Networks*. Journal of Environmental Informatics.

2.4. PRAĆENJE BIODIVERZITETA I EKOSISTEMA

IoT tehnologije imaju važnu ulogu u praćenju biodiverziteta kroz nadzor biljnih i životinjskih vrsta u njihovim prirodnim staništima. Primjenom senzora i sistema za praćenje omogućeno je praćenje migracija, populacionih promjena i uticaja klimatskih faktora. Ovi podaci služe kao osnova za očuvanje biodiverziteta i provođenje međunarodnih politika zaštite okoliša.²⁰³

3. IZAZOVI I PREPREKE IMPLEMENTACIJE

Primjena Interneta stvari (IoT) u zaštiti okoliša donosi brojne koristi u pogledu efikasnosti, transparentnosti i pravovremenog donošenja odluka. Međutim, istovremeno otvara i niz izazova koji se odnose na sigurnost podataka, standardizaciju, interoperabilnost i ekonomske aspekte. Razumijevanje ovih prednosti i ograničenja ključno je za pravilnu implementaciju IoT tehnologija u službi održivog razvoja.

3.1. PREDNOSTI IOT TEHNOLOGIJE U OČUVANJU OKOLIŠA

Glavna prednost IoT sistema u zaštiti okoliša je kontinuirano prikupljanje podataka u realnom vremenu, što omogućava brzu detekciju promjena i pravovremenu reakciju. IoT osigurava precizan nadzor ekoloških parametara i donošenje odluka zasnovanih na pouzdanim podacima. Integracijom s umjetnom inteligencijom omogućava se prediktivna analiza ekoloških rizika, dok digitalne platforme povećavaju transparentnost i učešće građana. Automatizacija praćenja smanjuje troškove i unapređuje efikasno upravljanje resursima.

3.2. IZAZOVI I OGRANIČENJA IOT SISTEMA ZA OKOLIŠ

Uprkos prednostima, primjena IoT sistema u zaštiti okoliša suočava se s tehničkim, ekonomskim i etičkim izazovima. Ključni problemi uključuju sigurnost i privatnost podataka, nedostatak standardizacije, visoke troškove implementacije te infrastrukturna ograničenja. Dodatno, potrošnja energije, elektronski otpad i nejasni pravni okviri predstavljaju važne prepreke. Uspješna primjena IoT-a zahtijeva uravnotežen pristup koji povezuje tehnološki razvoj, ekonomsku održivost i odgovornu regulaciju.²⁰⁴

4. KONCEPT I ARHITEKTURA INTERNETA STVARI (IOT) U PRAĆENJU I OČUVANJU OKOLIŠA

Internet stvari (IoT) predstavlja mrežu međusobno povezanih uređaja, senzora i sistema koji komuniciraju putem interneta radi prikupljanja, razmjene i analize podataka u stvarnom vremenu. U kontekstu zaštite okoliša, IoT omogućava automatizirano praćenje stanja prirodnih resursa – zraka, vode, tla, flore i faune – te blagovremeno reagovanje na promjene koje mogu imati ekološke ili društvene posljedice. IoT sistemi za praćenje okoliša obično se sastoje od tri osnovna sloja: sloja percepcije (senzorskog sloja), sloja mreže (komunikacijskog sloja) i sloja aplikacija (analitičkog sloja). Svaki od ovih slojeva ima specifičnu funkciju i zajedno čine arhitekturu koja omogućava precizno prikupljanje i interpretaciju podataka o stanju okoliša.

4.1. SLOJ PERCEPCIJE (SENZORSKI SLOJ)

²⁰³ UN Convention on Biological Diversity (2022). *Technology and Data for Nature Protection*.

²⁰⁴ United Nations (2023). *Digital Transformation and the Sustainable Development Goals*.

Ovaj sloj predstavlja "oči i uši" sistema. Sastoji se od različitih senzora koji prikupljaju podatke iz okoline — npr. senzori za mjerenje temperature, vlažnosti, kvaliteta zraka, nivoa buke, koncentracije CO₂, ili prisustva štetnih čestica (PM2.5 i PM10). Ti senzori se postavljaju u urbanim i ruralnim područjima, na rijekama, industrijskim zonama ili poljoprivrednim poljima. Savremeni senzori su energetske efikasni i često rade na principu samoodrživosti (npr. pomoću solarne energije), što omogućava dugotrajan i stabilan rad bez potrebe za čestim održavanjem. Uređaji poput Arduino i Raspberry Pi platformi često se koriste za razvoj lokalnih mreža senzora, zbog njihove fleksibilnosti i niske cijene.²⁰⁵

4.2. SLOJ MREŽE (KOMUNIKACIJSKI SLOJ)

Uloga mrežnog sloja je prenos podataka sa senzora do centralnog sistema za obradu. Ovaj sloj koristi različite tehnologije komunikacije — Wi-Fi, Bluetooth Low Energy (BLE), LoRaWAN, ZigBee, NB-IoT i druge. Izbor tehnologije zavisi od geografskog područja, energetskih zahtjeva i količine podataka koji se prenose. Na primjer, LoRaWAN se pokazala kao izuzetno efikasna za udaljene lokacije gdje nije dostupna stabilna internetska infrastruktura, dok je NB-IoT pogodna za urbane prostore sa velikom gustinom uređaja. Ove mreže omogućavaju prijenos podataka čak i u uslovima niskog signala i male potrošnje energije, što je ključno za dugotrajni monitoring okoliša.

4.3. SLOJ APLIKACIJA (ANALITIČKI SLOJ)

Na ovom nivou se podaci prikupljeni od senzora obrađuju, analiziraju i vizualiziraju pomoću softverskih platformi. To su često sistemi koji koriste vještačku inteligenciju (AI) i mašinsko učenje (ML) za prepoznavanje obrazaca i predviđanje budućih događaja — npr. povećanja zagađenja zraka ili rizika od poplava.²⁰⁶ Rezultati se prikazuju u obliku interaktivnih mapa, grafova i alarma, što omogućava ekološkim službama, istraživačima i lokalnim vlastima da brzo donose odluke. Na primjer, ako senzori otkriju povećanu koncentraciju štetnih gasova u zraku, sistem automatski šalje upozorenje nadležnim institucijama i stanovništvu putem mobilnih aplikacija.

4.4. INTEGRACIJA I SIGURNOST SISTEMA

Uspješna primjena IoT tehnologije zahtijeva pouzdanu integraciju između uređaja, mreža i aplikacija. Ključni izazov je sigurnost — jer svaka tačka komunikacije može biti ranjiva na hakerske napade ili gubitak podataka. Stoga se koriste sigurnosni protokoli poput TLS (Transport Layer Security) i end-to-end enkripcije, te se uvode mehanizmi autentifikacije i kontrole pristupa.

Takođe, značajan aspekt arhitekture IoT sistema je interoperabilnost — sposobnost različitih uređaja i platformi da komuniciraju bez obzira na proizvođača ili tehničke specifikacije. Otvoreni standardi poput MQTT i CoAP omogućavaju kompatibilnost među sistemima i olakšavaju razmjenu podataka na globalnom nivou. U cjelini, IoT arhitektura za praćenje i očuvanje okoliša funkcioniše kao sveobuhvatan ekosistem koji povezuje fizički svijet (senzore i uređaje) sa digitalnim svijetom (analitičke i upravljačke platforme).

²⁰⁵ Arduino Project Hub. (2022). *IoT Environmental Monitoring System*.

²⁰⁶ IBM Research. (2019). *AI and IoT Integration for Environmental Data Analysis*.

Zahvaljujući tome, moguće je pravovremeno reagovati na ekološke izazove, poboljšati održivost resursa i unaprijediti kvalitet života stanovništva.²⁰⁷

5. PRAKTIČNA PRIMJENA IOT SISTEMA U PRAĆENJU KVALITETA ZRAKA, VODE I TLA

Primjena IoT tehnologija u zaštiti okoliša ogleda se kroz sisteme za kontinuirano praćenje kvaliteta zraka, vode i tla te pravovremeno prepoznavanje ekoloških prijetnji. Korištenjem senzora i analitičkih platformi omogućeno je prikupljanje podataka u realnom vremenu i donošenje odluka zasnovanih na dokazima. Ovakva rješenja, prisutna i u zemljama Zapadnog Balkana, doprinose smanjenju zagađenja, efikasnijem korištenju resursa i većoj transparentnosti u upravljanju okolišem.

5.1. PRAĆENJE KVALITETA ZRAKA POMOĆU IOT SISTEMA

Jedan od najčešćih oblika primjene IoT tehnologije u zaštiti okoliša je monitoring kvaliteta zraka. Mreže senzora postavljene u urbanim i industrijskim područjima prate koncentracije ključnih zagađujućih materija i podatke u realnom vremenu šalju u centralne sisteme za analizu. Na osnovu tih podataka moguće je identifikovati rizična područja i pravovremeno preduzeti mjere zaštite zdravlja stanovništva. Primjeri takvih sistema su globalna mreža *AirVisual*, kao i projekti u Bosni i Hercegovini koji omogućavaju javnu dostupnost podataka i njihovu primjenu u planiranju saobraćaja i industrijskih aktivnosti. IoT pristup omogućava veću preciznost i brzu reakciju u odnosu na tradicionalna, povremena mjerenja.

5.2. IOT SISTEMI ZA PRAĆENJE KVALITETA VODE

Vodeni resursi imaju ključnu ulogu u održivom razvoju, a IoT tehnologije omogućavaju njihovo kontinuirano praćenje i rano otkrivanje zagađenja. Pametni senzori mjere osnovne parametre kvaliteta vode i podatke u realnom vremenu šalju u sisteme za analizu, gdje se utvrđuju odstupanja od propisanih normi i aktiviraju upozorenja. Ovakvi sistemi se koriste u projektima upravljanja vodama i poplavama, kao i u poljoprivredi za optimizaciju navodnjavanja i zaštitu zemljišta. Dodatno, javna dostupnost podataka doprinosi većoj transparentnosti i svijesti o očuvanju vodnih resursa.

5.3. PRAĆENJE I UPRAVLJANJE KVALITETOM TLA

Kvalitet tla značajno utiče na poljoprivredu i ekosisteme, a IoT omogućava kontinuirani nadzor njegovih hemijskih i fizičkih svojstava. Senzori prikupljaju podatke koji pomažu u optimizaciji sadnje, upotrebe đubriva i navodnjavanja, čime se smanjuje negativan uticaj na okoliš. Integracija s meteorološkim podacima i satelitskim snimcima omogućava razvoj pametnih poljoprivrednih sistema koji povećavaju produktivnost i održivost resursa.

²⁰⁷ World Economic Forum. (2023). *The Role of IoT in Sustainable Development*.

5.4. INTEGRACIJA IOT SISTEMA ZA HOLISTIČKO UPRAVLJANJE OKOLIŠEM

Najveća vrijednost IoT-a leži u integraciji različitih ekoloških podсистема — zraka, vode i tla — u jedinstvenu mrežu. Na taj način se formira sveobuhvatna platforma koja omogućava analizu međuodnosa između različitih elemenata ekosistema. Na primjer, povećano zagađenje zraka može se povezati s kiselim padavinama koje utiču na kvalitet vode i tla. Takva integrisana rješenja se već koriste u projektima "Smart City" koncepta, gdje gradske vlasti upravljaju resursima putem centralizovanih IoT platformi. Sistem može automatski prilagoditi potrošnju energije, aktivirati filtracione uređaje ili generisati izvještaje o stanju okoliša dostupne javnosti. Ova digitalna transformacija ekologije doprinosi ostvarivanju ciljeva održivog razvoja (SDG), posebno u segmentima čistog zraka, vode, klimatske akcije i održivih zajednica.²⁰⁸

6. IZAZOVI I SIGURNOSNI ASPEKTI IOT SISTEMA U ZAŠTITI OKOLIŠA

Iako Internet stvari (IoT) ima ogroman potencijal u očuvanju i praćenju okoliša, njegova implementacija nosi niz tehničkih, sigurnosnih, etičkih i pravnih izazova. Ti izazovi ne proizlaze samo iz tehničke složenosti sistema, već i iz potrebe da se osigura tačnost podataka, zaštita privatnosti, interoperabilnost različitih uređaja i održivost infrastrukture. Uspješno rješavanje ovih pitanja od ključnog je značaja kako bi IoT rješenja zaista doprinijela održivom razvoju i zaštiti životne sredine.²⁰⁹

6.1. TEHNIČKI IZAZOVI I PROBLEMI INTEROPERABILNOSTI

Jedan od glavnih izazova primjene IoT sistema u zaštiti okoliša je tehnička raznolikost uređaja, senzora i platformi, što stvara probleme interoperabilnosti i fragmentaciju podataka. Nedostatak jedinstvenih standarda otežava povezivanje i obradu informacija, a skalabilnost sistema zahtijeva optimizaciju prijenosa i obrade velikih količina podataka u realnom vremenu. Međunarodne organizacije rade na definisanju standarda kako bi se osigurala sigurnija i efikasnija razmjena podataka među IoT mrežama.

6.2. SIGURNOSNI RIZICI I ZAŠTITA PODATAKA

Sigurnost i privatnost su ključni izazovi u primjeni IoT tehnologija. Svaki uređaj i komunikacijski kanal može biti meta hakerskih napada, što može dovesti do pogrešnih analiza ili onespособljavanja sistema. Zaštita podrazumijeva višeslojnu sigurnosnu arhitekturu s enkripcijom podataka, autentifikacijom, kontrolom pristupa i redovnim ažuriranjem firmware-a. Poseban izazov je zaštita privatnosti, naročito kod podataka poput geolokacije, zbog čega IoT sistemi moraju biti usklađeni s GDPR-om i sličnim propisima.

6.3. ENERGETSKA EFIKASNOST I ODRŽIVOST UREĐAJA

Većina IoT uređaja koristi baterijsko napajanje i ima ograničen vijek trajanja. U sistemima koji obuhvataju hiljade senzora postavljenih u udaljenim područjima, redovna zamjena baterija ili servisiranje postaje logistički i ekonomski izazov. Zato se sve više istražuju samoodrživi energetske modeli, poput solarnih senzora ili uređaja koji koriste kinetičku energiju iz okoline.

²⁰⁸ United Nations. (2020). *IoT and the Sustainable Development Goals*.

²⁰⁹ UNEP. (2022). *Digital Environmental Systems and Global Governance*.

Pored toga, problem predstavlja elektronski otpad (e-waste), jer veliki broj nefunkcionalnih uređaja može postati novi izvor zagađenja. Održiv dizajn IoT rješenja uključuje upotrebu reciklabilnih materijala, dugovječnih komponenti, te pametnog upravljanja energijom (npr. automatsko isključivanje senzora kada nisu potrebni).²¹⁰

6.4. PRAVNE I ETIČKE DILEME

Uvođenje IoT sistema u ekološki monitoring otvara pravna i etička pitanja vezana za vlasništvo i upotrebu podataka. Nejasna odgovornost može dovesti do zloupotrebe informacija ili ograničenog pristupa javnosti, dok etički aspekt uključuje pravo građana na transparentnost u prikupljanju i korištenju podataka. Potrebno je razviti otvorene platforme i politike koje omogućavaju pristup informacijama uz zaštitu privatnosti.²¹¹

6.5. INSTITUCIONALNI I REGULATORNI IZAZOVI

Efikasna primjena IoT tehnologija u zaštiti okoliša zahtijeva koordinaciju državnih institucija, privatnog sektora i akademske zajednice, uz jasne zakonske okvire i tehničke standarde. Potrebne su nacionalne strategije koje uključuju standardizaciju protokola, verifikaciju podataka, akreditaciju proizvođača i javno izvještavanje o stanju okoliša, uz podršku razvoju "zelenih inovacija" i obrazovanju kadrova. Izazovi u primjeni IoT-a služe kao putokaz za jačanje sigurnosti, efikasnosti i transparentnosti, čime se ostvaruju stabilne mreže koje doprinose održivom razvoju i zaštiti prirodnih resursa.²¹²

6.5.1. Preporuke za praksu

Uspjeh IoT projekata u zaštiti okoliša zahtijeva strategiju koja obuhvata održivost, tehničku fleksibilnost, organizacijsku koordinaciju i društvenu prihvatljivost. Projekti trebaju jasno definirane ciljeve i metrike uspjeha, modularne platforme za nadogradnju senzora, odgovarajuće komunikacijske protokole te višeodijelne timove koji spajaju znanja iz tehnologije, ekologije i statistike. Financijski, nužno je planirati održivo financiranje, uključujući javno-privatna partnerstva i lokalnu participaciju. Podaci moraju biti sigurni, transparentni i pravilno interpretirani, dok edukacija i uključivanje građana povećavaju povjerenje i podršku inicijativama.

²¹⁰ UNEP. (2021). *Sustainable Design of Connected Devices*.

²¹¹ European Environment Agency. (2022). *Public Access to Environmental Information*.

²¹² WEF. (2023). *IoT and Sustainable Transformation of Environmental Systems*.

ZAKLJUČAK

Primjena Interneta stvari (IoT) u praćenju i očuvanju okoliša predstavlja jedan od najznačajnijih primjera sinergije tehnologije i održivog razvoja u savremenom društvu. IoT omogućava stvaranje pametnih ekoloških sistema koji nadziru ključne aspekte životne sredine u realnom vremenu, nudeći pouzdane podatke potrebne za analizu i donošenje odluka. Zahvaljujući umreženim senzorima, komunikacionim platformama i naprednim algoritmima za obradu informacija, moguće je precizno i kontinuirano pratiti promjene u kvalitetu zraka, vode, tla, temperature i buke, čime se značajno unapređuje sposobnost društva da reaguje na ekološke izazove. Upravo ta sposobnost da se podaci prikupljaju, analiziraju i koriste u stvarnom vremenu čini IoT ključnim alatom za prevenciju ekoloških problema, a ne samo za njihovo naknadno otkrivanje. Na primjer, pametni senzorski sistemi mogu ranije detektovati zagađenje rijeka ili povećane emisije u industrijskim zonama, omogućavajući nadležnim institucijama da odmah poduzmu mjere. Ovakav pristup ne samo da doprinosi očuvanju prirode, već i racionalizaciji troškova nadzora i smanjenju ljudskih grešaka u procesu praćenja. Pored praktičnih koristi, primjena IoT-a ima i strateški značaj. Ona doprinosi izgradnji digitalne infrastrukture koja podržava koncept pametnih gradova i održivih zajednica. Integracija IoT sistema sa platformama za analitiku i donošenje odluka stvara osnovu za zelenu tranziciju – prelazak sa tradicionalnog upravljanja okolišem na digitalno, proaktivno i efikasno. Zemlje koje rano implementiraju ovakve tehnologije ostvaruju i konkurentsku prednost, jer pokazuju spremnost da spoje ekonomski rast sa ekološkom odgovornošću. Ipak, razvoj i primjena IoT sistema suočavaju se i s nizom izazova, među kojima su sigurnost podataka, interoperabilnost različitih uređaja, troškovi implementacije te potreba za standardizacijom. Kako bi se ostvario puni potencijal ove tehnologije, neophodna je saradnja između vlada, akademske zajednice, tehnoloških kompanija i ekoloških organizacija. Takva saradnja omogućava formulisanje jasnog regulatornog okvira i podsticanje inovacija koje vode ka digitalno održivom društvu. Zaključno, Internet stvari nije samo tehnološki koncept, već temeljna komponenta nove paradigme upravljanja okolišem. Njegova primjena u praćenju i očuvanju prirodnih resursa predstavlja korak ka globalno održivoj budućnosti, u kojoj će odluke o zaštiti životne sredine biti zasnovane na tačnim, ažurnim i naučno verifikovanim podacima. U tom smislu, IoT postaje neizostavan alat za izgradnju svijeta koji istovremeno teži tehnološkom napretku i očuvanju prirodne ravnoteže – svijeta u kojem tehnologija služi čovjeku, ali i planeti.

LITERATURA

1. Ashton, K. (2009). That 'Internet of Things' Thing. RFID Journal.
2. Gubbi, J. et al. (2013). Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions. Future Generation Computer Systems.
3. European Environment Agency (2023). Digitalisation and the Environment in Europe.
4. IBM Research (2022). AI-Powered Environmental Monitoring Systems.
5. ITU-T Recommendation Y.4900 (2020). Green IoT for Sustainable Development.
6. United Nations Environment Programme (2022). IoT and AI for Environmental Monitoring.
7. Kumar, P. et al. (2020). Real-Time Air Quality Monitoring Using IoT. Environmental Monitoring Journal.
8. European Commission (2023). Smart Citizen and Air Quality Projects in EU Cities
9. Wang, S. et al. (2021). IoT-Based Smart Water Quality Monitoring Systems: Review and Future Directions. Sensors Journal.
10. FAO (2022). Digital Agriculture and Smart Water Management.
11. Zhang, Y. et al. (2020). Soil Monitoring Using Wireless Sensor Networks. Journal of Environmental Informatics.
12. WWF (2023). IoT Applications in Biodiversity Conservation.
13. UN Convention on Biological Diversity (2022). Technology and Data for Nature Protection.
14. European Commission (2023). Digital Europe Programme: Environmental Data Integration.
15. Smart Citizen Project (2021). Citizen Science and Air Quality Monitoring.
16. ITU-T Recommendation Y.4900 (2020). Green IoT for Sustainable Development.
17. United Nations (2023). Digital Transformation and the Sustainable Development Goals.
18. Arduino Project Hub. (2022). IoT Environmental Monitoring System.
19. IBM Research. (2019). AI and IoT Integration for Environmental Data Analysis.
20. World Economic Forum. (2023). The Role of IoT in Sustainable Development.
21. IQAir. (2022). Air Quality Data and IoT Systems.
22. Smart Water Networks Forum (SWAN). (2021). Case Studies on IoT-Enabled Water Management.
23. AgriTech Alliance. (2023). Smart Farming Through IoT Integration.
24. United Nations. (2020). IoT and the Sustainable Development Goals.
25. UNEP. (2022). Digital Environmental Systems and Global Governance.
26. ETSI. (2023). Interoperability Framework for Smart Environment Devices.
27. Kaspersky Lab. (2021). IoT Threat Landscape Report.
28. UNEP. (2021). Sustainable Design of Connected Devices.
29. European Environment Agency. (2022). Public Access to Environmental Information.
30. WEF. (2023). IoT and Sustainable Transformation of Environmental Systems.

Organizacija i održavanje 31. Međunarodne konferencije pod nazivom: **“Međunarodne konferencije o zelenoj ekonomiji, stanju okoliša, klimatskim promjenama i održivoj tranziciji”** se realizuje uz sufinansiranje **Fonda za zaštitu okoliša Federacije Bosne i Hercegovine**, kao dio projektnih aktivnosti programa *„Projekti jačanja javne svijesti o značaju zaštite okoliša“*.



***"Sadržaj ove publikacije isključiva je odgovornost autora radova i ne predstavlja nužno stav
Fonda za zaštitu okoliša Federacije Bosne i Hercegovine"***

